

機関番号：11301

研究種目：基盤研究 (B)

研究期間：2008～2010

課題番号：20340069

研究課題名 (和文) テラヘルツ超高速分光法による光誘起伝導制御の研究

研究課題名 (英文) Optical control of conductivity as studied by ultrafast terahertz spectroscopy

研究代表者 岩井 伸一郎 (SHINICHIRO IWAI)

東北大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号：60356524

研究成果の概要 (和文)：

強相関電子系 (有機伝導体  $\alpha$ -(ET)<sub>2</sub>I<sub>3</sub>,  $\kappa$ -(ET)<sub>2</sub>Cu<sub>2</sub>(CN)<sub>3</sub>、遷移金属酸化物 LaCoO<sub>3</sub>, LuFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>) における光誘起伝導、誘電、磁気制御の機構を、テラヘルツ (THz) 光領域の定常分光および過渡 (ポンププローブ) 分光によって調べた。電子間のクーロン斥力による電荷の凍結 (モット絶縁体、電荷秩序、強誘電性) と融解 (金属、常誘電性) を、THz スペクトルによってプローブし、超高速 (ピコ秒) 光伝導、誘電性制御の可能性を探索した。

研究成果の概要 (英文)：

Photoinduced control of conducting and dielectric properties have been investigated by using steady state terahertz (THz) time domain spectroscopy and transient (optical pump-THz probe) spectroscopy. Target materials were organic conductors ( $\alpha$ -(ET)<sub>2</sub>I<sub>3</sub>,  $\kappa$ -(ET)<sub>2</sub>Cu<sub>2</sub>(CN)<sub>3</sub>) and transition metal oxides (LaCoO<sub>3</sub>, LuFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>).

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	9,700,000	2,910,000	12,610,000
2009年度	2,500,000	750,000	3,250,000
2010年度	2,800,000	840,000	3,640,000
年度			
年度			
総計	15,000,000	4,500,000	19,500,000

研究分野：光物性

科研費の分科・細目：物理学・物性 I

キーワード：強相関電子系、有機伝導体、遷移金属酸化物、テラヘルツ分光、光誘起相転移

## 1. 研究開始当初の背景

光で物質の電子的な性質を変化させるという発想は決して新しいものではない。しかし、高温超伝導や巨大磁気抵抗効果の発見以降 10 年以上を経て、物質開発が進んだこと、および、超短パルスレーザー技術の飛躍的な発展によって、強相関系物質の光制御は新たな局面を迎えている [1]。遷移金属錯体や酸化物、有機伝導体においては、強い電子間相互

作用に起因した電荷の秩序 (凍結) が物性を支配している。最近注目されている、光照射による絶縁体-金属転移は、このような秩序 (モット絶縁体、電荷秩序) の電子的な融解によるものであるが、しばしば、ピコ秒程度の超高速緩和を示すことから、伝導性の高速制御への応用も期待されている。また、電荷の秩序は、強誘電性や超伝導と競合していることも多いため、新たな光誘起伝導、誘電、

磁気制御の可能性も期待される。しかし、その一方、光照射によって生じた短寿命電子相の性質を知ることは極めて困難である。例えば、電荷の秩序が光融解した状態は、「金属的」な高伝導状態と考えてよいが、ドローデ金属が巨視的に生成しているかは明らかではなく、微視的金属ドメインや、より伝導度の低い”不良金属”の生成も示唆される。こういった光誘起金属状態の電子的性質を明らかにすることは、基礎科学的な意味だけでなく、超高速光スイッチへの応用の観点からも極めて重要である。これらの問題へのアプローチは、THz 光領域(<100 meV)におけるポンププローブ分光が不可欠となる。この方法による光誘起相転移ダイナミクスの研究は、本研究開始当時、少数の報告例があったが[2, 3]、本格的な展開はこれからという段階にあった。

## 2. 研究の目的

申請者は、最近 5 年間にわたり、有機伝導体や 3d 遷移金属化合物における光誘起相転移の機構解明に関する研究を行ってきた[4-8]。しかし、従来の中赤外 (100 meV-1 eV) 測定の限界と、遠赤外(<100 meV)測定の重要性を認識し、2 年ほど前から THz 分光の技術開発を続けてきた。本年度に入り、有機伝導体における光誘起金属状態の THz スペクトルを初めて観測するなど本格的な研究に入っている[9]。本研究では、THz ポンププローブ測定 (ポンプ; 可視~中赤外、プローブ; THz) において、プローブ帯域の拡大を行うことによって、光誘起金属状態の電子的性質を明らかにするほか、そのほかの低エネルギー集団励起などの性質を明らかにすることを目的とする。試料としては、有機伝導体のほか、遷移金属酸化物も対象とする。より具体的には、

i) 従来の光誘起絶縁体-金属転移の研究は、中赤外光領域 (100 meV-1 eV) のスペクトル測定によって行われてきた。しかし、このエネルギー領域では、ドローデ金属と、より伝導度の低い不良金属を区別することはできない。有機伝導体や銅酸化物などにおいて、より低エネルギーのテラヘルツ領域(1- 100 meV)を見ることによって、ドローデ金属や不良金属の生成を観測する。

ii) 多くの強相関電子系物質においては、電荷の秩序は、強誘電性や超伝導と競合している。競合関係を様々に変化させ、絶縁体-金属転移以外の転移、例えば、秩序を光で壊すだけでなく、短距離秩序を増大させるような光誘起相転移を見出す。

[1]J. Phys. Soc. Jpn. 75 (2006)

- [2]Averitt et al., PRL**87**, 017401(2001).
- [3]Demsar et al. PRL**91**,267002(2003).
- [4]S. Iwai et al., PRL**98**, 097402 (2007).
- [5]S.Iwai et al., PRB, submitted (2007).
- [6]S. Iwai et al., PRL**96**, 057403(2006)).
- [7]S. Iwai et al., PRL**91**,057401(2003).
- [8]S. Iwai et al.,PRL**88**,057402(2002).
- [9] 中屋、岩井ほか 日本物理学会第 62 回年会(2007 年 9/22)

## 3. 研究の方法

現行の超高速 THz ポンププローブ (近-中赤外光励起、THz 光プローブ) 測定装置を改良し、高精度、広帯域化をはかる。その上で、モット絶縁体や電荷秩序絶縁体における光誘起金属状態の過渡スペクトル測定を行い、ドローデ金属や微視的、巨視的金属ドメインの生成と緩和過程を明らかにする。超高速 THz ポンププローブ測定装置の改良は、**1)**現在 100 フェムト秒の光源 (既存) で行っている THz 光発生を、25 fs 光源 (非同軸パラメトリック増幅器; 既存、必要な場合には、更に短パルスに改造) に変えることによって、帯域幅を現行の 0.5-3 THz から 10 THz 程度まで拡張する。**2)** THz 発生から、試料を経て検出 (EO 検出) に至るまでの光学系をすべて乾燥空気チャンバー内に構築することによって水の影響を完全に除去する。また、**3)** 転移温度の低い SDW 状態や超伝導状態の観測に対応できる極低温 (4 K) クライオスタットを導入する。具体的な対象物質としては、i)有機伝導体 (モット絶縁体、電荷秩序) ii) 3d 遷移金属 (コバルト、鉄など) 酸化物を用いる。

## 4. 研究成果

### (1) 二次元有機伝導体 $\alpha$ -(ET)<sub>2</sub>I<sub>3</sub>

$\alpha$ -(BEDT-TTF)<sub>2</sub>I<sub>3</sub> は、 $T_c=135$  K 以下で、電荷秩序を示す二次元有機伝導体である。最近この電荷秩序状態が、強誘電性を示すことが明らかになったことでも注目されている[23]。この物質の電荷秩序状態を近赤外光で励起すると、電荷秩序が融解し金属状態が生成する。12 fs パルスを用いた高時間分解分光の結果によれば、その生成時間は、分子間の電荷移動に要する時間 (~30 fs) よりも短い。

これらの結果から、励起直後には、大きな構造変化や対称性の変化を伴わない電子的な電荷秩序の融解によって、微視的な金属ドメインが生成すると考えられる。励起強度が弱く、かつ  $T \ll T_c$  では、この微視的ドメインは、1 ps 程度の超高速緩和を示す。しかし、強励起、 $T_c$  近傍の条件下では、巨視的ドメインへ凝集して安定化する。

本研究では、光誘起金属状態の電子状態を調べるために、THz 定常測定および近赤外励起・THz プロブ測定を行った。(i) 定常スペクトルの温度依存性から  $T < T_{co}$  では強固な電荷秩序状態であり、 $T \sim T_{co}$  (120 - 135 K) の電荷秩序は融けかけた状態であること。 $T < T_{co}$  と  $T \sim T_{co}$  の光学伝導度スペクトルの違いは、中赤外領域では観測されなかったものであり、低エネルギー ( $\sim meV$ ) の領域を見ることで初めて明らかになったことである。また、光励起・THz プロブ測定からは以下のことが分かった。(ii)  $T < T_{co}$  における電荷秩序を光融解した際に観測される励起直後の過渡吸収スペクトルは定常状態の金属相と類似のスペクトルが観測されること (iii)  $T \sim T_{co}$  における電荷秩序を光融解した場合に観測される励起直後の過渡吸収スペクトルは、定常状態の金属相とは異なるスペクトルが観測されること。

(i) の定常測定の結果からは、転移温度近傍の電荷秩序は融けかけた軟らかい状態であり、転移温度から離れた温度領域では強固な電荷秩序状態であることが示された。 $T < T_{co}$ ,  $T \sim T_{co}$  で観測される光誘起金属状態の違いは、このような定常状態における電荷秩序の違いによるものと考えられる。 $T < T_{co}$  の比較的強固な電荷秩序を光融解した場合は、定常状態の金属相と類似の金属状態が生成され、電荷秩序が解けかけた軟らかい状態を光融解した場合は、定常状態の金属相とは異なる金属状態が生成される。 $T \sim T_{co}$  において観測される光誘起金属状態は、高温金属相よりも高伝導状態であることが示唆される、 $\alpha$ -(ET)<sub>2</sub>I<sub>3</sub> の高温金属相では、電荷の不均化が完全には解けていないと考えられている [55]。iii) で観測された高伝導状態は、このような電荷の不均化が解消された状態を反映している可能性がある。また、これらの金属状態の温度依存性から、近赤外励起・中赤外プロブ分光によって観測された短寿命の微視的ドメインと長寿命の巨視的ドメインは、それぞれ高温金属相と類似の電子状態、およびより高伝導の“良い”金属状態と考えられる。

## (2) ペロブスカイト型コバルト酸化物 LaCoO<sub>3</sub>

ペロブスカイト型コバルト酸化物 LaCoO<sub>3</sub> [24-27] は、100 K 以下では、非磁性の低スピン状態 ( $t_{2g}^6 e_g^0$ ,  $S=0$ ) を示すバンド絶縁体であるが、温度上昇に伴って、中間スピン状態 ( $t_{2g}^5 e_g^1$ ,  $S=1$ ) または、高スピン状態 ( $t_{2g}^4 e_g^2$ ,  $S=2$ ) のモット絶縁体となる。このような、100 K 近傍におけるスピン転移のほかに、より高温の 540 K では、金属状態へのクロスオーバーが観測される。この物質を室温 (300 K、モット絶縁体) において光励

起すると瞬時に金属状態への転移を示すドルーゼ的な反射率の増加が観測された [17, 18]。この光誘起金属状態は、1 ps 以内に消滅する。一方、 $< 100$  K (バンド絶縁体) で励起した場合は、5 ns の寿命を持つ反射率変化が観測された。この長寿命の反射率変化は、何らかの緩和励起状態の生成を示す。その候補としては、ポーラロンなどの局在電子状態のほか、中間スピンもしくは、高スピン状態の可能性もある。本研究では、THz 定常分光と、光励起・THz プロブ分光によって、この物質の THz 応答と光誘起スピン転移の可能性を探索した。

### i) 定常測定 (THz 時間領域分光)

- スピン転移 ( $\sim 100$  K) に伴って消滅、増大する光学伝導度スペクトルの構造 ( $\sim 14 meV$ ) を観測した。これらの吸収は、3d 電子の  $e_g \rightarrow t_{2g}$  遷移に関係した遷移によるものと考えられる。

### ii) 過渡測定 (近赤外励起・THz プロブ分光)

- $O-2p$  から  $3d e_g$  軌道への電荷移動によって、 $e_g \rightarrow t_{2g}$  遷移が褪色すること (20 K) を初めて観測した ( $e_g \rightarrow t_{2g}$  遷移に関係した非線形光学効果の観測)。
- 20 K において、減衰時間  $< 1ps$  の超高速緩和を観測した。中赤外の測定との比較から、励起直後の光キャリアが、ポーラロンなどの緩和励起状態、あるいは中間スピン状態へ緩和しているものと考えられる。

## (3) 強誘電性遷移金属酸化物 LuFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>

LuFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> の強誘電性は、面間での電荷不均化 (電荷秩序) により双極子が形成され、それらが強誘電的秩序を示すためと理解されている。次項で述べる、有機物質  $\kappa$ -(ET)<sub>2</sub>Cu<sub>2</sub>(CN)<sub>3</sub> と同様に、電子相関による電荷の局在化・不均化を主要因とする双極子の形成は、従来の原子変位を起源とする機構とは本質的に異なるものである。このような電子的な起源による誘電性は“電子強誘電”と呼ばれ、外場に対する超高速応答が期待されている。

定常 THz 測定によって得られた、光学伝導度は、低温から  $T_{3D}=320$  K に向け緩やかに増大し、 $T_{co}$  を跨いで急激に増大している。すなわち、 $T_{3D}$  における三次元的な電荷秩序の融解が、光学伝導度の増大としてスペクトルに反映されていることがわかる。

しかし、電荷秩序が融解した状態に対応する、光学伝導度と誘電率のスペクトル形状は Drude 応答では説明できず、 $T_{co}$  における三次元電荷秩序の融解は、単純なフリーキャリアの増加ではないことがわかる。

また、低温領域 ( $T < 300$  K) で観測される複数のピーク構造は磁気転移点 ( $T_N=250$  K)

付近にてほぼ消失している。これらのことは、低温において観測されるピーク構造が、磁気秩序と相関を持っていることを強く示唆する。こうした磁気秩序に関連したピークは、過去に他グループで行われた THz 測定では観測されていない。本物質は酸素欠損に非常に敏感であることがわかっており、それが影響している可能性がある。

次に、光励起-テラヘルツポンププローブ分光実験を行い、電荷秩序の融解とその緩和ダイナミクスについて調べた（励起波長は、 $\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Fe}^{3+}$  のサイト間励起に対応する 1.55 eV）。

励起光の照射に伴い、電荷秩序が瞬時に融解して、伝導度が増大する。この光誘起状態の光学伝導度や誘電率の過渡スペクトル形状は、単純なドルーデ型の金属では説明できない。また、この光学伝導度の光誘起変化は、短寿命（ $\sim 1$  ps）と長寿命（ $> 10$  ps）の二つの減衰成分を持つ。その温度依存性を詳しく調べることにより、それぞれの減衰成分によって特徴づけられるダイナミクスは、それぞれ異なる秩序状態を反映したものだと考えることが出来る。すなわち、短寿命成分（ $\Delta\tau = 1$  ps）と長寿命成分（11 ps）では、異なる臨界温度を持っている。短寿命成分と長寿命成分に対応する臨界温度はそれぞれ、二次元電荷秩序形成（ $T_{2D} = 500$  K）、三次元電荷秩序形成（ $T_{3D} = 350$  K）温度と一致している。従って、短寿命成分は、2次元電荷秩序の回復過程、長寿命成分は、3次元電荷秩序の回復過程に対応すると考えられる。

#### (4) リラクサー電子誘電性を示す二次元有機伝導体 $\kappa\text{-(ET)}_2\text{Cu}_2(\text{CN})_3$

伝導面内で ET ダイマーを 1 サイトとする等方的三角格子を形成する  $\kappa\text{-(ET)}_2\text{Cu}_2(\text{CN})_3$  においては、最近、リラクサー的な低周波誘電率の増大が観測された [Abdel-Jawad, Sasaki *et al.*, PRB82, 125119 (2010)]。その起源としては、ダイマー内での電荷不均化により、微視的な電気双極子（ダイマー双極子）が形成されるというモデルが提案されている。十分高温では、ダイマー上に電荷が均一に分布したダイマーモット絶縁体とみなすことができるが、温度の低下とともにクーロン反発による電荷の不均化が進行し、ダイマー双極子が形成されていく。この状態は最低温でも強誘電的秩序には至らず、局所的な分極クラスターからなる双極子ガラス状態にあると考えられている。

本研究では、この双極子ガラス状態の形成に対応して成長するテラヘルツ領域の光学伝導度（ $\sigma_1$ ）スペクトルのブロードなピークを  $\sim 30$   $\text{cm}^{-1}$  の領域に観測した。このブロードなピークは、ダイマー双極子の集団的な配向と関連した集団励起によるものと考えられる。また、集団励起のス

ペクトルのピーク近傍に見られる特徴的な Dip 構造は、集団励起（電子遷移）と格子振動の Fano 干渉によるものである。

次に、このような電子的な起源によって形成された分極クラスターの、光による制御の可能性を探るため、光励起-テラヘルツプローブ分光装置を製作し測定を行った。光励起直後の、光学伝導度の変化のスペクトル（ $\Delta\sigma_1$  スペクトル）は、双極子の集団励起に対応する  $\sim 30$   $\text{cm}^{-1}$  の構造が増大していることを示している。集団励起によるピークは低温で増大することを考慮するならば、この結果は、高温側から低温側への変化（分極クラスターの成長）に対応する。一方、励起後、7 ps においては、このピークの強度は減少し、分極クラスターは融解していることを示している。励起直後に観測される、分極クラスターの成長は、従来観測されている電荷秩序の光融解などの光誘起相転移とは全く異なるプロセスであり、光励起によって新たな電子の秩序形成が可能であることを示唆する。

#### 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 19 件）

- ① H. Nakaya, K. Itoh, Y. Takahashi, H. Itoh, S. Iwai, S. Saito, K. Yamamoto, K. Yakushi, 「Terahertz Responses of the High-Temperature Metallic Phase and Photoinduced Metallic State in the Ferroelectric Charge-Ordered Organic Salt」、Phys. Rev. B、査読有、81巻、2010、155111-1-5.
- ② Y. Kawakami, T. Fukatsu, Y. Sakurai, H. Unno, H. Itoh, S. Iwai, T. Sasaki, K. Yamamoto, K. Yakushi, K. Yonemitsu, 「Early-Stage dynamics of Light-Matter Interaction Leading to the Insulator to metal Transition in a Charge Ordered Organic Crystal」、Phys. Rev. Lett、査読有、105巻、2010、246402-1-4.
- ③ Satoshi Miyashita, Yasuhiro Tanaka, Shinichiro Iwai, Kenji Yonemitsu, 「Charge, Lattice, and Spin Dynamics in Photoinduced Phase Transitions from Charge-Order-Insulator to Metal in Quasi-Two-Dimensional Organic Conductors」、J. Phys. Soc. Jpn、査読有、79巻、2010、034708-1-9.
- ④ Y. Kawakami, S. Iwai, T. Fukatsu, M. Miura, N. Yoneyama, T. Sasaki, N. Kobayashi, 「Optical Modulation of Effective On-Site Coulomb Energy for the Mott Transition in an Organi

- c Dimer Insulator」、Phys. Rev. Lett、査読有、103巻、2009、066403-1-4.
- ⑤ S.Iwai, K. Yamamoto, F. Hiramatsu, H. Nakaya, Y. Kawakami, K. Yakushi、「Hydrostatic pressure effect on photoinduced insulator-to-metal transition in layered organic salt  $\alpha$ -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$ 」、Phys. Rev. B、査読有、77巻、2008、125131-1-5.
- ⑥ K. Yamamoto, S. Iwai, S. Boyko, A. Kashiwazaki, F. Hiramatsu, C. Okabe, N. Nishi, K. Yakushi、「Strong Optical Nonlinearity and its ultrafast Response Associated with Electron Ferroelectricity in an Organic Conductor」、J. Phys. Soc. Jpn、査読有、77巻、2008、074709-1-6.

[学会発表] (計 59 件)

- ① 岩井伸一郎、「先端超短パルス光源による光誘起相転移現象の素過程の解明」、「光誘起相転移プロジェクト合同研究会」、2011/2/12、物質構造科学研究所(KEK)
- ② 岩井伸一郎、「強相関電子系における光と物質の相互作用の初期過程、10 フェムト秒赤外分光で見た光誘起絶縁体-金属転移」、「半導体における動的相関電子系の光科学」シンポジウム、2011/1/6、京都大学吉田キャンパス
- ③ S.Iwai、「Few optical-cycle ultrafast spectroscopy of strongly correlated electrons in layered molecular conductors」、Workshop Frontier 2010、2010/12/7、Ecole des Mines d'Albi-Carmaux, France.
- ④ 岩井伸一郎、「BEDT-TTF 塩の赤外 10 フェムト秒分」研究会「相関電子系における電荷秩序と誘電異常;遷移金属酸化物と分子性化合物の最近の展開」、2010/11/26 青山学院大学
- ⑤ 岩井伸一郎、「有機伝導体における光誘起相転移の超高速ダイナミクス」、理化学研究所、2010/10/28 加藤分子物性研究室セミナー
- ⑥ 岩井伸一郎、「電荷秩序の超高速・テラヘルツ応答」、本物理学会 2010 秋季大会シンポジウム「やわらかい電荷秩序の特異な誘電性・伝導性と外場制御」、2010/9/23、大阪府立大学
- ⑦ S.Iwai、「Ultrafast IR and THz Spectroscopy of Photoinduced Insulator to Metal Transition in Highly Correlated Organic System」、International Conference on Dynamic Processes of Photo-Excited State in

- Solids、2010/6/25、2010 (DPC'10)、Argonne National Laboratory, IL, USA.
- ⑧ 岩井伸一郎、「超高速赤外分光で見る光誘起絶縁体-金属転移の初期過程と転移機構」、次世代スーパーコンピュータプロジェクト、ナノ分野グランドチャレンジ研究開発ナノ統合拠点(兼 京大基研研究会) 相関電子系における光誘起現象、2009/12/11、京都大学基礎物理学研究所
- ⑨ 岩井伸一郎、「強相関電子系における光誘起相転移のテラヘルツ分光」、日本物理学会シンポジウム「テラヘルツ領域における非線形光学・高密度励起現象の新展開」、2009/9/26、熊本大学
- ⑩ 岩井伸一郎、「有機伝導体における光誘起相転移の超高速分光と次世代放射光への期待」、ERLサイエンスワークショップ、2009/7/9、高エネルギー物理学研究所
- ⑪ 岩井伸一郎、「 $\alpha$ -(ET) $_2$ I $_3$  における光誘起相転移と超高速テラヘルツ応答」、基研研究会、2009/7/2、京都大学基礎物理学研究所
- ⑫ S. Iwai、「Ultrafast terahertz and mid-IR and terahertz optical responses in layered BEDT-TTF based organic conductors」、3rd International Conference on Photo-Induced Phase Transitions and Cooperative Phenomena、2008/11/11、Osaka, Japan.
- ⑬ 岩井伸一郎、「有機伝導体における光誘起相転移の超高速分光;より高い時間分解能と広帯域化を目指して」、第二回東北大学光科学技術フォーラム、2008/11/6、東北大学電気通信研究所
- ⑭ 岩井伸一郎、「先端超短パルス光源による光誘起相転移現象の素過程の解明」、第二回東北大学光科学技術フォーラム、2008/11/6、東北大学電気通信研究所

[図書] (計 1 件)

- ① Shinichiro Iwai, Hideki Nakaya, Yohei Kawakami、Transworld Research Network、「Molecular Electronic and Related Materials-Control and Probe with Light (ISBN:978-81-7895-460-8 Editor; T. Naito), 2 Ultrafast photo-induced insulator to metal transition in layered BEDT-TTF based salts」、2010、37-58

[その他]

ホームページ等

<http://femto.phys.tohoku.ac.jp/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

岩井 伸一郎 (SHINICHIRO IWAI)  
東北大学・大学院理学研究科・教授  
研究者番号：60356524

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号：

### (3) 連携研究者

山本 薫 (KAORU YAMAMOTO)

分子科学研究所・助教

研究者番号：90321603

薬師 久弥 (KYUYA YAKUSHI)

分子科学研究所・教授

研究者番号：20011695

佐々木 孝彦 (TAKAHIKO SASAKI)

東北大学・金属材料研究所・准教授

研究者番号：20241565

加藤 雅恒 (MASATSUNE KATO)

東北大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：50211850

齋藤 伸吾 (SHINGO SAITO)

情報通信研究機構・主任研究員

研究者番号：80272532

石原 純夫 (SUMIO ISHIHARA)

東北大学・大学院理学研究科・准教授

研究者番号：30292262