

機関番号：14301

研究種目：学術創成研究費

研究期間：2006 年度 ～ 2010 年度

課題番号：18GS0208

研究課題名（和文）

動的相スイッチ機構を内在する有機電子材料の開拓と非平衡物性科学への展開

研究課題名（英文）

Exploitation of Organic Electronic Materials of Potential Dynamic Switches  
for Non-equilibrium Condensed Matter Sciences

研究代表者 田中 耕一郎 (TANAKA KOICHIRO)

京都大学・物質—細胞統合システム拠点・教授

研究者番号：90212034

研究成果の概要（和文）：

電子機能が光照射等の外部刺激により変化する有機電子材料を対象とし、その変化の動的過程と生成された終状態あるいは準安定状態を解明した。新規なテラヘルツ分光法を開発するとともに幾つかの新規相転移物質の開拓に成功した。スピントスオーバー錯体や(EDO-TTF)<sub>2</sub>PF<sub>6</sub>において、光誘起相転移における電子状態変化に加えて格子振動や結晶構造の時間変化を観測する「統合的動的構造解明」をすすめた結果、新たな構造や新奇な動的過程を発見した。これらには共通して複数の隠れた秩序が関与していることが明らかになった。この事実をもとに、非平衡ダイナミクスを記述可能な数理モデルの構築をおこなった。

研究成果の概要（英文）：

We have explored organic materials that show dynamic switching phenomena in electronic properties by light irradiation. Non-equilibrium dynamics of quasi-equilibrium states has been studied by time-resolved spectroscopies and time-resolved X-ray diffraction techniques. Especially, novel light sources and experimental techniques have been developed in terahertz frequency region. In spin-crossover complexes and (EDO-TTF)<sub>2</sub>PF<sub>6</sub>, we found that hidden symmetry breaking should take place in the dynamical process. A simple phenomenological model was proposed to describe non-equilibrium dynamics.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006 年度	91,100,000	27,330,000	118,430,000
2007 年度	91,700,000	27,510,000	119,210,000
2008 年度	92,000,000	27,600,000	119,600,000
2009 年度	84,100,000	25,230,000	109,330,000
2010 年度	56,300,000	16,890,000	73,190,000
総計	415,200,000	124,560,000	539,760,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・物性 I

キーワード：非平衡物性科学、テラヘルツ、有機電子材料、光誘起相転移

## 1. 研究開始当初の背景

有機電子材料をもちいた物性研究の特徴は、有機分子の多様性と柔軟性を活かした数多くの物質群を相手にすることが可能な点であり、それを利用して結晶構造と電子・スピン状態の相関や秩序形成、機能発現機構が研究されてきた。これら有機電子材料の示す相転移現象は、電子の遍歴性、電子相関、電

子格子相互作用、電子スピン相互作用などの相互作用の競合の結果として現れるものである。したがって、相転移現象の本質を知り、合目的的な相転移物質を開拓するためには、基底状態と励起状態の関係およびその動的過程の理解が不可欠である。

## 2. 研究の目的

本研究では、電子機能が光照射等の外部

刺激により変化する相転移物質、すなわち、動的相スイッチ機構を内在する有機電子材料を対象とし、その転移の動的過程と生成される終状態あるいは準安定状態の本質を解明することを目的とする。最終的には“非平衡物性科学”と呼ぶべき研究分野の創成を目指す。特に、相転移過程における電子状態の時間変化のみならず、格子振動や結晶構造の時間発展を観測することにより、統合的に動的過程を研究することを特色とする。さらに、既知物質のみならず新規相転移物質を同時に開拓する。

### 3. 研究の方法

本研究では「**統合的動的構造解明**」を一つの柱に掲げている。これは、動的な構造変化が生じる現象に対し、様々な時間スケールや周波数スケールで実験を行うものである。京都大学グループでは、秒より長い時間領域で赤外時間分解分光+可視反射分光+時間分割X線回折+磁気測定を組み合わせた実験をスピントロスオーバー錯体系に進めた。さらに、新規なテラヘルツ時間分解分光法を開発した。東工大グループは、X線時間分解構造解析装置を完成させ、その利点を分子性伝導体等の固体試料に加えて蛋白結晶等でも実証した。これらの**統合的動的構造解明手法**により、隠れた秩序状態の出現が果たす役割を実証した。

試料合成グループは新規材料開拓を大きな目標にかかげている。京大グループでは(EDO-TTF)<sub>2</sub>PF<sub>6</sub>の持つ多重不安定性の本質を解析するために、同形構造を持つ錯体を開拓した。また、同等のπ電子骨格を持つ化合物を用いた新規相転移物質の開拓を行った。愛媛大グループでは、バンド巾の制御と分子内電荷秩序状態の実現を目指し、ジチアジセレンペンタレン(STP)系分子導体の開拓を行った。また、光誘起相転移を示す新規な分子としてビニローグ骨格で拡張されたDMEDO-EBDT導体の開拓も併せて行った。

これらを通じて、動的相スイッチ機構の解明および材料科学としての設計指針を確立する端緒を得た。

### 4. 研究成果

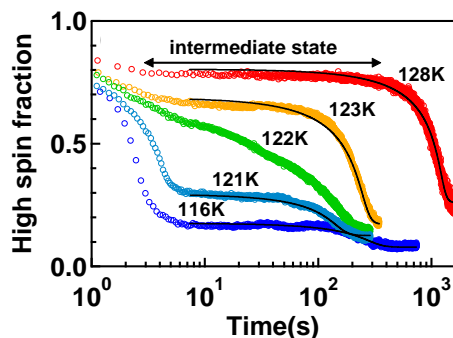
この5年間で格段の進展が得られた代表的な成果は以下の通りである。

#### ① 複数の秩序が絡み合ったスピントロスオーバー錯体の動的緩和過程を解明 (田中)

複数の秩序をもつスピントロスオーバー錯体に対して、複数の秩序の動的変化に着目して温度相転移と光誘起相転移の実験をおこなった。その結果、①光誘起相転移においては熱的相転移には現れない状態が出現する場合があること、②2つの秩序が同時に変化する熱的相転移をもつ物質でも光誘起相転移によって得られた準安定状態からの緩和では2つの秩序が時間的に分離して転移が生じること、を明らかにした(発表論文 T2、

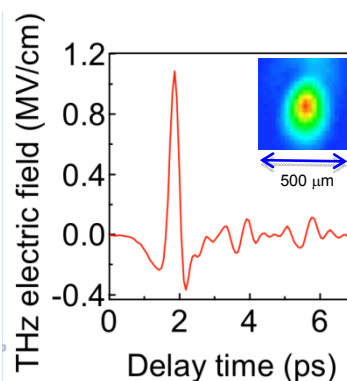
T12、T13、T20)。図は Fe(ptz)<sub>6</sub>(BF<sub>4</sub>)<sub>2</sub> の光誘起相転移で得られた高温相からの緩和過程を表しており、スピンと構造の変化が時間的に分離しておくるために2段階の緩和をしている(発表論文 T12)。このような秩序変数の分離観測は、非平衡相転移の特徴を表すものであり、2つの擬イジングスピンをもちいた現象論的数理モデルの構築に至った(発表論文 T18)。

#### ② EDO-TTF 系における光誘起の動的相スイッチ機構の全貌解明 (田中、腰原、矢持)



(EDO-TTF)<sub>2</sub>PF<sub>6</sub> の絶縁相にフェムト秒レーザー照射をおこなうと高速で巨大な反射率変化が生じる。時間分解測定を精密化するとともにテラヘルツ分光やピコ秒領域からマイクロ秒にいたる赤外分光をおこなった。その結果、当初の予想と異なり電荷移動遷移の光励起により、低温の電荷秩序状態とも高温の金属相とも異なる別の電荷秩序状態が 100 フェムト秒程度の短い時間であらわれることがわかった。この結果は、1 ピコ秒以下の時間領域で光誘起特有の相の存在及びダイナミクスを明らかにした最初の例となった(発表論文 K2、K6)。

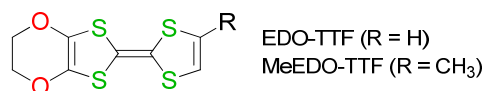
#### ③ テラヘルツ技術の新展開 (田中)



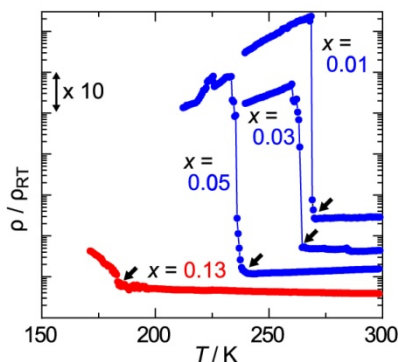
光誘起相に敏感なテラヘルツ領域の線形・非線形光学応答に資する全反射分光法(発表論文 T14、T15、T16)や新しい原理の高出力テラヘルツ電磁波発生法を提案した(発表論文 T1、T5、T8、T9)。光整流過程によって放出されたテラヘルツ電場

が励起光パルスを変調し、それによって励起光がパルス圧縮することによって発生するテラヘルツ波が高強度広帯域化する。実際に、チタンサファイヤレーザーを用いて、出力テラヘルツ光電場強度が  $1.2\text{MV/cm}$ 、量子効率が  $70\%$  に達する高強度高効率テラヘルツ波発生を実験的に示した(図)。また、この電場をもちいて分子性結晶での振動コントロールが可能なこと、半導体においては非摂動論的な非線形光学現象を誘起可能なことを実証した(発表論文 T3、T4、T7)。

④ (EDO-TTF)<sub>2</sub>PF<sub>6</sub> の多重不安定性の本質的理解に向けた物質開拓 (矢持)



上記②にその動的挙動について述べた標題物質は、室温直下の約  $280\text{K}$  で金属-絶縁体 (MI) 転移を起す(発表論文 Y4)。Peierls 転移、陰イオンの秩序-無秩序 (OD) 転移、電荷秩序化 (CO) 転移の機構が協同してこの転移を引き起こしていると考えられている。この多重不安定性の本質を知る為、後述⑨の冒頭に記した研究と共に、MeEDO-TTF でドナー層の一部を置換した混晶、[(MeEDO-TTF)<sub>1-x</sub>(EDO-TTF)<sub>x</sub>]<sub>2</sub>PF<sub>6</sub> を検討した(発表論文 Y3)。x ≤ 0.55 の組成範囲で元の錯体(x = 0)と同形構造の単結晶が得られ、x の増大に対して伝導層の面積はほぼ一定に保たれながら厚さが増す事が判った。比抵抗の温度変化からは、x の増加に伴い MI 転移温度が低下し、x が 0.13 を超えると明瞭な転移が観測されなくなった(図中に矢印で示した MI 転移温度以下では結晶に割れが生じ、比抵抗値が正確には測定できていない)。結晶構造、磁性、及び、分光学的性質の温度変化を検討し、x ≤ 0.05 の混晶では元の錯体と同様に 3 種の不安定性要因が協同した MI 転移が起きている事が判った。一方、x = 0.13 の場合は 190 K で CO 不安定性が発現しないまま超格子が出現し MI 転移が起きる事が判った。即ち、標題錯体の多重不安定性を構成する複数の要因を選択的に抑制できることが判った。また、CO 不安定性の寄与が伝導層と陰イオンの距離に依存する事が強く示唆された。

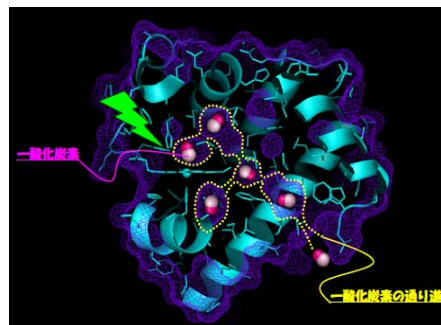


⑤ EDO-TTF 類縁化合物に基づく新規有機電子材料の探索 (矢持)

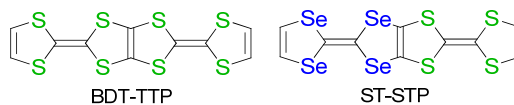
EDO-TTF の類縁化合物を用いた新規相転移物質の開拓を行った。そのひとつ MeEDO-TTF からは、EDO-TTF 錯体では実現出来なかった、極低温まで金属状態を保つ錯体(発表論文 Y10)や、室温直上で電荷不均化の時間的な揺らぎが変化する半導体-半導体転移を起す錯体を得た(発表論文 Y8)。

⑥ 複雑分子系における協同的構造変形が果たす生体機能の解明 (腰原)

各種固体中における電子-構造間の協同的相互作用が、光励起のエネルギー緩和過程で果たす役割は、近年の集中的研究で徐々に明らかとなっている。一方で蛋白質分子の貯蔵、輸送機能にも同様の相互作用の果たす役割の可能性が指摘されてきたが、その実証的研究は皆無であった。特に筋肉内でのガス分子貯蔵・輸送に關与する蛋白質ミオグロビンに關して、酸素等のガス分子が蛋白分子内のガス分子結合サイトと外界との間で、光刺激をきっかけとしてどのようにやり取りされるのかは、ミオグロビン研究者の半世紀にわたる謎とされてきた。我々は時間分解X線結晶構造解析法により、鉄に結合した一酸化炭素分子(酸素分子のモデル)が、蛋白質分子内の疎水性キャビティーの間を飛び移る様子を集中的に検討した。そしてこの分子内ガス分子の移動に際して、疎水性キャビティーの構造自体が、蛋白分子内部から外部に向かって協働的に順序良く歪むことによって、次のキャビティーへの通路を開けている様子を捕らえることに初めて成功した。これによって蛋白質内部の疎水性キャビティーが有する協同的ダイナミックスの役割について明らかにすることができた(発表論文 K3、K5)。



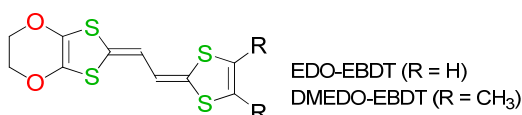
⑦ 分子内電荷秩序を示す分子性半導体の開拓 (御崎)



分子性半導体のバンド幅をチューニングし、電気物性を制御することを目的として BDT-TTP 骨格内の硫黄原子の一部をセレン

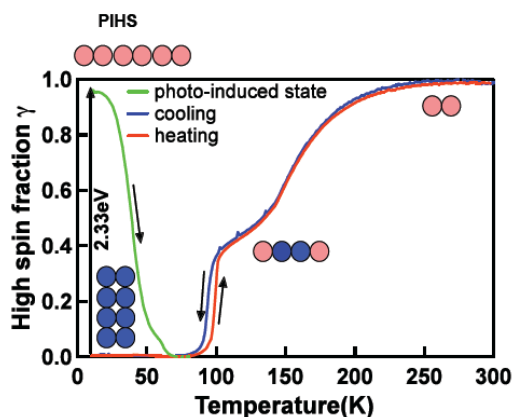
ン原子に置き換えたジセレナジチアペンタレン(STP)系ドナーの合成を行った(発表論文 M5)。(ST-STP)ReO<sub>4</sub>は室温で  $7.7 \times 10^{-3}$  S/cm の伝導性を示す半導体である。DFT 計算や CV、X 線構造解析の結果から判断すると、この塩における ST-STP 分子の電荷は主に TTF 部位に分布した「分子内秩序」状態をとるバンド絶縁体となっていることが示唆された(発表論文 M3)。

#### ⑧ 拡張型 EDO-TTF 導体の開拓 (御崎)



EDO-TTF のビニログ類縁体である EDO-EBDT 誘導体の合成に成功した(発表論文 M4)。ジメチル体(DMEDO-EBDT)を用いた分子性導体、(DMEDO-EBDT)<sub>2</sub>PF<sub>6</sub>の結晶構造は(EDO-TTF)<sub>2</sub>PF<sub>6</sub>に類似しており、約 185 Kにおいて常磁性金属から非磁性絶縁体へ転移することが明らかとなった。低温における結晶構造解析及び腰原・矢持両グループとの共同研究における赤外・ラマンスペクトルの結果から、この絶縁化は CDW を起こす Peierls 機構である可能性が示唆されている。

#### ⑨ 動的相スイッチ有機電子材料の探索 (田中、腰原、矢持、御崎)



(EDO-TTF)<sub>2</sub>XF<sub>6</sub> の動的スイッチ特性を評価した。(X=P)の部分重水素化体、ならびに、(X=As, Sb)を対成分とした同形錯体は、総てが EDO-TTF 分子の際立った変形を伴う光誘起相転移を起こす事が判った(発表論文 Y6、Y9)。スピנקロスオーバー錯体において、複数の秩序が競合する錯体系 Fe[H<sub>2</sub>L<sup>2-Me</sup>](XF<sub>6</sub>)<sub>2</sub> (X=P, As, Sb) を見だし、光誘起相および緩和過程の途上において、熱的相転移では現れない構造が出現することを X 線構造解析で確かめた(発表論文 T2、T12、T13)。図にシンボリックに示すように、X=P においては、温度相転移で表れる相、光誘起相すべてにおいて、ユニットセルの構造が異なることがわかった。この事実は、隠れた秩序が実際に非平衡状態で出現すること

を示した重要な結果である。さらに、電荷分離相転移を示す (dmit) 分子系電荷移動錯体結晶にも研究対象を拡大した。その結果超高速の電荷分離相の融解を明瞭に示す光学特性変化の観測に成功した(発表論文 K4)。さらにスピנקロスオーバー転移に伴って金属-絶縁体相転移を示すコバルト酸化物に関しても、超高速光誘起絶縁体-金属転移の発見を達成すると共に、相転ダイナミクスにおけるコヒーレントフォノンを介する構造変化の役割を明らかにし、本物質の光誘起相転移過程の総合的メカニズム解明にも成功した(発表論文 K1)。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 139 件) 全て査読有

代表的な論文を下記に示す。

T1. H.Hirori, A.Do, F.Blanchard, and K.Tanaka, Appl. Phys. Lett. 98, 091106 (2011); doi:10.1063/1.3560062

T2. N.Br fue, E.Collet, H.Watanabe, M.Kojima, N.Matsumoto, L.Toupet, K.Tanaka and J.-P. Tuchagues, Chemistry - A European Journal 16, 14060 (2010).

T3. K.Shinokita, H.Hirori, M.Nagai, N.Satoh, Y.Kadoya, and K.Tanaka, App. Phys. Lett. 97, 211902 (2010).

T4. M.Jewariya, M.Nagai, and K.Tanaka, Phys. Rev. Lett. 105, 203003 (2010).

T5. A.Do, F.Blanchard, H.Hirori, K.Tanaka, Opt. Express 18, 18419 (2010).

T6. T.Okada, S.Tsuji, K.Tanaka, K.Hirao, and K.Tanaka, Appl. Phys. Lett. 97, 261111 (2010).

T7. H.Hirori, M.Nagai, and K.Tanaka, "Excitonic Interactions with Intense Terahertz Pulses in ZnSe/ ZnMgSSe Multiple Quantum Wells", Phys. Rev. B 81, 081305(R) (2010).

T8. M.Nagai, M.Jewariya, Y.Ichikawa, H.Ohtake, T.Sugiura, Y.Uehara, and K.Tanaka, Opt. Express 17, 11543-11549 (2009)

T9. M.Jewariya, M.Nagai, and K.Tanaka, Journal of Optical Society of America B, 26, (9) A101 (2009).

T10. T.Arikawa, M.Nagai, K.Tanaka, Chemical Physics Letters, 477, 95-101 (2009).

T11. N.O.Moussa, D.Ostrovskii, V.M.Garcia, G.Molnár, K.Tanaka, A.B.Gaspar, J.A.Real, A.Bousseksou, Chemical Physics Letters, 477, (1-3) 156-159 (2009)

T12. H.Watanabe, H.Hirori, G.Molnár, A.Bousseksou, and K.Tanaka, Phys. Rev. B Rapid Comm., in press (2009).

T13. Nicolas Br fue, Hiroshi Watanabe, Loic Toupet, Jeremy Come, Naohide Matsumoto, Eric Collet, Koichiro Tanaka, Jean-Pierre Tuchagues, Angew. Chem. Int. Ed. 2009, 48, 9304 -9307

T14. H.Yada, M.Nagai, and K.Tanaka,

- Chemical Physics Letter, 473, 279-283(2009).
- T15. T.Arikawa, M.Nagai, and K.Tanaka, Chemical Physics Letters 457, 12-17 (2008).
- T16. H.Yada, M.Nagai, and K.Tanaka, Chemical Physics Letters 464, 166-170(2008).
- T17. K.R.Mavani, M.Nagai, D.S.Rana, H.Yada, I.Kawayama, M.Tonouchi, K.Tanaka, Applied Physics Letters 93, 231908 (2008).
- T18. S.Mouri, K.Tanaka, S.Bonhommeau, N.Ould Moussa, G.Molnár, and A.Bousseksou, Phys. Rev. B 78, (17) 174308 (2008).
- T19. A.Bousseksou, G.Molner, J.A.Real, and K.Tanaka, Coordination Chemistry Reviews, 251, 1822-1833 (2007).
- T20. N.Ould Moussa, E.Trzop, S.Mouri, S.Zein, G.Molnar, A.B.Gaspar, E.Collet, M.Buron-Le Cointe, J.A.Real, S.Borshch, K.Tanaka, H.Cailleau and A.Bousseksou, Phys. Rev. B 75, 054101 (2007).
- Y1. Y.Nakano, Y.Misaki, M.Uruichi, K.Yakushi, H.Yamochi, Physica B, **405**, S198-S201 (2010).
- Y2. X.F.Shao, Y.Nakano, G.Saito, K.Yakushi, S.Koshihara, K.Tanaka, H.Yamochi, Physica B, **405**, S75-S78 (2010).
- Y3. T.Murata, X.F.Shao, Y.Nakano, H.Yamochi, M.Uruichi, K.Yakushi, G.Saito, K.Tanaka, Chem. Mater., **22**, 3121-3132 (2010).
- Y4. H.Yamochi, S.Koshihara, Sci. Technol. Adv. Mater., **10**, 024305/1-6 (2009) [[http://iopscience.iop.org/1468-6996/10/2/024305/pdf/1468-6996\\_10\\_2\\_024305.pdf](http://iopscience.iop.org/1468-6996/10/2/024305/pdf/1468-6996_10_2_024305.pdf)].
- Y5. Y.Nakano, M.Takahashi, M.Sakata, H.Yamochi, G.Saito, K.Tanaka, Synth. Met., **159**, 2381-2383 (2009).
- Y6. Y.Nakano, H.Yamochi, G.Saito, M.Uruichi, K.Yakushi, J. Phys.: Conf. Ser., **148**, 012007/1-4 (2009).
- Y7. X.F.Shao, Y.Yoshida, Y.Nakano, H.Yamochi, M.Sakata, M.Maesato, A.Otsuka, G.Saito, S.Koshihara, Chem. Mater., **21**, 1085-1095 (2009).
- Y8. X.F.Shao, Y.Nakano, M.Sakata, H.Yamochi, Y.Yoshida, M.Maesato, M.Uruichi, K.Yakushi, T.Murata, A.Otsuka, G.Saito, S.Koshihara, K.Tanaka, Chem. Mater., **20**, 7551-7562 (2008).
- Y9. Y.Nakano, K.Balodis, H.Yamochi, G.Saito, M.Uruichi, K.Yakushi, Solid State Sci., **10**, 1780-1785 (2008).
- Y10. X.F.Shao, Y.Nakano, H.Yamochi, A.D.Dubrovskiy, A.Otsuka, T.Murata, Y.Yoshida, G.Saito, S.Koshihara, J. Mater. Chem., **18**, 2131-2140 (2008).
- K1. Y.Okimoto, M.Kurashima, K.Seko, T.Ishikawa, K.Onda, S.Koshihara, T.Kyomen, and M.Itoh, Phys.Rev. B 83, 161101(R) (2011).
- K2. K.Onda, M.Shimizu, F.Sakaguchi, S.Ogihara, T.Ishikawa, Y.Okimoto, S.Koshihara, X.F. Shao, Y.Nakano, H.Yamochi and G.Saito, Physica B, 405, S350-S352 (2010).
- K3. A.Tomita, U.Kreutzer, S.Adachi, S.Koshihara and T.Jue, J.Exp.Biol. 213 2748-2754 (2010).
- K4. T.Ishikawa, N.Fukazawa, Y.Matsubara, R.Nakajima, K.Onda, Y.Okimoto, S.Koshihara, M.Lorenc, E.Collet, M.Tamura and R.Kato, Phys.Rev.B 80, 115108 (2009)
- K5. A.Tomita, T.Sato, K.Ichianagi, S.Nozaawa, H.Ichikawa, M.Chollet, F.Kawai, S-Y.Park, T.Tsudoku, T.Yamamoto, S.Koshihara, and S.Adachi, PNAS 2009 106, 2612-2616 (2009).
- K6. K.Onda, S.Ogihara, K.Yonemitsu, N.Maeshima, T.Ishikawa, Y.Okimoto, X.Shao, Y.Nakano, H.Yamochi, G.Saito, and S.Koshihara, Phys.Rev.Lett.**101**, 067403 (2008).
- M1. M.Nishiwaki, K.Nakamura, T.Shirahata, Y.Misaki, Chem. Lett., **40**, 452-454 (2011).
- M2. T.Ito, K.Nakamura, T.Shirahata, T.Kawamoto, T.Mori, Y.Misaki, Chem. Lett., **40**, 81-83 (2011).
- M3. M.Ashizawa, K.Ishidzu., M.Watanabe, T.Tanahashi, T.Shirahata, T.Kawamoto, T.Mori, Y.Misaki, Chem. Lett., **39**, 1093-1095 (2010).
- M4. T.Shirahata, T.Morikawa, H.Miyamoto, Y.Nakano, H.Yamochi, Y.Misaki, Physica B: Condensed Matter, **405**, S61-S64 (2010).
- M5. K.Ishizu, M.Watanabe, T.Tanahashi, Y.Misaki, M.Ashizawa, T.Mori, Journal of Physics: Conference Series, **132**, 012021-1-5 (2008).

[学会発表] (計 541 件)

このうち、招待講演が 64 件、国際学会での発表が 181 件である。下記に代表的な国際学会招待講演を示す。

1. K.Tanaka, "Enhancement of carrier scattering rate near the Mott density in photo-excited semiconductors", EOS 2010, October 25-28, 2010, Parc floral de Paris, France.
2. K.Tanaka, "Dynamical separation of two coupled order parameters in the relaxation process from the photo-induced state", 5<sup>th</sup> International Symposium on Molecular Magnetism, September 28, 2009, Rennes, France
3. H.Yamochi, "Structural Feature of Peculiar Metal-Insulator Transition Observed in (EDO-TTF)<sub>2</sub>PF<sub>6</sub>", The 21st International Union of Crystallography Satellite Meeting "Molecular Crystals Exhibiting Exotic Functions", August 21-22, 2008, Osaka, Senri-Life Science Center, Japan.
4. S.Koshihara, "Dynamics of cooperative lattice-charge (spin) coupled phenomena under far equilibrium condition induced by fs laser light irradiation", 3rd Conference "Statistical Physics: Modern Trends and Applications", June 23-25, 2009, Lviv, Ukraine.
5. S.Koshihara, H.Ichikawa, S.Nozaawa, T.Sato, A.Tomita, K.Ichianagi, M.Chollet, L.Guerin S.Adachi and K.Miyano, "Dynamics of cooperative

lattice-charge (spin) coupled phenomena induced by fs laser light irradiation studied by 100 ps time-resolved X-ray diffraction”, Ultrafast x-ray methods for studying transient electronic structure and unclear dynamics, September 28 –October 1, 2009, Bonn in Germany.

6. K.Tanaka, “Terahertz time-domain attenuated total reflection spectroscopy for photo-induced phase transition”, 3rd International Conference on Photo-Induced Phase Transitions and Cooperative Phenomena (PIPT2008), November 12, 2008, Osaka, Japan.
7. K.Tanaka, “Terahertz Attenuated Total Reflection Spectroscopy for materials Sciences”, International Symposium on Molecular Materials (MOLMAT), July 8-11, 2008, Toulouse, France.
8. K.Tanaka, H.Watanabe, S.Mouri, S.Yokoyama, G.Molnar, A.Bousseksou, “Dynamical Aspects of the Photo-induced Spin transition in the Spin-crossover complex”, 4<sup>th</sup> Japan-France Symposium on Molecular Materials, Electronics, Photonics, and Spintorionics, 9 March, 2007 Tokyo, Japan.

[図書] (計 12 件)

代表的なものを下記に示す。

1. 腰原伸也、足立伸一、野澤俊介、一柳光平、佐藤篤志、富田文菜、市川広彦、田崎遼子、M.Chollet、L.Guerin、河田洋、大門正博、動的構造観測技術のもたらす光誘起協同現象研究の発展、固体物理 Vol. 44、No. 519、p13-25 (2009)
2. 腰原伸也、光で強誘電相転移を操る、化学と工業、Vol. 62、8、August 2009
3. 永井正也、田中耕一郎、「テラヘルツ時間領域分光の基礎と応用」 応用物理 75、(2) 179-187 (2007)
4. 田中耕一郎、「テラヘルツ分光で何が見えるか」セラミック、42、4月号 (2007)
5. 田中耕一郎、「テラヘルツ分光が切り開く材料科学」月刊オプトロニクス、26、2月号 (2007)
6. 腰原伸也、矢持秀起、“学術月報”、日本学術振興会、2006年 59巻、804-809頁 “分子性結晶における金属-絶縁体転移系の超高速・高効率光制御”
7. 田中耕一郎、「光誘起相転移」、「光物性の基礎と応用」分担執筆光物性研究会編、オプトロニクス社 (2006)

[その他]

ホームページ:

<http://www.hikari.scphys.kyoto-u.ac.jp/jp/index.php?学術創成プロジェクト>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

田中 耕一郎 (TANAKA KOICHIRO)  
京都大学・物質-細胞統合システム拠点  
・教授  
研究者番号: 90212034

### (2) 研究分担者

矢持 秀起 (YAMOCHI HIDEKI)  
京都大学・低温物質科学研究センター  
・教授

研究者番号: 20182660

腰原 伸也 (KOSHIHARA SHINYA)  
東京工業大学・理工学研究科物質科学  
専攻・教授

研究者番号: 10192056

御崎 洋二 (MISAKI YOHJI)  
愛媛大学・理工学研究科・教授

研究者番号: 90202340

永井 正也 (NAGAI MASAYA)  
大阪大学・大学院基礎工学研究科・准  
教授

研究者番号: 30343239

### (3) 連携研究者

Krushna Mavani

京都大学・物質-細胞統合システム  
拠点・研究員

研究者番号: 10452260

(連携研究当時は e-Rad システム無し)

Denis Ostrovski

京都大学・大学院理学研究科・研究員

研究者番号: 60456845

(連携研究当時は e-Rad システム無し)

廣理 英基 (HIRORI HIDEKI)

京都大学・物質-細胞統合システム  
拠点・助教

研究者番号: 00512469

大塚 晃弘 (OTSUKA AKIHIRO)

京都大学・低温物質科学研究センター  
・助教

研究者番号: 90233171

前里 光彦 (MAESATO MITSUHIKO)

京都大学・大学院理学研究科・助教

研究者番号: 60324604

中野 義明 (NAKANO YOSHIKI)

京都大学・低温物質科学研究センター  
・助教

研究者番号: 60402757

沖本 洋一 (OKIMOTO YOICHI)

東京工業大学・理工学研究科物質科学  
専攻・准教授

研究者番号: 50356705

石川 忠彦 (ISHIKAWA TADAHIKO)

東京工業大学・理工学研究科火山流体  
センター・助教

研究者番号: 70313327

恩田 健 (ONDA KEN)

東京工業大学・総合理工学研究科化学  
環境学専攻・特任准教授

研究者番号: 60272712

宮本 久一 (HISAKAZU MIYAMOTO)

久留米工業高等専門学校・一般理科  
・教授

研究者番号: 30229893

白旗 崇 (SHIRAHATA TAKASHI)

愛媛大学・理工学研究科・助教

研究者番号: 40360565