

整理番号	- J -	報告者氏名	植村 一広
------	-------	-------	-------

研究課題名

3種類の金属が規則的に並んだ異種金属一次元多核錯体での強磁性発現

<代表研究者> 機関名： 岐阜大学 職名： 准教授 氏名： 植村 一広

<共同研究者> 機関名： 岐阜大学大学院 職名： 学生 氏名： 三宅 里果

<研究内容・成果等の要約>

d-バンドを形成する一次元鎖錯体は、古くは KCP やマグナス塩が、近年ではハロゲン架橋白金系混合原子価錯体 (MX、MMX) が対象化合物として取り扱われ、導電/磁気物性が検討されてきた。直接の金属結合を有する一次元鎖錯体は少なく、扱われる金属も限られている中、我々は、2種類の多核錯体間で、 d^2 軌道 (σ^* 軌道) における HOMO-LUMO 相互作用を利用した合理的な一次元鎖化法を開発してきた。2種類の多核錯体の組みあわせを変えて、電子 (バンド) 構造を制御でき、常磁性化も可能である。例えば、 $-Pt-Pt-Ru-Ru-Pt-Pt-$ と並んだ $[\{Ru_2(O_2CCH_3)_4\}\{Pt_2(piam)_2(NH_3)_4\}_2]_n(PF_6)_{4n} \cdot 4nH_2O$ ($piam = pivalamidate$)は Ru_2 上に 2 つの不对電子を、 $-Rh-Rh-Pt-Cu-Pt-$ と並んだ $[\{Rh_2(O_2CCH_3)_4\}\{Pt_2Cu(NH_3)_4(piam)_4\}]_n(PF_6)_{2n}$ (**1**)は Cu 上に 1 つの不对電子が局在していることを見出している。本研究では、コバルトを含む異種金属一次元鎖錯体で、コバルトの混合原子価状態を誘起し、コバルト間の二重交換相互作用を利用して、強磁性発現させることを目指した。

$cis-[Pt(NH_3)_2(piam)_2]$ と MCl_2 ($M = Mn, Fe, Co, Ni$)、 $NaPF_6$ を $MeOH/H_2O$ 溶媒中で混合すると、 $[Pt_2M(NH_3)_4(piam)_4](PF_6)_n$ ($n = 2$ or 3)の粉末が析出した。これらは、ESI-MS で三核構造をとることを確認した。 $MeCN$ 中での $[Pt_2M(NH_3)_4(piam)_4](PF_6)_n$ のサイクリックボルタンメトリーの結果、いずれも、 M の $+2 \leftrightarrow +3$ の酸化還元と考えられる可逆な酸化還元波がみられた。 $[Pt_2M(NH_3)_4(piam)_4](PF_6)_n$ の磁化率測定の結果、すべて高スピン状態で、三核構造あたり、5つ (Mn)、5つ (Fe)、3つ (Co)、2つ (Ni)の不对電子を有することもわかった。 $[Pt_2Co(NH_3)_4(piam)_4](PF_6)_2$ (**2**)の単結晶 X 線構造解析の結果、 $Pt-Co-Pt$ の並びを有する三核錯体であり、 $Pt-Co$ 間距離は $2.6339(8) \text{ \AA}$ であった。次に、**2**と $[Rh_2(O_2CCH_3)_4]$ を $EtOH$ 中で混合し、ゆっくり蒸発させると、茶色単結晶の $[\{Rh_2(O_2CCH_3)_4\}\{Pt_2Co(NH_3)_4(piam)_4\}]_n(PF_6)_{2n}$ (**3**)が析出した。**3**は、 $-Rh-Rh-Pt-Co-Pt-$ と並んだ一次元鎖錯体であった。 $Rh-Pt = 2.8415(15), 2.8388(15) \text{ \AA}$ の非架橋金属結合を有し、 $Pt-Co$ 間距離は $2.6271(19), 2.6202(19) \text{ \AA}$ であった。2つの金属錯体が $face-to-face$ で連結し、ストレートな一次元骨格を有していた。組成、XPS、ESR から、金属酸化状態は $-Rh(+2)-Rh(+2)-Pt(+2)-Co(+2)-Pt(+2)-$ と考えられる。**2**と**3**の磁化率測定の結果、**2**は、 300 K での χT が $2.46 \text{ cm}^3 \text{ K mol}^{-1}$ で、不对電子3つのスピンオンリー値 ($1.875 \text{ cm}^3 \text{ K mol}^{-1}$) よりも大きく、低温になるにつれ、ゼロ磁場分裂の寄与のため、 χT が減少することがわかった。また、**3**は、 300 K の χT が $3.75 \text{ cm}^3 \text{ K mol}^{-1}$ とさらに大きく、同様に、低温になるにつれ、 χT が減少した。ゼロ磁場分裂を考慮した式でフィッティングした結果、 $J = -22.2 \text{ cm}^{-1}$ の大きさで異種金属結合を介して反強磁性的相互作用が働くこと、および、バンド構造由来のパウリ常磁性があることがわかった。

<研究発表（口頭、ポスター、誌上別）>

• 口頭発表

三核錯体元素ブロックが規則的に並んだ常磁性一次元鎖の合成と磁性
植村一広, 三宅里果 第68回高分子討論会 2019.9.25-27 福井大学

Syntheses, Crystal Structures, and Magnetic Behaviors of Heterometallic One-dimensional Chains Regularly Aligned as -Rh-Rh-Pt-M-Pt-

植村一広, 三宅里果 第69回錯体化学討論会 2019.9.21-23 名古屋大学

• 学術誌

Paramagnetic One-Dimensional Chain Complex Consisting of Three Kinds of Metallic Species Showing Magnetic Interaction through Metal-Metal Bonds

K. Uemura, R. Miyake

Inorg. Chem., **2020**, in press. [DOI: 10.1021/acs.inorgchem.9b02844]

<研究の目的、経過、結果、考察（5000 字程度、中間報告は 2000 字程度）>

[研究の目的と経過]

ハードディスクの大容量化・小型化に大きな役割を果たしている巨大磁気抵抗は、磁石を強磁性体の物質に近づけると、電気抵抗が大きくなる効果である。強磁性体は無機物では広く見られるが、有機物や金属錯体でも活発に合成研究が推進され、1991 年に、*p*-ニトロフェニルニトロニトロキシド (*p*-NPNN) が極低温で強磁性体になることが報告された。1993 年に、単分子で磁石になるマンガン 12 核錯体が報告され、強磁性体のサイズを分子レベルまで小さくできる可能性が見出された。一般に、強磁性体はドメイン (磁区) 内の電子スピンのすべてが平行に揃う磁氣的秩序状態をもつことで自発磁化を持つ磁石となるが、そのサイズがドメイン以下になると、スピンの方向は乱れた状態となり、磁石になりえない。ゆえに、単分子自体が強磁性体になることは、磁石の小型化という点で、非常に大きな意味をもつ。しかし、単分子磁石内の磁気異方性を維持できる温度は低く、磁気が反転しないための高い活性化障壁エネルギーを有する、新しい分子系が探索されている。本研究では、新たな単分子磁石の系として、金属結合を有する異種金属一次元鎖錯体を提案する。具体的には、混合原子価状態を有するコバルト間の二重交換相互作用 (電子移動に基づく強磁性整列エネルギーの安定化) を利用して、強磁性を発現させることを目指した。

我々は、これまでに白金 HOMO の d^2 軌道 (σ^* 軌道) と、ロジウム LUMO の d^2 軌道 (σ^* 軌道) との HOMO-LUMO 相互作用を用いて、幾つかの異種金属一次元多核錯体を合成してきた。例えば、白金-銅三核錯体とロジウム複核錯体から、 $-\text{Rh}-\text{Rh}-\text{Pt}-\text{Cu}-\text{Pt}-$ と 3 種類の金属が規則的に並んだ常磁性の一次元鎖錯体の $[\{\text{Pt}_2\text{Cu}(\text{piam})_4(\text{NH}_3)_4\}\{\text{Rh}_2(\text{O}_2\text{CCH}_3)_4\}]_n(\text{PF}_6)_{2n}$ (**1**, $\text{piam} = \text{pivalamidate}$) の合成に成功している。この一次元鎖錯体は、第一周期金属である銅を組み込み、銅上に 1 つの不对スピンを有している。同様の方法を用いて、 $-\text{Rh}-\text{Rh}-\text{Pt}-\text{M}-\text{Pt}-$ ($\text{M} =$ 第一遷移金属) と、不对スピンを多く有する異種金属一次元鎖錯体を合成できるのではないかと考えた。今回、第一遷移金属に、コバルトを選び、 $\text{Co}(+2)$ と $\text{Co}(+3)$ の混合原子価状態を発現させることを狙った。混合原子価状態にある $\text{Co}(+2) \leftrightarrow \text{Co}(+3)$ 間で、 $\text{Co}(+2)$ から $\text{Co}(+3)$ へ電子移動する際、パウリの排他律のため、反強磁性的よりも強磁性的の方が有利に整列すると考えられる。また、強磁性を実現することで、高い活性化障壁エネルギーをもつ単分子磁石の実現を期待した。

[結果と考察]

(1) 白金-コバルト三核錯体の合成と物性評価

アンモニア (NH_3) とアミダート配位子 (NHCOR) が、2 つずつ配位した白金単核錯体と、コバルト塩 (CoX_2) を混合して、 $\text{Pt}-\text{Co}-\text{Pt}$ と並んだ白金-コバルト三核錯体を合成した。具体的には、 $\text{cis}-[\text{Pt}(\text{piam})_2(\text{NH}_3)_2]$ (0.17 g, 0.40 mmol) と水溶液 (3 mL) に、 CoCl_2 (0.026 mg, 0.20 mmol) と NaPF_6 (0.067 g, 0.40 mmol) の水溶液 (1 mL) を加えて、薄紫色粉末の $[\text{Pt}_2\text{Co}(\text{piam})_2(\text{NH}_3)_2](\text{PF}_6)_2$ (**2**, 0.19 g, 0.16 mmol) を得た (収率 79%)。単結晶 X 線構造解析の結果、**2** は、 $\text{Pt}-\text{Co}-\text{Pt}$ の三核錯体を形成していた。Pt には、2 つの NH_3 と 2 つの piam の N 原子が配位し、Co には 4 つの piam の O 原子が配位し、上下から Pt がサンドイッチした構造を形成していた。金属間距離は $\text{Pt}-\text{Co} = 2.6339(8) \text{ \AA}$ であった。Pt と各 N 原子との距離は、 $\text{Pt}-\text{N}_{\text{NH}_3} = 2.035(11)$, $2.062(10) \text{ \AA}$ であり、 $\text{Pt}-\text{N}_{\text{piam}} = 1.966(10)$, $2.004(9) \text{ \AA}$ であった。Co と各 O 原子との距離は、 $\text{Co}-\text{O}_{\text{piam}} = 2.037(6)$, $2.019(7) \text{ \AA}$ であった。組成から $\text{Pt}-\text{Co}-\text{Pt}$ の合計金属酸化数は +6 であり、金属の酸化数は 2 価と考えられる。

2 の MeOH、EtOH、MeCN、THF 中での紫外可視吸収スペクトルの結果、いずれも、228 nm と 278 nm に吸収ピークがみられた。また、MeOH、EtOH、MeCN、THF、 Me_2CO 中と、固体での 77K での ESR 測定の結果を、いずれも、 $g_{\perp} = 4$, $g_{\parallel} = 2$ の軸対称シグナルを示した。このシグナルはコバルト由来で、ハイスピン状態であることがわかった。つまり、**2** は、 $\text{Pt}(+2)-\text{Co}(+2)-\text{Pt}(+2)$ の酸化状態で、 $\text{Co}(+2)$ はハイスピンで、3 つの不对スピンを有すると考えられる。

次に、**2** を、MeCN 中のサイクリックボルタンメトリーを測定したところ、 $E_{1/2} = 0.50 \text{ V (vs. Fc/Fc}^+)$ に、可逆な酸化還元波がみられた。可逆性を考慮すると、**2** は三核構造を維持しながら、酸化可能であり、ハイスピン状態を維持しながら、 $\text{Co(}+2) \leftrightarrow \text{Co(}+3)$ の酸化還元が可能と考えられる。そこで、**2** の酸化を試みた。酸化剤には、 KMnO_4 、 $[\text{Fe}(\text{C}_5\text{H}_5)_2]\text{PF}_6$ 、 H_2O_2 、 $\text{Ce}(\text{NH}_4)_2(\text{NO}_3)_6$ 、 AgPF_6 を用いた。**2** と KMnO_4 を MeOH 中で混合すると、紫色粉末が茶色粉末と変色した。この茶色粉末を ESI-MS 測定したが、解析することはできなかった。次に、**2** と $[\text{Fe}(\text{C}_5\text{H}_5)_2]\text{PF}_6$ を $\text{H}_2\text{O/MeOH}$ 混合溶媒中で混合すると、緑色溶液となったが、酸化剤との分離が困難であった。**2** と H_2O_2 を、MeCN もしくは THF 中で混合すると、ピンク色溶液となった。ESI-MS 測定で、 $m/z = 948$ に、 $\{[\text{PtCoPt}(\text{NH}_3)_4(\text{piam})_4] \cdot \text{MeOH} \cdot 2\text{H}_2\text{O}\}^+$ 由来のピークが観測されたが、期待した $\{[\text{PtCoPt}(\text{NH}_3)_4(\text{piam})_4](\text{PF}_6)_2\}^+$ ($m/z = 1207$) はみられなかった。**2** と $\text{Ce}(\text{NH}_4)_2(\text{NO}_3)_6$ を $\text{MeOH/CH}_2\text{Cl}_2$ 混合溶媒中で混合すると、溶液の色に変化が見られたが、紫外可視吸収スペクトルを用いて追跡した結果、酸化していないと判断した。**2** と AgPF_6 を MeCN 中で混合すると、1 日後、白色粉末がごく少量得られたのみで、溶液の色に変化はなく、特に酸化は進行していないと考えられる。

そこで、**2** の電解酸化の検討をした。陽極と陰極をイオン交換膜で仕切られた H 管を準備し、陽極側に Bu_4NPF_6 (0.09 mmol) と **2** (27 μmol) の MeCN 溶液 (9 mL) を、陰極側に Bu_4NPF_6 (0.09 mmol) の MeCN (9 mL) 溶液を入れ、2.0 μA で 2 日間、4.0 μA で 4 日間電解した。溶液の色が、薄青色から濃橙色に変化した。この濃橙色溶液を乾固し、塩化メチレンで洗浄して、橙色粉末の $[\text{Pt}_2\text{Co}(\text{piam})_2(\text{NH}_3)_2](\text{PF}_6)_3$ (**2+**) を得た。**2+** を、MeOH、EtOH、THF に溶解させると、黄色溶液となるが、MeOH と EtOH では数分後に、THF では数時間後に無色透明溶液となった。これらの無色透明溶液の紫外可視吸収スペクトルの結果、228 nm と 278 nm に吸収ピークがみられ、**2** のスペクトルと類似していた。一方、 Me_2CO もしくは MeCN に溶解させても黄色溶液となるが、溶液の色が維持した。 Me_2CO もしくは MeCN 溶液の紫外可視吸収スペクトルの結果、 Me_2CO では 445 nm、MeCN では 432 nm に、**2** にはみられない新しい吸収がみられた。続いて、MeCN 黄色溶液の ESI-MS 測定をすると、 $m/z = 242$ に Bu_4N^+ 、 $m/z = 629$ に $(\text{Bu}_4\text{NPF}_6)\text{Bu}_4\text{N}^+$ 、 $m/z = 916$ に $\{[\text{Pt}_2\text{Co}(\text{NH}_3)_4(\text{piam})_4]\}^+$ に相当するピークが確認できたが、期待した $\{[\text{Pt}_2\text{Co}(\text{NH}_3)_4(\text{piam})_4](\text{PF}_6)_2\}^+$ ($m/z = 1207$) は観測されなかった。さらに、**2+** の固体、77 K での ESR 測定の結果、 $g = 4.25$ と $g = 1.97$ に等方的シグナルを観測した。これらを総合して考察すると、**2** の電解酸化の結果、部分的には **2+** は生成しているものの、溶液中で容易に還元し、**2** となると考えられる。

(2) コバルトを含む異種金属一次元鎖錯体の合成と結晶構造

2 と酢酸ロジウム ($[\text{Rh}_2(\text{O}_2\text{CCH}_3)_4]$) を用いて一次元鎖化を検討した。**2** : 酢酸ロジウム : $\text{NaPF}_6 = 1 : 1 : 5$ の割合で、MeOH、EtOH、 Me_2CO 、THF、MeCN の 5 種類の溶媒中で混合し、内径 8 mm、長さ 20 cm のガラス管に入れ、ゆっくり蒸発させた。EtOH から黄色結晶の $\{[\text{Pt}_2\text{Co}(\text{piam})_4(\text{NH}_3)_4]\}[\text{Rh}_2(\text{O}_2\text{CCH}_3)_4]_n(\text{PF}_6)_{2n}$ (**3**) が、THF 溶液を 40 $^\circ\text{C}$ で加熱しながら蒸発させると、別の緑色結晶が得られた。また、**2** の代わりに **2+** を用いると、結晶化前に溶液中で三核錯体が還元する様子が観察された。

3 の単結晶 X 線構造解析の結果、2 つの金属錯体が非架橋で金属結合し、 $-\text{Rh}-\text{Rh}-\text{Pt}-\text{Co}-\text{Pt}-$ と並んだ一次元鎖錯体であった。金属間距離は、 $\text{Rh}-\text{Rh} = 2.3880(18) \text{ \AA}$ 、 $\text{Pt}-\text{Rh} = 2.8415(15)$ 、 $2.8388(15) \text{ \AA}$ 、 $\text{Pt}-\text{Co} = 2.6271(19)$ 、 $2.6202(19) \text{ \AA}$ であり、配位距離は、 $\text{Pt}-\text{N}_{\text{NH}_3} = 2.063(7)$ 、 $2.056(8) \text{ \AA}$ 、 $\text{Pt}-\text{N}_{\text{piam}} = 2.015(13)$ 、 $2.059(13) \text{ \AA}$ 、 $\text{Co}-\text{O} = 2.024(9)$ 、 $2.070(9)$ 、 $2.039(9)$ 、 $2.036(9) \text{ \AA}$ であった。また、 $\angle \text{Rh}-\text{Rh}-\text{Pt} = 179.08(5)^\circ$ 、 $\angle \text{Pt}-\text{Co}-\text{Pt} = 180^\circ$ であり、 $\text{O}-\text{Rh}-\text{Pt}-\text{N}$ の二面角は 2.1° と、face-to-face でつながっていた。結晶構造の組成から、 $\text{Rh}-\text{Rh}-\text{Pt}-\text{Co}-\text{Pt}$ の合計金属酸化数は +10 であった。金属酸化数を見積もる BVS 法で、コバルトの酸化数を見積もったところ、**2** は 1.76、**3** は 1.71 となった。**2** 中のコバルトは $\text{Co}(+2)$ であることを考慮すると、**3** 中のコバルトも $\text{Co}(+2)$ であり、**3** は $-\text{Rh}(+2)-\text{Rh}(+2)-\text{Pt}(+2)-\text{Co}(+2)-\text{Pt}(+2)-$ の酸化状態をとることが考えられる。

(3) コバルトを含む異種金属一次元鎖錯体の物性評価

3 の電子構造を明らかにするために、種々の物性測定をした。**2** と **3** の XPS 測定をしたところ、**2**: $\text{Co } 2p_{3/2} = 780.7$ 、 785.0 eV 、 $\text{Co } 2p_{1/2} = 796.4$ 、 801.6 eV 、**3**: $\text{Co } 2p_{3/2} = 780.7$ 、 785.2 eV 、 $\text{Co } 2p_{1/2} = 796.3$ 、

801.1 eV にピークがみられた。2 と 3 とともに、Co(+2)の値に近く、+5 eV のブロードなサテライトピークを示すことから、Co(+2) ハイ-spin状態であることがわかった。また、ロジウム部位では、3: Rh 3d_{5/2} = 308.9 eV, Rh 3d_{3/2} = 313.7 eV と Rh(+2)の酢酸ロジウムに近く、白金部位では、2: Pt 4f_{7/2} = 73.4 eV, Pt 4f_{5/2} = 76.7 eV, 3: Pt 4f_{7/2} = 73.4 eV, Pt 4f_{5/2} = 76.7 eV と、いずれも Pt(+2)に近い値であった。3 の固体での 77K ESR 測定の結果、Co(+2) ハイ-spin状態に特徴的な、 $g_{\perp} = 4.16$, $g_{\parallel} = 1.87$ の軸対称シグナルを示した。以上より、-Rh(+2)-Rh(+2)-Pt(+2)-Co(+2)-Pt(+2)-の酸化状態をもつ 3 中のコバルトはハイ-spin状態で、3 つの不对spinがコバルト上にあることがわかった。

次に、1 と 3 の拡散反射スペクトルを測定した。いずれも、3 つの特徴的な吸収 (E_1 , E_2 , E_3) がみられた。1: $E_1 = 3.26, 2.85$ (sh) eV, $E_2 = 1.65$ eV, $E_3 = 1.35$ eV, 3: $E_1 = 3.51, 2.90$ (sh) eV, $E_2 = 1.76$ eV, $E_3 = 1.55$ eV。-Rh(+2)-Rh(+2)-Pt(+2)-Co(+2)-Pt(+2)-の構造と酸化状態を用いて、簡易的な電子構造を考えると、白金複核錯体とロジウム複核錯体の一次元構造にコバルトが挿入したモデルをたてることができる。すなわち、白金複核錯体の埋まった σ^* (dz^2) 軌道と、ロジウム複核錯体の空いた σ^* (dz^2) 軌道が重なり合い、 σ 性の価電子帯と伝導帯を形成すると考えられる。このバンド間に、ロジウム複核錯体 HOMO の π^* 軌道と、コバルト d 軌道が挿入した形となる。 E_1 は価電子帯から伝導帯への遷移 (バンドギャップ) に相当し、 E_2 と E_3 は Rh π^* 軌道から伝導帯への遷移に相当すると考えられる。1 と 3 を比較すると、 E_1 は、ほぼ同じで、バンドギャップが変わらないことがわかった。また、 E_1 にショルダーピークがみられ、確かにバンド構造を形成していることもわかった。 E_2 と E_3 では、3の方が 0.1 eV ほど大きくなり、3 の E_2 の強度が著しく減少していた。これは、face-to-face で連なった一次元構造のためと考えられ、 σ 性だけでなく、 π 性のバンドも形成されているためだと、現在のところ考えている。

次に、[Pt₂Cu(piam)₄(NH₃)₄](PF₆)₂、1、2、3 の常温から極低温までの磁化率測定をした。[Pt₂Cu(piam)₄(NH₃)₄](PF₆)₂ は、300 K で $\chi T = 0.45$ cm³ K mol⁻¹ で極低温まで一定であった。1 は、300 K で $\chi T = 0.42$ cm³ K mol⁻¹ で、10 K で徐々に小さくなり、2 K で 0.34 cm³ K mol⁻¹ となった。一方、2 では、300 K で $\chi T = 2.46$ cm³ K mol⁻¹ で、100 K 以下で徐々に小さくなり、2 K で 1.5 cm³ K mol⁻¹ となった。3 では、300 K で $\chi T = 3.75$ cm³ K mol⁻¹ で、極低温になるにつれて小さくなり、2 K で 0.27 cm³ K mol⁻¹ となった。[Pt₂Cu(piam)₄(NH₃)₄](PF₆)₂ と 1 の常温での χT 値は、 $S = 1/2$ に近く、Cu dx^2-y^2 スピンと考えられる。1 の磁化率曲線に対し、ボナー・フィッシャーモデルを用いて、フィッティングしたところ、 $J = -0.47$ cm⁻¹, $g = 2.11$, $C_{\text{imp}} = 1.00 \times 10^{-4}$ cm³ mol⁻¹ の値を得ることができ、隣接銅間で弱い反強磁性的相互作用があることがわかった。2 と 3 の常温での χT 値は、 $S = 3/2$ に近く、Co dx^2-y^2 , dz^2 , dxz (dyz) スピンと考えられる。2 の結晶構造ではコバルトは隣接分子と際立った相互作用をしていないことから、 χT 値の極低温での減少はゼロ磁場分裂の寄与と考えられる。ゼロ磁場分裂を考慮した式でフィッティングしたところ、z 方向の異方性ゼロ磁場分裂パラメータ $|D| = 44$ cm⁻¹ の値を得た。この D の大きさは、過去の文献値ともよく一致しており、フィッティングが良好であることもわかった。続いて、3 をいくつかのモデルでフィッティングした。最も良好だったのは、ゼロ磁場分裂を考慮した一次元系のモデルで、 $g = 2.98$, $|D| = 73$ cm⁻¹, $zJ = -22.2$ cm⁻¹, TIP (温度に依存しない磁化率) = 2.76×10^{-3} cm³ mol⁻¹, P (不純物) = 1.02×10^{-4} の値を得た。特徴的なのは、 zJ と TIP が大きい点で、一次元鎖内でコバルトが隣接コバルトと比較的強く反強磁性的相互作用していることがわかった。また、TIP が大きいのは、バンドを形成しているためで、バンドに磁場を与えることで生じる、温度依存性の無いパウリ常磁性と考えている。一次元鎖内のコバルト間距離は約 13.3 Å と長く、長い距離でも比較的強い磁気相互作用が発現するのは、金属-金属結合を介しての相互作用のためと考えられる。

当初の目的である強磁性発現は、現在のところ達成できていないが、-Pt-Rh-Rh-Pt-を介した磁気相互作用が比較的強いことがわかった。今後、3 中のコバルトを部分的に酸化し、-Rh-Rh-Pt-Co(+2)-Pt-Rh-Rh-Pt-Co(+3)-Pt-と並んだ異種金属一次元鎖錯体の合成を引き続き試みる予定である。また、二重交換相互作用に限らず、2 種類の常磁性種を組み込んで、フェリ磁性的に強磁性化も狙っている。さらに、マンガン、鉄、ニッケルでも検討中であり、マンガンを用いて -Rh-Rh-Pt-Mn-Pt-と並んだ一次元鎖錯体の合成に成功し、同様に強磁性発現を目指している。