

平成 30 年 6 月 15 日現在

機関番号：12101

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2017

課題番号：15K13811

研究課題名(和文) 分子磁性伝導体による磁場応答トランジスタの開発

研究課題名(英文) Development of magnetic field responsive transistor based on molecular conductors

研究代表者

西川 浩之(Hiroyuki, Nishikawa)

茨城大学・理学部・教授

研究者番号：40264585

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：分子性導体の主要構成分子であるテトラチアフルバレン(TTF)誘導体が常磁性金属イオンであるCu(II)イオンに配位したTTF-金属錯体を用いた電界効果トランジスタ(FET)の特性を向上させるため、TTF-金属錯体の誘導体を新たに合成し特性の向上を達成した。また、新しいシッフ塩基型錯体としてTTF部位を持たないsalphen錯体が大気中で安定に作動するFETデバイスを与えることを見出した。さらに、よりスピン多重度が大きな金属イオンと配位可能な新規TTF-配位子、ならびにその錯体の合成に成功し、強磁性相互作用を示すキューブ錯体や水素結合ネットワークを有する一次元チューブ状錯体の開発に成功した。

研究成果の概要(英文)：In order to improve field effect transistor (FET) performance of the thin film devices composed of the TTF-metal complex (TTF = tetrathiafulvalene) where TTF moieties coordinate to a paramagnetic metal ions such as Cu(II) ion, new derivatives of the TTF-metal complex were synthesized and the device performance was improved. We also developed an air-stable FET device based on salphen complexes which are non-TTF type metal complex. We succeeded in the development new TTF-ligands capable for coordination to paramagnetic metal ions with much higher spin multiplicity, and found a cubic complex with ferromagnetic interaction between metal ions and a one-dimensional tubular complex with a hydrogen bond network.

研究分野：物理化学

キーワード：有機エレクトロニクス 半導体デバイス 分子性導体 電気物性 磁性 金属錯体

1. 研究開始当初の背景

半導体エレクトロニクスはデバイスの微細化により発展してきたが、微細化による高機能化にも限界があり、これまでのエレクトロニクス技術とは全く異なる新しい動作原理に基づくデバイスの開発が必要不可欠となっている。近年、電子がもつ電荷とスピンという2つの自由度を1つのシステムで利用することにより、より高機能なデバイスの開発を目指す、いわゆるスピントロニクスの研究が非常に活発に行われている。これまで、スピントロニクスの研究は無機物質を中心に行われてきたが、導電性高分子や低分子有機半導体、グラフェンなどの炭素系材料を用いた分子スピントロニクスも注目を集めている [Nature Mat., 9, 345 (2010), Adv. Func. Mat., 19, 3711 (2009)]. 無機系では、半導体活性層に強磁性半導体を用いた FET の報告があるが、通常、磁性電極と非磁性の半導体の組み合わせを中心に研究が行われている。一方、有機系で磁性成分を有する物質を半導体活性層に用いた例はほぼ皆無である。

申請者は、伝導性と磁性がより強く相互作用する系の開発を目指し、テトラチアフルバレン(TTF) 誘導体からなる分子性導体に、常磁性金属イオンを組み込んだ TTF-常磁性金属錯体の創出に成功している。この TTF-金属錯体は中性錯体であることから、薄膜デバイス化することにより、特性は低いものの TTF-金属錯体を用いた電界効果トランジスタ(FET)の開発にも成功している。

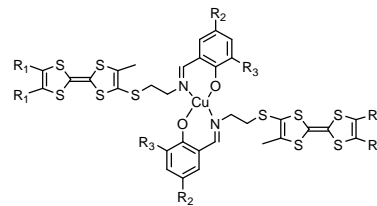
2. 研究の目的

本研究では TTF-常磁性金属錯体を半導体活性層に用いることにより、従来の電界効果スピントランジスタ(スピン FET)とは異なる作動原理に基づく新しい有機デバイスの開発を目的とする。申請者は既に、TTF-金属錯体を用いてデバイスを構築し、特性は低いものの FET 特性を示すデバイスの開発に成功している。本研究では、TTF-金属錯体からなるデバイスの性能向上を図るとともに、磁場下におけるデバイス特性の解明を行う。具体的には以下に挙げる項目で研究を遂行する。

- (1) TTF-金属錯体を用いた FET デバイスの特性を向上させるため、製膜条件の検討および高配向の薄膜を作製するため、自己組織化能を強化した TTF-金属錯体の開発を行う。
- (2) スピン多重度を増大させるため、中心金属を変換した系の開発を行う。配位部位がより多座配位のものを作製することから、真空蒸着法による製膜の可能を検討する。
- (3) 磁場下での FET 特性の測定および外部磁場によるスイッチング効果の評価を行う。
- (4) TTF-金属錯体の伝導電子と局在スピンの相互作用を見積もるため、伝導性を有する TTF-金属錯体のラジカル塩を作製し、ESR 測定を行う。

3. 研究の方法

分子性導体の主要構成分子である TTF が、常磁性金属イオンに直接配位した TTF-金属錯体として、 $[\text{Cu}^{\text{II}}(\text{EDT-sae-TTF})_2]$ (図 1) を用いた FET デバイスの開発に成功している。このデバイスの特性を向上させるため、薄膜の作製条件を検討するとともに、真空蒸着法およびスピンコート法、それぞれに適した新規な誘導体の設計と合成を行う。作製したデバイスの FET 特性を無磁場および磁場下で測定し、磁場応答性を検討する。さらに、よりスピン多重度が大きな TTF-金属錯体を合成するため、3 座以上の配位座を持つ新規 TTF-配位子を合成し、その常磁性金属錯体を合成する。



$[\text{Cu}(\text{EDT-sae-TTF})_2]$: $\text{R}_1\text{-R}_1 = \text{SCH}_2\text{CH}_2\text{S}$, $\text{R}_2 = \text{R}_3 = \text{H}$

$[\text{Cu}(\text{C6-sae-TTF})_2]$: $\text{R}_1 = \text{S}^t\text{C}_6\text{H}_{13}$, $\text{R}_2 = \text{R}_3 = \text{H}$

$[\text{Cu}(\text{Bz-sae-TTF})_2]$: $\text{R}_1\text{-R}_1 = \text{C}_6\text{H}_5$, $\text{R}_2 = \text{R}_3 = \text{H}$

$[\text{Cu}(\text{Bz-OMe-tBu-sae-TTF})_2]$: $\text{R}_1\text{-R}_1 = \text{C}_6\text{H}_4(\text{OMe})$, $\text{R}_2 = \text{OMe}$, $\text{R}_3 = \text{tBu}$

図 1. TTF-金属錯体の分子構造

(1) 新規 TTF-金属錯体の合成と性質

$[\text{Cu}^{\text{II}}(\text{EDT-sae-TTF})_2]$ のデバイスの特性を向上させるため、分子間相互作用がより増大させた分子として、TTF の置換基がエチレンジチオ基に比べより平面性の高いベンゼン環の錯体 ($[\text{Cu}^{\text{II}}(\text{Bz-sae-TTF})_2]$), 長鎖アルキル基で置換した錯体 ($[\text{Cu}^{\text{II}}(\text{C6-sae-TTF})_2]$) の合成を行う。溶媒への溶解度を向上させるため、配位部位である schiff 塩基部位のフェノラートを tert-ブチル基およびメトキシ基で置換した錯体 ($[\text{Cu}^{\text{II}}(\text{Bz-OMe-tBu-sae-TTF})_2]$) を新たに合成し、デバイスの作製と特性の評価を行う。

(2) 多座配位可能な新規 TTF-金属錯体の開発

真空蒸着法による薄膜の作製を目的として、新たに 4 座 TTF-配位子とその Cu(II)錯体である $[\text{Cu}^{\text{II}}(\text{EDT-bsae-TTF})]$ を合成し真空蒸着による成膜を試みる。また、Cu(II)イオンよりもスピン多重度が大きな Fe(II), Co(II), Ni(II)イオンを用いた新規 TTF-金属錯体を開発するため、新たに 3 座 TTF-配位子、ET-H₂heip-TTF を合成し、金属錯体の開発と構造、物性の解明を行う。

(3) salphen 錯体を用いた薄膜デバイスの開発と TTF-金属錯体におけるπ-d 相互作用の解明

高い平面性に基づく大きな分子間相互作用の利用を目的として、salphen 錯体を用いた薄膜デバイスの開発を行う。また、TTF-金属錯体におけるπ-d 相互作用を明らかにするため、ESR 測定および分子軌道計算を行う。

4. 研究成果

(1) 新規 TTF-金属錯体の合成と性質

FET デバイスの特性を決定する要因に薄膜のグレインサイズがある。グレインサイズは分子間相互作用が反映されることから、より大きな分子間相互作用が期待される TTF-金属錯体の合成を行った。伝導性を担う TTF 部位の平面性を向上させるため、置換基のエチレンジチオ基をベンゼン環に置換した新規錯体 ($[\text{Cu}^{\text{II}}(\text{Bz-sae-TTF})_2]$), および長鎖アルキル基で置換した錯体 ($[\text{Cu}^{\text{II}}(\text{C6-sae-TTF})_2]$) の合成を行った (図 1)。これらの薄膜デバイスをクロロホルム溶液からスピコート法により作製したところ、FET として作動しなかった。また、 $[\text{Cu}^{\text{II}}(\text{Bz-sae-TTF})_2]$ のラジカル塩を作製し電気物性を評価したところ、母体となる $[\text{Cu}^{\text{II}}(\text{EDT-sae-TTF})_2]$ のラジカル塩より、高い電気伝導性を示すことを明らかにした。そこで、 $[\text{Cu}^{\text{II}}(\text{Bz-sae-TTF})_2]$ のクロロホルムへの溶解度を向上させるため、配位部位である schiff 塩基部位のフェノラートを tert-ブチル基およびメトキシ基で置換した錯体 $[\text{Cu}^{\text{II}}(\text{Bz-OMe-}t\text{Bu-sae-TTF})_2]$ を合成し、デバイスの作製と特性の評価を行った。この錯体は FET として作動するものの、 $[\text{Cu}^{\text{II}}(\text{ET-sae-TTF})_2]$ を用いたデバイスよりも特性は低かった。

(2) 多座配位可能な新規 TTF-金属錯体の開発

真空蒸着法による薄膜の作製を目的として、新たに 4 座 TTF-配位子とその Cu(II) 錯体である $[\text{Cu}^{\text{II}}(\text{EDT-bsae-TTF})]$ を合成した (図 2)。真空蒸着法による成膜を試みたが、蒸着過程で分解することが明らかとなった。Cu(II) イオンよりもスピン多重度が大きな Fe(II), Co(II), Ni(II) イオンを用いた新規 TTF-金属錯体を開発するため、新たに 3 座 TTF-配位子, EDT-H₂heip-TTF の合成を行った (図 2)。

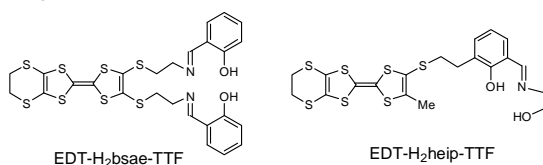


図 2. 4 座および 3 座 TTF-配位子

3 座配位子 EDT-H₂heip-TTF を用いて Co(III) 錯体および Ni(II) 錯体の合成に成功した。Co(III) 錯体は Co イオンに EDT-H₂heip-TTF が 2 分子配位子、一方の配位子中のプロトンが脱プロトン化せず、このプロトンを介した隣接する錯体と水素結合を形成していた。その結果、Co および Co に配位子した酸素原子からなる一次元鎖構造を形成し、さらにこの一次元鎖の周りを TTF がらせん状に取り囲んだ一次元チューブ型錯体を構築していた (図 3)。Co イオン周りの配位様式によりこの光学異性体が結晶中に存在し、異性体に対応して、TTF 部位が作るらせんの向きが右まわり、あるいは左回りとなっている。

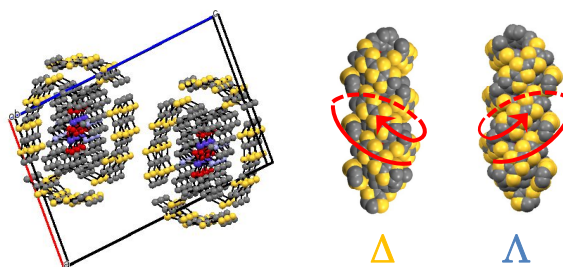


図 3. 一次元 Co(III)チューブ錯体の結晶構造 (左) とチューブ構造 (右)

一方、Ni(II) 錯体は Ni₄O₄ のキューバン型骨格を持つクラスター錯体を形成した (図 4)。磁化率の温度依存性を測定したところ、低温で $\chi_m T$ が増大し、キューブ内の Ni(II) イオン間に強磁性的相互作用が働いていることが分かった (図 5)。酸化還元電位を調べると、TTF 部位の酸化還元が維持されていた。そこでキューブ錯体をヨウ素でドーブしたところ、室温以上の温度で半導体的な挙動を示した。

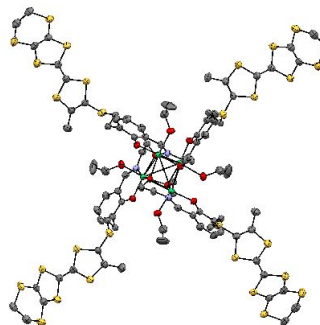


図 4. Ni(II) 4 核キューブ錯体の構造

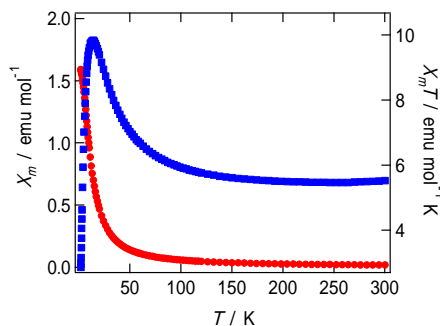


図 5. Ni(II) 4 核キューブ錯体の磁化率

(3) salphen 錯体を用いた薄膜デバイスの開発

と TTF-金属錯体における π -d 相互作用の解明 高い平面性にに基づく大きな分子間相互作用の利用を目的として、salphen 錯体を用いた薄膜デバイスの開発を行った。salphen 錯体として、Cu(II) および Ni(II) 錯体を合成した (図 6)。両錯体ともに電気化学測定から HOMO の準位が -5.2 eV と見積もられた。一般に、HOMO の準位が -5.0 eV よりも小さけ

れば、大気に対して安定な FET が得られるとされている。そこで、両錯体を用いた薄膜デバイスの作製を行った。デバイスの作製は TTF-金属錯体と異なり、真空蒸着法により行った。常磁性錯体である Cu(II)-salphen 錯体は FET 応答を示さなかったが、Ni(II)-salphen 錯体は FET として作動した(図7)。移動度は $2.4 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 、閾電圧-40.0 V、on/off 比 1.1×10^6 であり、移動度は $[\text{Cu}^{\text{II}}(\text{EDT-sae-TTF})_2]$ のデバイスに比べ、一桁大きな値を示した。このデバイスの大気安定性を評価するため、遮光下、大気中に2か月間放置したデバイスの FET 特性を測定した。その結果、移動度は $3.5 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 、閾電圧-14.4 V、on/off 比 2.0×10^5 であった。閾電圧の絶対値が小さくなっていることから、酸素による劣化が若干、間作されたが、TTF-錯体からなるデバイスが大気下ですぐに劣化することに比べ、大気中で十分に安定なデバイスの作製に成功した。

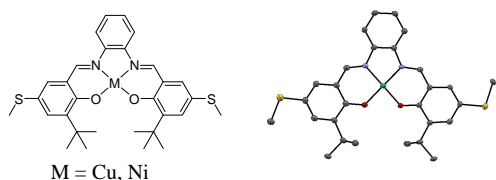


図6. salphen 錯体の分子構造(左)と Ni-salphen 錯体の結晶構造解析(右)

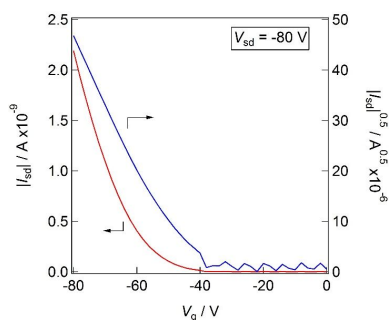
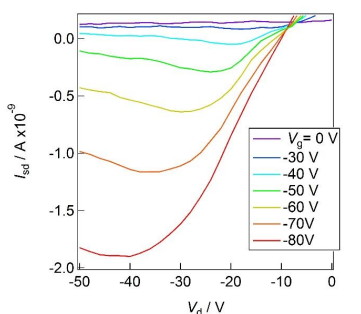


図7. Ni-salphen の FET 応答: 出力特性(上), 伝達特性(下)

TTF-金属錯体のラジカル塩 $[\text{Cu}^{\text{II}}(\text{EDT-sae-TTF})_2]\text{PF}_6$ における伝導電子と局在磁性間の相互作用の大きさを見積もるため、中性錯体およびラジカル塩の ESR 測定ならびに DFT

計算を行った。中性錯体では平面四配位 Cu(II)イオンのシグナルが観測された。銅の核スピン ($I = 3/2$) の超微細結合による4本に分裂したシグナルが観測された。このシグナルは平面四配位 Cu(II)錯体に典型的な角度依存性を示した。一方、ラジカル塩の ESR は角度依存性を示すシグナルと示さないシグナルが観測され、それぞれ Cu(II)の d-spin および TTF ダイマー上に非局在化した π -spin と帰属した(図8)。また、d-spin によるシグナルと π -spin によるシグナルの間に、非常に小さなシグナルを観測した。これは d-spin と π -spin の相互作用による交換相互作用によるシグナルであると考えられる。また、ESR の温度依存性を測定した(図9)。d-spin によるシグナルは温度依存性を示したのに対し、 π -spin によるシグナルは温度依存性を示さなかった。d-spin の g 値が増大し始める温度(100 K)は、このラジカル塩が絶縁化する温度と対応しており、このことから d-spin と π -spin の相互作用が示唆される。

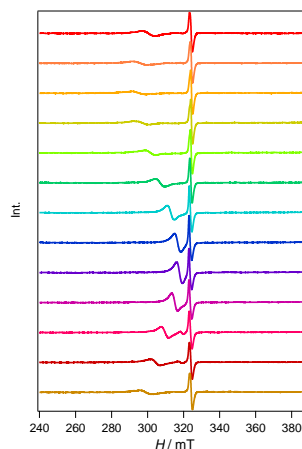


図8. $[\text{Cu}^{\text{II}}(\text{EDT-sae-TTF})_2]\text{PF}_6$ の ESR の角度依存性

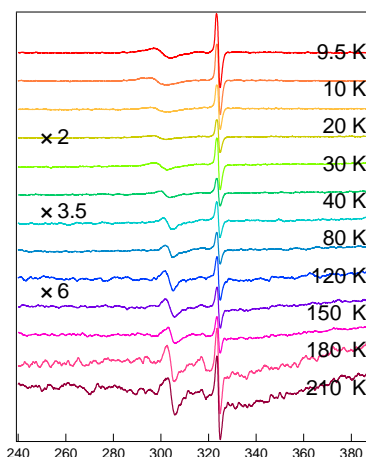


図9. $[\text{Cu}^{\text{II}}(\text{EDT-sae-TTF})_2]\text{PF}_6$ の ESR の温度依存性

カチオン錯体 $[\text{Cu}^{\text{II}}(\text{EDT-sae-TTF})_2]^+$ の分子軌道計算を DFT 法で行った。汎関数は UB3LYP, 基底関数は 6-31G*, Cu のみ LANL2DZ を用いて, triplet および singlet について計算を行った。triplet と singlet のエネルギー差はわずかであり, 若干 triplet の方が安定であった。図 10 に triplet のエネルギーダイアグラムと分子軌道パターンを示す。Cu イオン配位部位からなる SOMO と TTF ダイマーに非局在化した π 軌道からなる SOMO が存在し, Cu イオン配位部位からなる SOMO がより深いレベルに位置していた。singlet についても triplet と同様, Cu イオン配位部位からなる SOMO と TTF ダイマーに非局在化した π 軌道からなる SOMO が存在し, Cu イオン配位部位からなる SOMO がより深いレベルにあった。SOMO の分子軌道を反映し, スピン密度は Cu イオン配位部位と TTF ダイマー上に分布していた。スピン角運動量の 2 乗の値は, triplet と singlet それぞれについて妥当な値であった。d-spin と π -spin 間の友好交換相互作用の大きさを broken-symmetry 法により見積もったところ, $J = 3.9 \text{ K}$ という値が得られた。この結果, $[\text{Cu}^{\text{II}}(\text{EDT-sae-TTF})_2]^+$ における分子内の d-spin と π -spin 間の相互作用は非常に小さいと結論付けられる。このことは ESR で交換相互作用によるシグナルが非常に小さかったこととも整合している。以上, ESR および DFT 計算から, $[\text{Cu}^{\text{II}}(\text{EDT-sae-TTF})_2]^+$ では非常に小さいものの磁性と伝導性の間に相互作用が働いていることが示唆された。

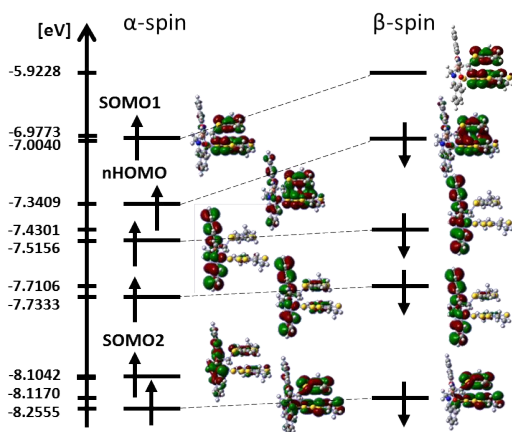


図 10. $[\text{Cu}^{\text{II}}(\text{EDT-sae-TTF})_2]^+$ の triplet の分子軌道とエネルギーダイアグラム

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 4 件)

(1) R. Fujii, Md. A. Hossain, K. Hirabayashi, T. Shimizu, K. Akiyama, K. Goto, H. Nishikawa, K-i. Yamashita, K-i. Sugiura, "Synthesis of tetra(3-thienyl)biphenylquinone and its charge transfer complex with perylene," *Asian J. Org.*

Chem., **7**, 171-178 (2018). 査読有
DOI: 10.1002/ajoc.201700560

(2) K. Mitsumoto, J. M. Cameron, R-J. Wei, H. Nishikawa, T. Shiga, M. Nihei, G. N. Newton, H. Oshio, "A multi-redox responsive cyanometalate-based metallogel," *Chemistry A European Journal*, **23**, 1502-1506 (2017). 査読有
DOI: 10.1002/chem.201605542

(3) A. Wachi, Y. Kudo, A. Kanesaka, H. Nishikawa, T. Shiga, H. Oshio, M. Chikamatsu, R. Azumi, "Organic field-effect transistor based on paramagnetic Cu(II) neutral complexes coordinated by Schiff base-type TTF ligands," *Polyhedron*, **136**, 70-73 (2017). 査読有
DOI: 10.1016/j.poly.2017.03.006

(4) H. Nishikawa, A. Wachi, M. Chikamatsu, R. Azumi, "Development of organic thin film devices based on Cu(II) complex with tetrathiafulvalene moieties in the ligands," *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, **641**, 81-85 (2016). 査読有
DOI: 10.1080/15421406.2015.1105049

〔学会発表〕(計 3 4 件)

(1) 和知敦史, 金坂青葉, 志賀拓也, 大塩寛紀, 島崎優一, 近松真之, 阿澄玲子, 西川浩之: Salphen 金属錯体を用いた薄膜トランジスタの作製と特性, 日本化学会第 98 春季年会, 2018 年 3 月 20~23 日, 日本大学理工学部船橋キャンパス(船橋).

(2) 金坂青葉, 和知敦史, 志賀拓也, 大塩寛紀, 西川浩之: シッフ塩基型 TTF-配位子を有する常磁性金属錯体の物性と電子状態, 日本化学会第 98 春季年会, 2018 年 3 月 20~23 日, 日本大学理工学部船橋キャンパス(船橋).

(3) H. Nishikawa, "Structural studies on the electronic states of molecular conductors using synchrotron radiation," *2nd International Symposium of Quantum Beam Science at Ibaraki University*, 2017 年 12 月 8~10 日, Ibaraki University (Mito, Japan).

(4) K. Hinata, T. Yamaguchi, H. Nishikawa, "Electronic structure of single-component molecular conductors – reduced metal dithiolene complexes," *2nd International Symposium of Quantum Beam Science at Ibaraki University*, 2017 年 12 月 8~10 日, Ibaraki University (Mito, Japan).

(5) S. Miyamoto, A. Wachi, A. Kanesaka, H. Nishikawa, "Structural studies of radical salts of (S,S)-DM-MeDH-TTP," *2nd International Symposium of Quantum Beam Science at Ibaraki University*, 2017 年 12 月 8~10 日, Ibaraki University (Mito, Japan).

(6) H. Nishikawa, S. Miyamoto, T. Shiga, H. Oshio, D-H. Jang, Y. Sur, K-H. Kim, K. Murata, "Insulating State of Chiral Molecular Conductor Composed of Reduced π -Donor (S,S)-DM-MeDH-TTP," *12th International Symposium on Crystalline Organic Metals, Superconductors and Magnets (ISCOM2017)*, 2017 年 9 月 24~29 日, Miyagi Zao Royal Hotel

(Miyagi, Japan).

(7) A. Wachi, Y. Kudo, A. Kanesaka, T. Shiga, H. Oshio, H. Nishikawa, “Structure and Properties of New Metal Complexes with TTF-Based Tridentate Schiff-Base Type Ligand,” *12th International Symposium on Crystalline Organic Metals, Superconductors and Magnets (ISCOM2017)*, 2017年9月24~29日, Miyagi Zao Royal Hotel (Miyagi, Japan).

(8) D-H. Jang, Y. Sur, K. Murata, S. Miyamoto, H. Nishikawa, K-H. Kim, “Anomalous Critical Exponents in the Vicinity of the Metal-Insulator Transition in Quasi-one-dimensional Organic Conductor, ((S,S)-DM-MeDH-TTP)₂AsF₆,” *12th International Symposium on Crystalline Organic Metals, Superconductors and Magnets (ISCOM2017)*, 2017年9月24~29日, Miyagi Zao Royal Hotel (Miyagi, Japan).

(9) 金坂青葉, 和知敦史, 志賀拓也, 大塩寛紀, 西川浩之: TTF-3座配位子を有するCo(III)錯体, Ni(II)錯体の構造と物性, 第11回分子科学討論会, 2017年9月15日~18日, 東北大学川内北キャンパス(仙台).

(10) 和知敦史, 志賀拓也, 大塩寛紀, 島崎優一, 近松真之, 阿澄玲子, 西川浩之: 酸化還元活性な配位子を有する常磁性金属錯体の構造と性質ならびに外部磁場応答トランジスタへの応用, 第11回分子科学討論会, 2017年9月15日~18日, 東北大学川内北キャンパス(仙台).

(11) 和知敦史, 工藤勇介, 志賀拓也, 大塩寛紀, 西川浩之: 新規 TTF-Ni(II)₄ 核キューブ錯体の構造と磁性, 日本化学会第97春季年会, 2017年3月16日~19日, 慶應義塾大学日吉キャンパス(横浜).

(12) 金坂青葉, 工藤勇介, 和知敦史, 志賀拓也, 大塩寛紀, 西川浩之: 新規 Schiff 塩基型 TTF-多座配位子による常磁性金属錯体の合成と物性, 日本化学会第97春季年会, 2017年3月16日~19日, 慶應義塾大学日吉キャンパス(横浜).

(13) 工藤勇介, 和知敦史, 西川浩之: TTF 部位を有する多座配位金属錯体の合成と性質, 第72回有機合成化学協会関東支部シンポジウム, 2016年11月26日~27日, 新潟薬科大学(新潟).

(14) 和知敦史, 志賀拓也, 大塩寛紀, 近松真之, 阿澄玲子, 西川浩之: 新規 TTF-常磁性金属錯体の構造と物性ならびに薄膜トランジスタへの応用, 第10回分子科学討論会, 2016年9月13日~15日, 神戸ファッションマート(神戸).

(15) H. Nishikawa, A. Wachi, Y. Kudo, T. Shiga, H. Oshio, “Magnetic properties of paramagnetic Cu(II) complexes with partially oxidized TTF moieties,” *The 15th International Conference on Molecular-Based Magnets (ICMM2016)*, 2016年9月4~8日, Sendai International Center (Sendai, Japan).

(16) A. Wachi, T. Shiga, H. Oshio, M. Chikamatsu, R. Azumi, H. Nishikawa, “Organic field-effect

transistor based on paramagnetic Cu(II) complexes with tetrathiafulvalene ligands,” *The 15th International Conference on Molecular-Based Magnets (ICMM2016)*, 2016年9月4~8日, Sendai International Center (Sendai, Japan).

(17) H. Nishikawa, A. Wachi, T. Shiga, H. Oshio, M. Chikamatsu, R. Azumi, “Multifunctional properties of paramagnetic metal complexes with redox-active ligands based on p-electron systems,” *Pure and Applied Chemistry International Conference (PACCON2016)*, 2016年2月9~11日, Bangkok International Trade & Exhibition Centre (Bangkok, Thailand).

(18) H. Nishikawa, T. Watanabe, Y. Yoshimura, “Synthesis and physical properties of a chiral donor with reduced π -electron system,” *The International Chemical Congress of Pacific Basin Societies 2015 (Pacifichem 2015)*, 2015年12月15日~20日, Hawaii Convention Center (Hawaii, USA).

(19) A. Wachi, M. Chikamatsu, R. Azumi, H. Nishikawa, “Organic Thin-Film Devices of TTF-Metal Complexes with Paramagnetic Cu(II) ion,” *The International Chemical Congress of Pacific Basin Societies 2015 (Pacifichem 2015)*, 2015年12月15日~20日, Hawaii Convention Center (Hawaii, USA).

〔図書〕(計 1件)

(1) J. Yamada, H. Nishikawa, “Design of conducting and superconducting organic molecules,” *Encyclopedia of Physical Organic Chemistry*, John Wiley & Sons, Inc., Vol. 3, Chapter 41, 2133-2188 (2017).

〔産業財産権〕

出願状況(計 0件)

取得状況(計 0件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://nishikawalab.sci.ibaraki.ac.jp/index2.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

西川 浩之 (NISHIKAWA, Hiroyuki)

茨城大学・理学部・教授

研究者番号: 4 0 2 6 4 5 8 5

(2) 連携研究者

近松 真之 (CHIKAMATSU, Masayuki)

産業技術総合研究所・太陽光発電工学研究

センター・研究チーム長

研究者番号: 1 0 4 1 5 7 1 3

(3) 連携研究者

志賀 拓也 (SHIGA, Takuya)

筑波大学・大学院数理物質科学研究科・助教

研究者番号: 0 0 3 7 5 4 1 1