

令和 4 年 6 月 10 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2021

課題番号：17H03230

研究課題名(和文) 分子静電気エレクトロニクスに向けた光学手法によるトライボ発電マイクロ起源の研究

研究課題名(英文) Analysis of triboelectric generation for molecular electronics as dielectric phenomena by using optical method

研究代表者

田口 大 (Taguchi, Dai)

東京工業大学・工学院・准教授

研究者番号：00531873

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,800,000円

研究成果の概要(和文)：ものを擦り合わせると電気が起きます(摩擦電気)。この電気を集めて、いろいろな働きをする発電源にできます。これまで、発生する電気の量から発電源としての働きが詳しく研究されてきました。でも発電源としての働きは、量だけではなく、それを作り出す速さも大切です。私たちは、このことの解明に取り組みました。そして、発電のマイクロ起源が2種類(電荷変位と双極子回転)あることを見出しました。その2つの電気の源を、見分ける顕微鏡(SHG顕微鏡と呼んでいます)も実現しました。誘電体・絶縁体は、電気を蓄えたり、電流を遮断するだけではなく、発電体として働き、電気を作り出す材料の働きのあることを明確化しました。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ものを擦り合わせると摩擦電気が発生します。しかし、摩擦電気がよく知られている静電気の性質ではなく、発電源としての働きを利用するときに、何が大切な材料のキーワードなのか、学術的には明確ではないところがありました。私たちの研究グループでは、誘電物性の立場からこの課題に取り組みました。そして、発電源のマイクロ起源として2つ(電荷変位と双極子回転)が働くことを見出しました。これまで摩擦帯電列(電荷)の考え方を基本として発電源の働きも考えられてきました。しかし、今回の研究成果をふまれば、双極子回転による発電の働きに着目して、従来とは全く異なる材料も発電源として利用できるようになります。

研究成果の概要(英文)：Triboelectric charge has been known as electrostatic phenomena. But now, it is getting to be used as an electrical power source for a variety of applications. In this project, our group have challenged to evaluate the triboelectric charges as a power source, from dielectric physics viewpoint. Results showed that two microscopic origins, i.e., charge displacement and dipole rotation, are active in power generation process. Optical second-harmonic generation (SHG) microscope has been introduced as a new way to visualize these two origins selectively. The microscope is available to image a series of triboelectric charge generation processes in dielectric and insulating materials. In other words, dielectric and insulating materials are actively working as a power generation material.

研究分野：電気電子材料

キーワード：電子・電気材料 誘電体物性 可視化 低消費電力 摩擦発電 永久双極子 電荷変位 熱刺激電流

1. 研究開始当初の背景

研究開始当初、IoT (Internet of things) のアイデアが広く検討され、そのための新しい発電源の実現が期待されていた。そして、その一つとして摩擦電気による発電 (トライボ発電) の研究が国内外で着手されていた。新材料・新プロセスによる発電面密度の向上、そして、作り出した電力をどのように役立てられるのが広く検討されつつあった。一方で、発電の考え方そのものは、よく知られている摩擦帯電列に基づく方向がとられていた。評価法の観点からは、長く研究されてきた摩擦電気が再びテーマとして脚光を浴びた当初の状況は、従来の帯電列による考え方が有効と認めつつも、新しい発電源として将来研究が進展したときに、その内容を包括する概念としてどこまで有効であるか、という学術的問いにつながる。ひるがえって評価法自身にも新しいステップが求められ、従来の評価基準ではとらえきれない課題が潜んでいるはずである。

それでは、静電気現象としての摩擦電気の視点からみて、動電気現象の摩擦発電が新しく要求する課題は何か。いろいろな課題が考えられるが、評価法の観点からは次の点が要求される。すなわち、「静電気としての摩擦電気は、正電荷と負電荷の電荷が分離して留まり、外部に静電力を及ぼす現象であるから、分離した電荷の極性と量が評価の基本である」。その一方で、「発電源としての摩擦電気の働きは、外部負荷に電流を流すことであるから、電荷の極性と量が基本的であることは変わらないが、それに加えて、電荷を作り、消費する速さが大切」であるはずで、その評価が、摩擦発電を切り口とした新しい学術領域を開拓するために切望されるということである。しかし、当時このような静電気と発電の違いが明確といえる状況ではなく、従来の静電的手法による評価法が広く採用されていた。原因の一つは、摩擦発電の電気は摩擦により発生するといわれながら、実際に摩擦をしながら電気が発生する様子を評価する手段が限られているという当時の状況がある。静電的评价手法で、摩擦の後に残留する電荷の測定は十分に行われている状況であった。一方、摩擦発電で大切になる、電荷が発生して外部負荷に流れていく過程の評価手段は未だ発展途上の段階といえた。

そのような状況の中で、私たちの研究グループでは、それまでに培ってきた、分極現象を通して界面現象を評価する手法としてのマクスウェル変位電流測定 (Maxwell Displacement Current: MDC) と光第2次高調波発生 (optical Second Harmonic Generation: SHG) の特徴を活かし、摩擦発電の分子的起源を可視化する手法として展開することから研究に着手した。従来の帯電列により大筋をつかむことができた静電気現象としての摩擦帯電を越えて、電流を起こす発電の2つの分子的起源「電荷変位」と「双極子回転」を選択的に評価する新手法を実現することで、分子サイズの発電源を評価する材料評価基盤の確立が可能であると考えた。そして、光学手法のSHG測定がパルスレーザーを用いれば時間分解測定に展開でき、電荷が分離し、双極子が回転して電流が流れ、負荷で消費する時間変化を直接可視化する手法を実現しようと考えた。そして、評価法の確立により、「摩擦を介して分子が発電する」というのは実験でこのように評価できると明確化し、それによって将来、分子レベルで供給される電気エネルギーを分子モーターなどで直接用いる新しいエレクトロニクス領域 (仮に分子静電気エレクトロニクスと呼んだ) の実現をねらった。以上のことを背景として、本研究を提案した。

2. 研究の目的

摩擦（トライボ）発電は、新材料・新プロセスの研究開発により急速に発電面密度が向上し、新しい発電源として期待されている。一方で、発電そのもののとらえ方は、従来の静電的手法で培われてきた摩擦帯電列の延長線上にある場合が多い。本研究では、静電気源としての摩擦帯電ではなく、電流を起こす発電源として摩擦電気を捉えなおし、新しく発電材料として求められる物性は何かを、誘電物理の立場から明確化する。

誘電分極現象として摩擦電気の起こす電流を捉えなおせば、静電気帯電現象の場合の電荷変位に並んで、双極子回転が分子レベルでの発電源の候補である（図1）。しかし、電荷と双極子は、それらがつくる電界そのものとしては見分けがつかない。このため、従来の静電的手法では、発電の分子的起源が電荷と双極子のどちらであるのかを明確化するには制限がある。この状況は、たとえ走査型顕微鏡のようにナノメートルオーダの分解能を備えても課題として残る。そこで、本研究の目的を、従来の静電手法にない、光学手法のレーザー光波長選択性を活かして、摩擦発電の2つの分子的起源を峻別できる世界初の手法を確立することとした。これにより、従来の静電的測定法の制約を克服した摩擦発電の分子的起源の評価を実現し、摩擦発電を分子レベルでの発電源とする、新しいエレクトロニクス、『分子静電気エレクトロニクス』の実現へ向けた材料評価基盤を構築することが本研究の目的である。

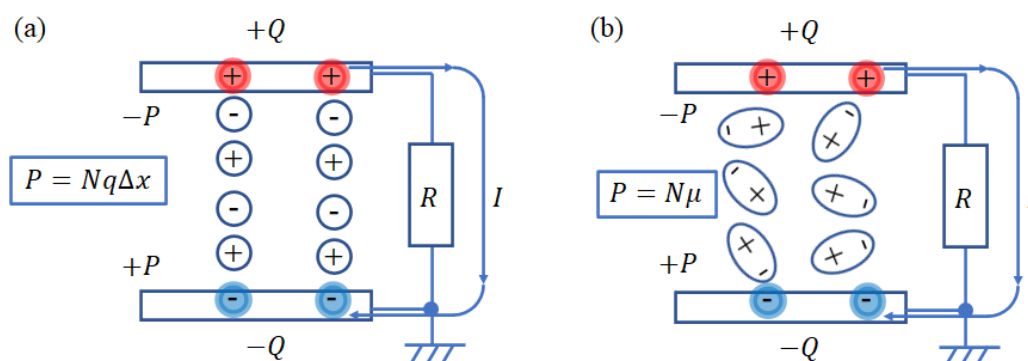


図1 2つの発電の分子的起源、(a)電荷変位 $q\Delta x$ と(b)双極子 μ の回転。2つの起源による分極電荷 P とにより誘起される電極電荷 Q が負荷 R を電流 I として流れて電氣的仕事をする。

3. 研究の方法

研究の目的を達成するために、静電的手法に対する光学手法の特徴をふまえて、3つのキーワード「実空間」「時間」「エネルギー空間」で研究を進めた。

(A) 「実空間」・・・静電手法では摩擦発電の2つの分子的起源である「電荷変位」「双極子回転」を見分けることには制限がある。光学手法のレーザー光波長選択性を利用して解決する（図2）。具体的には永久双極子をもつ PMDA-ODA ポリイミドと、永久双極子をもたないポリエチレンに着目して実験を進める。PMDA-ODA ポリイミドの2つの発電の分子的起源を測定するレーザー波長を実験で特定し、2つの波長で顕微観察を行い、発電の分子的起源ごとの実空間分布を可視化する。

(B) 「時間」・・・静電的手法の応答速度は 1 ms 程度で制限されている。短パルスレーザーで光学評価として摩擦発電測定を実現することで、ナノ秒～ミリ秒の時間分解測定を実現する。まず、パルスレーザー発振と摩擦のための機械的変位を同期させる機構を作製する。そして、実際に摩擦発電の時間分解測定を行う。

(C) 「エネルギー空間」・・・光学的評価と熱刺激電流測定で決めた活性化エネルギーを合わせて議論することで、摩擦発電と分子の電子エネルギー構造との関係を明確化する。そのために、分子軌道法により摩擦による分子変形が、電子軌道エネルギーをどのように変えるのかを計算して議論する。

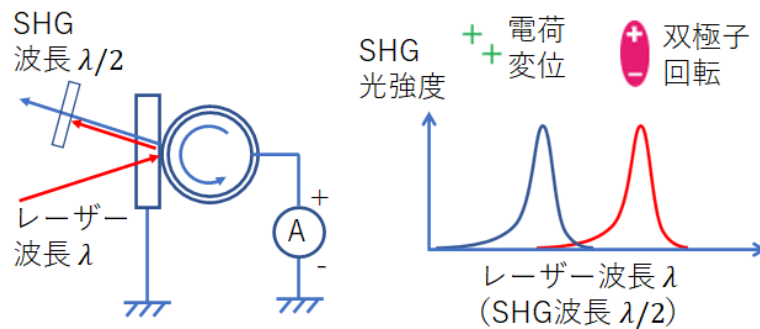


図2 光学的手法 (SHG 測定) によるレーザー光波長選択性を利用した発電の分子的起源「電荷変位」と「双極子回転」の選択的測定のイメージ

4. 研究成果

(4-1) (研究の方法 (A) に対応) 摩擦発電する材料のうち、PMDA-ODA 型ポリイミド (レーザー波長 1140 nm : SHG 波長 570 nm), ポリエチレン (レーザー波長 540 nm : SHG 波長 270 nm), ポリエチレンテレフタレート (レーザー波長 570 nm : SHG 波長 285 nm) の SHG 測定を行い、電荷変位を発電の分子的起源とする場合を評価することができるレーザー波長と SHG 波長を実験で決めた。更に分子軌道法による電子軌道エネルギーに基づき、非線形感受率テンソル成分の波長依存性を計算して、電荷変位 ($\chi^{(3)}(-2\omega; 0, \omega, \omega)$) と双極子回転 ($\chi^{(2)}(-2\omega; \omega, \omega)$) の SHG が現れる波長として実験結果が妥当であることも確認した。ポリイミドについては研究途中でグループ内で合成することができる体制とし、以降合成した試料で測定を進めた。そして、PMDA-ODA 型ポリイミドの双極子回転を発電の分子的起源とする場合を評価する条件 (レーザー波長 570 nm、SHG 波長 285 nm) を決めた。以上の成果から、PMDA-ODA ポリイミドについて、2つの発電の分子的起源の両方を、レーザー光波長を変えることで選択的に顕微観察することに成功し、雑誌上で発表した (D. Taguchi, T. Manaka, M. Iwamoto, APL, 2019)。2つの発電の分子的起源「電荷の変位」「双極子回転」を別々の波長で可視化し、それらの実空間分布に特徴的なスケールが μm オーダーと mm オーダーで異なることも報告した。空間分解能は SHG 波長の回折限界で決まることが当然予想されるが、実際に実験でも確認した。さらに当初計画になかった内容であるが、電荷変位について、正電荷・負電荷の電荷極性も測定から決定できる手法を考案し、実現した (D. Taguchi, T. Manaka, M. Iwamoto, IEICE Trans. Electron., 2021)。本手法は、SHG 測定で従来 local oscillator との干渉で分子配向を決める手法として知られるものを静電気の極性決定に応用して実現した。

(4-2) (研究の方法 (B) (C) に対応) パルスレーザーと摩擦を同期させることで、時間分解測定を実現した。初めに、摩擦のための変位を、ピエゾによる方法、直動コイルによる方法、回転機による方法を試みた上で、時間応答が速いピエゾで行うことと決め、摩擦発電しながら SHG 測定を行う評価系を構築した。ピエゾの変位をナノ秒パルス

レーザー（繰り返し周期 10 Hz）及びフェムト秒レーザー（繰り返し周期 1 kHz）と同期させることで時間分解測定を実現した。双極子回転を発電の分子的起源とする摩擦発電に着目し、永久双極子のある PMDA-ODA ポリイミドと無極性の PMDA-MDA ポリイミドを合成して比較した。熱刺激電流測定を PMDA-ODA ポリイミドについて実施し、双極子回転による発電で電気を生み出す速さとしての誘電緩和時間の評価を行った。また、安定した環境で摩擦発電を評価できる測定チャンバを構築した。室温～250℃までの温度一定の乾燥窒素雰囲気において摩擦発電の評価ができる。分子軌道エネルギーと摩擦発電の関係を明らかにするため、分子軌道法を用いて、分子変形によるエネルギー準位の変化を検討し、これにより外部回路に流れるマクスウェル変位電流を有限要素法を用いたシミュレータで計算した。

（4-3）材料評価基盤の実現を目的として研究を進める中で、摩擦発電に限定することなく、一般的に誘電体に蓄えられる分極エネルギーが脱分極過程で外部負荷に電気エネルギーを供給する発電源として、発電機構をモデル化できるとの着想を得た。そして、モデル化に成功して発表を行い、APL 誌に Featured Article として掲載された (D. Taguchi, T. Manaka, M. Iwamoto, APL, 2021)。このモデルによれば、電気回路の発電源の等価回路素子（電流源 I_s と内部抵抗 R_i ）を誘電物性パラメータ（初期分極量 P_0 、静電容量 C_s 、誘電緩和時間 τ ）で表し、材料物性と電気回路での表現を橋渡しできる。言い換えると、摩擦発電を静電気現象ではなく、分極エネルギーが外部負荷に電氣的仕事をする動電気現象として扱い、材料物性のどこを変えれば、発電源としての電流源と内部抵抗にどのように現れるのかを明確化した。本モデルは摩擦発電だけではなく、いろいろな物理的刺激（光、熱、相転移）による発電現象のモデルとなり得る。本研究での成果を発展させ、物理的刺激一般の分極エネルギーを発電源とする現象を包括する形で体系化すべく、今後研究を発展させていく。現在、太陽電池によらない光刺激による発電、熱電変換によらない熱刺激による発電などについて、実験と理論の両面から更に研究を進めている。

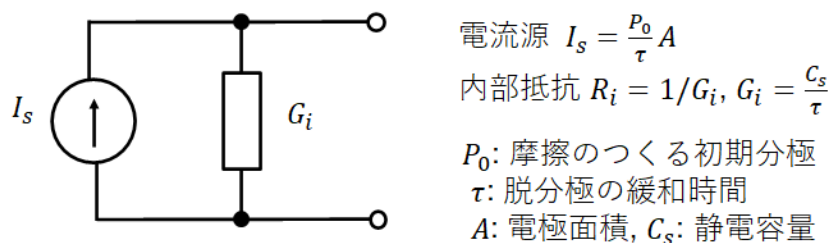


図3 誘電分極エネルギーを外部負荷に供給する発電源として摩擦発電をモデル化した発電源の等価回路。

以上の成果について、研究期間を通じて国内会議、国際会議、雑誌論文で発表した。また、誘電物理に基づく新評価法確立の観点から、マクスウェル変位電流及び光第2次高調波発生法の考え方と具体的な評価例（誘電体・絶縁体、水面上単分子膜と有機エレクトロニクス素子、摩擦発電の分子的起源の選択的評価までの内容）について図書にまとめ、出版した (M. Iwamoto, D. Taguchi, Maxwell Displacement Current and Optical Second Harmonic Generation: Analysis and experiment for Organic Electronics, World Scientific, Singapore, June 2021.)。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計20件（うち査読付論文 19件 / うち国際共著 4件 / うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Taguchi Dai, Manaka Takaaki, Iwamoto Mitsumasa	4. 巻 119
2. 論文標題 (Featured Article) Dipolar polarization as an energy source of tribo-electric power generator	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 053302 ~ 053302
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0058597	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 TAGUCHI Dai, MANAKA Takaaki, IWAMOTO Mitsumasa	4. 巻 E104.C
2. 論文標題 Visualizing Positive and Negative Charges of Triboelectricity Generated on Polyimide Film	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Electronics	6. 最初と最後の頁 170 ~ 175
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/transele.2020OMP0001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 田口大, 間中孝彰, 岩本光正	4. 巻 J103-C
2. 論文標題 (招待論文) 光第2次高調波発生 (SHG) による摩擦発電の電荷と双極子の評価	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 電子情報通信学会論文誌C	6. 最初と最後の頁 395 ~ 402
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Ahmad Zubair, Mishra Arti, Abdulrahim Sumayya M., Taguchi D., Sanghyun Paek, Aziz Fakhra, Iwamoto M., Manaka T., Bhadra Jolly, Al-Thani Noora J., Nazeeruddin Mohammad Khaja, Touati Farid, Belaidi Abdelhak, Al-Muhtaseb Shaheen A.	4. 巻 11
2. 論文標題 Consequence of aging at Au/HTM/perovskite interface in triple cation 3D and 2D/3D hybrid perovskite solar cells	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 33/1 ~ 33/11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-020-79659-3	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Alrougy Ibrahim M., Taguchi Dai, Manaka Takaaki	4. 巻 32
2. 論文標題 Effect of 1,8-Diiodooctane additive on the charge carriers behavior in the PCPDTBT:PC71BM BHJ films investigated by using electric-field-induced optical second-harmonic generation measurement	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Materials Science: Materials in Electronics	6. 最初と最後の頁 2845 ~ 2852
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10854-020-05037-4	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Manaka Takaaki, Taguchi Dai, Chiang Tai-Chin	4. 巻 217
2. 論文標題 Visualization of Carrier Transport in Luminescent Polymer Thin Film by Using Transient Photoluminescence Decay Imaging	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 physica status solidi (a)	6. 最初と最後の頁 1901031 ~ 1901031
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/pssa.201901031	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Ahmad Zubair, Taguchi D., Paek Sanghyun, Mishra Arti, Bhadra Jolly, Iwamoto M., Manaka T., Nazeeruddin Mohammad Khaja	4. 巻 17
2. 論文標題 Detection of voltage pulse width effect on charge accumulation in PSCs using EFISHG measurement	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Results in Physics	6. 最初と最後の頁 103063 ~ 103063
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.rinp.2020.103063	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Dai Taguchi, Takaaki Manaka, Mitsumasa Iwamoto	4. 巻 114
2. 論文標題 Imaging of triboelectric charge distribution induced in polyimide film by using optical second-harmonic generation: Electronic charge distribution and dipole alignment	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 233301/1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5094171	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Lei Lei Yin Win, Dai Taguchi, Takaaki Manaka	4. 巻 58
2. 論文標題 Direct Observation of Carrier Transport in Organic-Inorganic Hybrid Perovskite Thin Film by Transient Photoluminescence Imaging Measurement	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SBBG18/1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/1347-4065/ab027c	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Lei Lei Yin Win, Dai Taguchi, Takaaki Manaka	4. 巻 75
2. 論文標題 Transient carrier visualization of organic-inorganic hybrid perovskite thin films by using time-resolved microscopic second-harmonic generation (TRM-SHG)	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Organic Electronics	6. 最初と最後の頁 105416/1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.orgel.2019.105416	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Taishi Noma, Dai Taguchi, Takaaki Manaka, Mitsumasa Iwamoto	4. 巻 686
2. 論文標題 Study of I-V hysteresis of tin perovskite solar cells using capacitance-voltage measurement coupled with charge modulation spectroscopy	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Molecular Crystals and Liquid Crystals	6. 最初と最後の頁 92-98
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/15421406.2019.1648042	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 TAGUCHI Dai, MANAKA Takaaki, IWAMOTO Mitsumasa, SAKUMA Kazuko, WATARIGUCHI Kaname, KAWAHARA Masataka	4. 巻 E102.C
2. 論文標題 Probing Internal Electric Field in Organic Photoconductors by Using Electric-Field-Induced Optical Second-Harmonic Generation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Electronics	6. 最初と最後の頁 113 ~ 118
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/transele.2018OMP0002	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Noma Taishi, Taguchi Dai, Manaka Takaaki, Iwamoto Mitsumasa	4. 巻 124
2. 論文標題 Modeling and analysis of I-V hysteresis behaviors caused by defects in tin perovskite thin films	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 175501 ~ 175501
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5050557	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ahmad Zubair, Noma Taishi, Paek Sanghyun, Cho Kyung Taek, Taguchi Dai, Iwamoto Mitsumasa, Manaka Takaaki, Nazeeruddin Mohammad Khaja, Touati Farid, Al-Muhtaseb Shaheen A.	4. 巻 66
2. 論文標題 Stability in 3D and 2D/3D hybrid perovskite solar cells studied by EFISHG and IS techniques under light and heat soaking	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Organic Electronics	6. 最初と最後の頁 7 ~ 12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.orgel.2018.12.009	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 ALROUGY Ibrahim M., TAGUCHI Dai, MANAKA Takaaki	4. 巻 E102.C
2. 論文標題 Spectroscopic Study of Electric Field Induced Optical Second Harmonic Generation from PCPDTBT and PC₇₁BM Thin Films	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Electronics	6. 最初と最後の頁 119 ~ 124
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/transele.2018OMP0007	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 SADAKATA ATSUO, TAGUCHI DAI, MANAKA TAKAAKI, IWAMOTO MITSUMASA	4. 巻 100
2. 論文標題 A Novel Microscopic Analyzing System for Characterizing Organic Light-Emitting Diodes Using EFISHG and LBIC Measurements	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Electronics and Communications in Japan	6. 最初と最後の頁 76 ~ 83
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/ecj.12017	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 貞方 敦雄、田口 大、間中 孝彰、岩本 光正	4. 巻 137
2. 論文標題 EFISHGおよびLBIC測定を用いた有機EL素子の顕微解析装置の開発	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 電気学会論文誌A (基礎・材料・共通部門誌)	6. 最初と最後の頁 128 ~ 134
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejfms.137.128	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Chauhan A. K., Gupta S. K., Taguchi D., Manaka T., Jha P., Veerender P., Sridevi C., Koiry S. P., Gadkari S. C., Iwamoto M.	4. 巻 7
2. 論文標題 Enhancement of the carrier mobility of conducting polymers by formation of their graphene composites	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 RSC Advances	6. 最初と最後の頁 11913 ~ 11920
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/c6ra26195g	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Otsuka Takako, Taguchi Dai, Manaka Takaaki, Iwamoto Mitsumasa	4. 巻 122
2. 論文標題 Direct visualization of polarization reversal of organic ferroelectric memory transistor by using charge modulated reflectance imaging	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 185501 ~ 185501
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5004002	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Iwamoto Mitsumasa, Taguchi Dai	4. 巻 57
2. 論文標題 (Progress Review) Research trend in thermally stimulated current method for development of materials and devices in Japan	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 03EA04 ~ 03EA04
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/JJAP.57.03EA04	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計45件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 15件）

1. 発表者名 田口大, 間中孝彰, 岩本光正
2. 発表標題 Poly(vinylidene fluoride-trifluoro ethylene)の 自発分極による摩擦発電
3. 学会等名 2021年電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田口 大, 間中 孝彰, 岩本 光正
2. 発表標題 永久双極子をもつポリイミド (PMDA-ODA) ともたないポリイミド (PMDA-MDA) の摩擦発電のI-V特性の評価
3. 学会等名 2021年 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山岡 祐太, 田口 大, 間中 孝彰
2. 発表標題 絶縁層/有機半導体層の同時成膜による低しきい値, 高移動度トランジスタの作製
3. 学会等名 2021年 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 下澤 敬仁, 田口 大, 間中 孝彰
2. 発表標題 時間分解電界誘起光第二次高調波発生法を用いた銅フタロシアニン/MoO ₃ 界面における励起子およびキャリアダイナミクスの評価
3. 学会等名 2021年 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田口大, 間中孝彰, 岩本光正
2. 発表標題 第2次光高調波発生の局所発振との干渉を用いた トライボ発電層 (カプトン型ポリイミド) の摩擦電気の可視化 ~ 正負の極性を分けた可視化 ~ 2
3. 学会等名 2020年 第81回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田口大, 間中孝彰, 岩本光正
2. 発表標題 光第2次高調波発生 (SHG) 法による 摩擦発電層 (PMDA-ODA) の 双極子と電荷の面内角度依存性の測定 2
3. 学会等名 2020年電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山岡 祐太, 田口 大, 間中 孝彰
2. 発表標題 異なる結晶多型をもつTIPSペンタセン薄膜におけるキャリア輸送特性
3. 学会等名 2020年 第81回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Dai Taguchi, Takaaki Manaka and Mitsumasa Iwamoto
2. 発表標題 Visualizing positive and negative charges of triboelectricity generated on polyimide film
3. 学会等名 11th International Symposium on Organic Molecular Electronics (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田口大, 間中孝彰, 岩本光正
2. 発表標題 光第2次高調波発生 (SHG) 測定による摩擦電気の正電荷と負電荷の可視化
3. 学会等名 2019年電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田口大, 間中孝彰, 岩本光正
2. 発表標題 第2次光高調波発生法によるトライボ発電層 (カプトン型ポリイミド) の摩擦電気の可視化 摩擦電気の電荷変位と双極子配向の選択的測定
3. 学会等名 2019年 第80回 応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田口大, 間中孝彰, 岩本光正
2. 発表標題 光第2次高調波発生 (SHG) 法による摩擦発電層 (PMDA-ODA) の双極子と電荷の面内角度依存性の測定
3. 学会等名 2020年電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田口大, 間中孝彰, 岩本光正
2. 発表標題 第2次光高調波発生の局所発振との干渉を用いたトライボ発電層 (カプトン型ポリイミド) の摩擦電気の可視化 ~ 正負の極性を分けた可視化 ~
3. 学会等名 2020年 第67回 応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山岡祐太, 田口大, 間中孝彰
2. 発表標題 相分離法により作製したTIPSペンタセンFETの特性と溶媒依存性
3. 学会等名 2020年 第67回 応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Ibrahim Alrougy, Dai Taguchi, Takaaki Manaka
2. 発表標題 Investigation of 1,8-Diiodooctane (DIO) Additive Effect on Carrier Transport in Bulk Heterojunction Organic Solar Cell by EFISHG
3. 学会等名 Compound Semiconductor Week 2019 (CSW 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Lei Lei Yin Win, Dai Taguchi, Takaaki Manaka
2. 発表標題 Visualization of Carrier Transport in Organic-Inorganic Perovskite Field Effect Transistor by Electric Field Induced Optical Second-Harmonic Generation (EFISHG)
3. 学会等名 Compound Semiconductor Week 2019 (CSW 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田口大, 間中孝彰, 岩本光正
2. 発表標題 電界誘起光第2次高調波発生法によるトライボ発電層(カプトン型ポリイミド)の摩擦電気発生時間の時間分解測定
3. 学会等名 2019年 第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田口大, 間中孝彰, 岩本光正
2. 発表標題 電界誘起第2次光高調波発生測定による外部電圧印加で負帯電させた摩擦発電層 (PMDA - ODAポリイミド) の顕微観察
3. 学会等名 2019年電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田口大, 間中孝彰, 岩本光正
2. 発表標題 電界誘起第2次光高調波発生測定による外部電圧印加で帯電させた摩擦発電層 (PMDA-ODAポリイミド) の電界可視化
3. 学会等名 2018年電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 田口大, 間中孝彰, 岩本光正
2. 発表標題 電界誘起光第2次高調波発生法によるトライボ発電層 (カプトン型ポリイミド) の摩擦電気の顕微観察
3. 学会等名 2018年 第79回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Dai Taguchi, Takaaki Manaka, Mitsumasa Iwamoto, Kazuko Sakuma, Kaname Watariguchi, and Masataka Kawahara
2. 発表標題 Probing internal electric field in organic photoconductors by using electric-field-induced optical second-harmonic generation
3. 学会等名 10th International symposium on Organic Molecular Electronics (ISOME 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Dai Taguchi, Takaaki Manaka, Mitsumasa Iwamoto
2. 発表標題 Visualizing distribution of triboelectric charge on PMDA-ODA polyimide film by using optical second-harmonic generation imaging technique
3. 学会等名 10th International symposium on Organic Molecular Electronics (ISOME 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Taishi Noma, Dai Taguchi, Takaaki Manaka, Mitsumasa Iwamoto
2. 発表標題 Analysis of hysteresis behavior of tin perovskite solar cells using electric-field-induced optical second-harmonic generation measurement
3. 学会等名 3rd Electron Devices Technology and Manufacturing (EDTM) Conference 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松尾魁士, 田口大, 間中孝彰
2. 発表標題 時間分解光第二次高調波発生法を用いたC60/CuPc界面における励起子およびキャリアダイナミクス評価
3. 学会等名 2019年 第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 野間大史, 田口大, 間中孝彰, 岩本光正
2. 発表標題 電荷変調分光法による錫ペロブスカイト薄膜のトラップ準位の評価
3. 学会等名 2018年 第79回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 吉原興宙, 長谷川司, 芦沢実, 田口大, 松本英俊, 間中孝彰
2. 発表標題 自己組織化単分子膜の光誘起分子内電子移動による有機薄膜太陽電池の特性変化
3. 学会等名 2018年 第79回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Lei Lei Yin Win, Dai Taguchi, Takaaki Manaka
2. 発表標題 Visualization of Carrier Transport in Organic-Inorganic Hybrid Perovskite Thin Film by Photoluminescence Decay Method
3. 学会等名 2018 International conference on solid state devices and materials (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Taishi Noma, Dai Taguchi, Takaaki Manaka, Mitsumasa Iwamoto
2. 発表標題 Study of Ion Migration in $\text{CH}(\text{NH}_2)_2\text{SnI}_3$ Thin Films Using Electric-Field-Induced Optical Second-Harmonic Generation Measurement
3. 学会等名 2018 International conference on solid state devices and materials (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Ibrahim Alrougy, Dai Taguchi, Takaaki Manaka
2. 発表標題 Investigation of PEDOT: PSS Insertion Effect on Carrier Transport in PCPDTBT: PC71BM Bulk Heterojunction Organic Solar Cell by EFISHG
3. 学会等名 2018 International conference on solid state devices and materials (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Koji Hatano, Dai Taguchi, Takaaki Manaka, Mitsumasa Iwamoto
2. 発表標題 Direct imaging of ambipolar carrier injection and transport processes in organic light-emitting transistor by using time-resolved microscopic electric-field-induced optical second-harmonic generation measurement
3. 学会等名 19th International Workshop on Inorganic and Organic Electroluminescence & 2018 International Conference on the Science and Technology of Emissive Displays and Lighting (EL2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Taishi Noma, Dai Taguchi, Takaaki Manaka and *Mitsumasa Iwamoto
2. 発表標題 Study of I-V hysteresis of tin perovskite thin films using capacitance-voltage measurement coupled with charge modulation spectroscopy
3. 学会等名 The 2018 KJF International Conference on Organic Materials for Electronics and Photonics(KJF-ICOMEF 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Ibrahim Alrougy, Dai Taguchi, Takaaki Manaka
2. 発表標題 Spectroscopic study of electric field induced optical second harmonic generation from PCPDTBT and PC71BM thin films
3. 学会等名 10th International symposium on Organic Molecular Electronics (ISOME 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Taishi Noma, Dai Taguchi, Takaaki Manaka, Mitsumasa Iwamoto
2. 発表標題 Study of hysteresis behaviors caused by ionic motion in tin perovskite thin films
3. 学会等名 10th International symposium on Organic Molecular Electronics (ISOME 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 田口大、間中孝彰、岩本光正
2. 発表標題 第2次光高調波発生法によるトライボ発電層（PMDA-ODA型ポリイミド）の配向分極の選択的評価
3. 学会等名 第78回応用物理学会 秋季学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 田口大、間中孝彰、岩本光正
2. 発表標題 トライボ発電層（ポリエチレンテレフタレート）に形成する静電界の電界誘起第2次光高調波発生測定
3. 学会等名 2017年電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 田口大、間中孝彰、岩本光正
2. 発表標題 電界誘起光第2次高調波発生法によるトライボ発電層（カプトン型ポリイミド）の摩擦電気の可視化
3. 学会等名 第65回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Taishi Noma, Dai Taguchi, Takaaki Manaka, Mitsumasa Iwamoto
2. 発表標題 Probing electric-field-induced optical second-harmonic generation from tin perovskite $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{SnI}_3$ films
3. 学会等名 9th International Conference on Molecular Electronics and Bioelectronics (M&BE9) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Taishi Noma, Dai Taguchi, Takaaki Manaka, Mitsumasa Iwamoto
2. 発表標題 Probing internal electric field in tin perovskite films by electric-field-induced optical second-harmonic generation measurement
3. 学会等名 The 2017 KJF International Conference on Organic Materials for Electronics and Photonics (KJF-ICOMEF 2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 藤生駿佑、田口大、間中孝彰
2. 発表標題 P3HT:PCBM逆型バルクヘテロ接合太陽電池の光照射による開放電圧上昇と電界誘起光第2次高調波発生法(EFISHG)による内部電界の選択的測定
3. 学会等名 第78回応用物理学会 秋季学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 廣谷瞭、野間大史、田口大、間中孝彰
2. 発表標題 鉛ペロブスカイト層から発生するEFISHG信号の外部電圧依存性
3. 学会等名 第78回応用物理学会 秋季学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 野間大史、田口大、間中孝彰、岩本光正
2. 発表標題 錫ペロブスカイトから発生する電界誘起光第2次高調波の電界依存性の検討
3. 学会等名 第78回応用物理学会 秋季学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 土屋春樹、田口大、間中孝彰
2. 発表標題 DA型共重合体配向膜における光学・電氣的異方性の相關の評価
3. 学会等名 2017年電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 藤生駿佑、田口大、間中孝彰
2. 発表標題 電界誘起光第二次高調波発生(EFISHG)測定とC-f測定を用いたパルクヘテロ接合太陽電池の光照射効果による空乏層形成
3. 学会等名 第65回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 松尾魁士、田口大、間中孝彰
2. 発表標題 時間分解光第二次高調波発生法を用いた有機ドナー/アクセプタ界面における励起子およびキャリアダイナミクス評価
3. 学会等名 第65回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 野間大史、田口大、間中孝彰、岩本光正
2. 発表標題 電界誘起光第2次高調波発生法による錫ペロブスカイト太陽電池の内部電界評価
3. 学会等名 第65回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 土屋春樹、田口大、間中孝彰
2. 発表標題 DA型共重合体配向膜における光学・電氣的異方性の相關評価
3. 学会等名 第65回応用物理学会春季學術講演会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Mitsumasa Iwamoto, Dai Taguchi	4. 発行年 2021年
2. 出版社 World Scientific, Singapore	5. 総ページ数 512
3. 書名 Maxwell Displacement Current and Optical Second Harmonic Generation: Analysis and experiment for Organic Electronics	

〔産業財産権〕

〔その他〕

T2R2東京工業大学リサーチポジトリ http://t2r2.star.titech.ac.jp/

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	間中 孝彰 (Manaka Takaaki) (20323800)	東京工業大学・工学院・教授 (12608)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	岩本 光正 (Iwamoto Mitsumasa) (40143664)	東京工業大学・教育・国際連携本部・特任教授 (12608)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関