

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 5 月 31 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2020

課題番号：18K13495

研究課題名(和文)CDW-Mott系における非平衡状態ランドスケープの理論研究

研究課題名(英文)Theoretical study on nonequilibrium-state landscape in CDW-Mott systems

研究代表者

池田 達彦 (Ikeda, Tatsuhiko)

東京大学・物性研究所・助教

研究者番号：60780583

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)：層状物質の遷移金属ダイカルコゲナイドTaS<sub>2</sub>およびTaSe<sub>2</sub>の電荷密度波状態およびその派生問題の理論研究を行った。微視的理論については、これらの物質をよく表すモデルを構築し、レーザー印加による電荷密度波の融解と格子変形の様子を明らかにした。現象論については、従来の自由エネルギーの詳細な解析によって、これまで知られていなかった極小点を発見し、これが実験で見られる準安定状態と似た構造を持つことを示した。さらにこれを時間依存に拡張し、電荷密度波状態の相転移ダイナミクスの時空間構造を調べる理論を構築した。派生問題として、電荷密度波と高次高調波発生の関係や、時間結晶の新しい生成メカニズムを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

1T-TaS<sub>2</sub>の光誘起初期ダイナミクスの理論計算については、類似の研究がほとんどなく、この物質の非平衡現象を解明する上で一つの貢献になった。現象論で見出した極小点および時間依存理論の構築については、伝統的な自由エネルギー理論に内在していた強力な予言能力に光を当て、最新の実験結果への適用可能性を示すものであり、今後の層状物質の研究に役立つものと思われる。高次高調波発生については、電荷密度波がこれを増強することが分かり、周波数変換素子への応用に繋がる可能性がある。時間結晶については、電荷密度波との類似性が明らかになったことで、物理学における時間と空間の等価性の現れの1つであり大変興味深い。

研究成果の概要(英文)：The charge density wave states of the layered transition metal dichalcogenides TaS<sub>2</sub> and TaSe<sub>2</sub> and their derived problems were theoretically studied. For the microscopic theory, we constructed a model that well represents these materials and clarified the melting and lattice deformation of the charge density wave induced by laser application. As for the phenomenology, we discovered previously unknown minimal points by detailed analysis of the conventional free energy, and showed that they correspond to structures similar to the metastable states observed experimentally. By extending this theory to a time-dependent one, we have developed a theory to investigate the spatio-temporal structure of the phase transition dynamics of charge density wave states. As derivative problems, we clarified the relationship between charge density waves and high-harmonic generation, and a new generation mechanism of time crystals.

研究分野：物性理論

キーワード：電荷密度波 自由エネルギー 光誘起相転移 光物性 遷移金属ダイカルコゲナイド 非平衡現象 時間結晶

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 1. 研究開始当初の背景

遷移金属ダイカルコゲナイドは、様々な電荷密度波 (CDW) を示す物質群として興味を持たれ、その構造相転移について 1970 年代以降、研究されてきた。しかし近年、走査型トンネル顕微鏡 (STM) や角度分解光電子分光 (ARPES) などにより、実および波数空間における電子構造測定が可能になったこと、pump-probe 分光法により非平衡状態への励起と緩和の観察が可能になったこと、などにより再注目されている。

中でも、温度を変化させるだけで 3 種 (commensurate, nearly commensurate, incommensurate) もの CDW 相を示す (1T)-TaS<sub>2</sub> は、予期せぬ非平衡状態をも隠し持っていることが近年分かってきた。たとえば、レーザーパルスを照射し、3 種いずれの平衡状態とも異なる「隠れた状態」への転移が発見され、これが 1 週間以上も安定なことや CDW 長距離秩序を持つことが明らかにされた。また電圧パルスと冷却を用いた実験研究でも平衡状態と異なる「隠れた状態」への転移が発見されている。また TaSe<sub>2</sub> など遷移金属ダイカルコゲナイドに属する他の物質においても様々な研究が行われている。

この「隠れた状態」は非常に安定で、高速かつ可逆にスイッチングが可能なことから産業応用への期待もあるが、状態の特徴付けや相転移過程の理解は十分に進んでいない。

## 2. 研究の目的

本研究の主な目的は、この「隠れた状態」を含む状態の地平 (ランドスケープ) を理論的に調べ、それらの間の相転移のメカニズムを明らかにすることである。具体的には、平衡状態、光誘起初期ダイナミクス、準安定状態間の転移、という時間スケールの異なる 3 つの課題に取り組む。

## 3. 研究の方法

### (1) 微視的理論

TaS<sub>2</sub> のバンド構造を再現する経験的強束縛模型に電子間相互作用を加えたハバード模型によって電子の微視的状态を記述する。また CDW 転移を表すために、フォノンとの相互作用を追加する。レーザーとの相互作用を標準的な方法で追加する。

### (2) ランダウの自由エネルギー理論

McMillan [PRB 12, 1187 (1975)] は遷移金属ダイカルコゲナイドのランダウ理論を構築し、incommensurate および commensurate 相が再現出来ることを示した。中西と斯波 [JPSJ 43, 1839 (1977)] は、このランダウ理論をより詳細に解析した結果、この理論が実は nearly commensurate 相を既に含んでいることを示した。この理論を更に詳細に解析し、隠れた相など平衡状態にはない状態の存在を調べる。またこれを時間依存理論に拡張し、相転移のダイナミクスを解析する。

## 4. 研究成果

### (1) 1T-TaS<sub>2</sub> レーザー誘起ダイナミクスの理論

平均場近似の範囲内で、1T-TaS<sub>2</sub> の基底状態を定性的に再現することに成功した。この状態は絶縁体であり実験事実と整合する (格子変形を伴った基底状態の配位は図 1 を参照)。

さらにこの理論を用いて、強いレーザー照射で引き起こされる電子・格子のダイナミクスを調べた。レーザー電場強度を

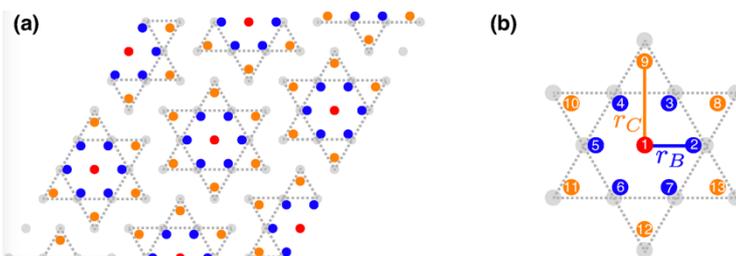


図 1 : (a) commensurate 相の格子配置。13 個の Ta 原子が星状の単位胞を形成する。(b) 単位胞内の各原子位置のナンバリング。文献 [1] より。

十分強くすると10フェムト秒程度の短時間で電荷密度波秩序が融解すること、また長時間領域では格子変形の振動に追従して電荷密度が変動することを示した(図2を参照)。

1T-TaS<sub>2</sub>の光誘起初期ダイナミクスの理論計算はこれまでにほとんど無く、この物質の非平衡現象を解明する上で、一つの貢献になった。この研究成果はAppl. Sci.誌に掲載された(参考文献[1])

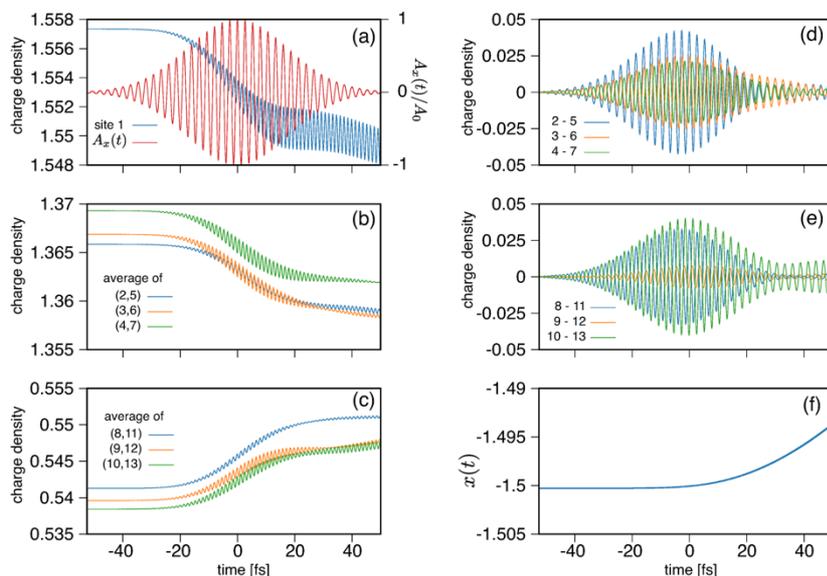


図2: (a-e) 単位胞中の各サイトにおける電子密度の時間発展。(a)にはレーザーのベクトルポテンシャルの時間波形を示し、(b,c)は対になる2サイトの電子密度の平均、(d,e)には電子密度差を示す。(f)は格子変形の大きさの時間変化を示す。文献[1]より。

(2) 遷移金属ダイカルコゲナイドの自由エネルギーランドスケープ

本研究では1970年代にMcMillan-中西-ス波によって定式化された自由エネルギーを現代の計算資源を活かして広範に探索し、これまで知られていなかった様々な自由エネルギーの極小値を発見した。具体的には、秩序変数の変分パラメータの追加および先行研究で計算簡略化のために課されていた拘束条件の緩和を行った(図3参照)。こうして発見した極小値に対応する電荷密度波状態を調べることによって、これらが実験で知られていた準安定状態(TaS<sub>2</sub>のT相およびTaSe<sub>2</sub>のストライプ相)に類似していることを明らかにした。

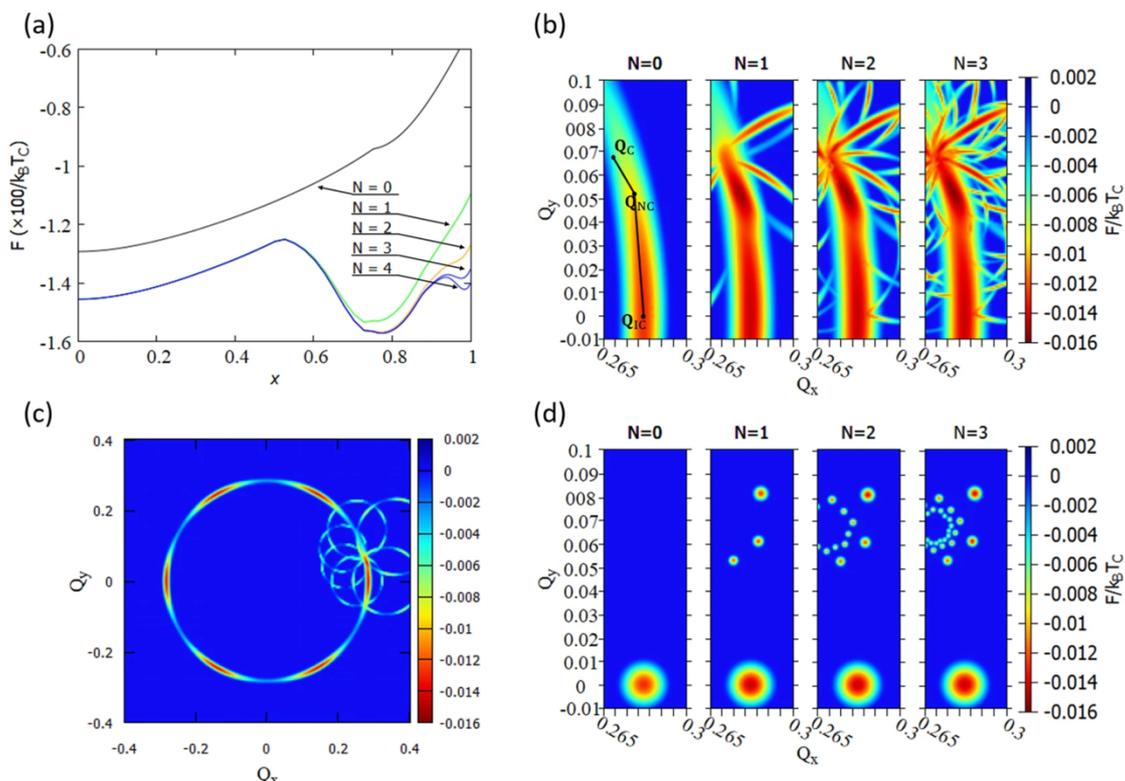


図3: 自由エネルギーの極小構造。(a) 中西・ス波の結果の再現。秩序変数空間中のある線上に沿った自由エネルギーで計算を正確にする(考慮する高調波の数Nを増やす)と極小点が現れる。(b-d) 秩序変数空間中のある2次元領域における自由エネルギー。計算を正確にすると、これまで知られていなかった様々な極小点が潜んでいたことが明らかになった。文献[2]より。

本研究で用いた自由エネルギーは 2 次元空間上の理論であることは注目に値する。これまでの研究では、上述の準安定状態の起源の 1 つとして層状物質の異なる層間の相互作用(従って物質のわずかな 3 次元性)が重要と考えられていた。本研究の成果はこの説に反して、2 次元空間であっても準安定状態が生じうることを意味し、準安定状態の起源に対して新たな知見をもたらした意義がある。また、この 2 次元空間中での準安定状態は最近の実験とも整合する。ごく最近、単層(完全な 2 次元)を含む遷移金属ダイカルコゲナイド薄膜の実験が進展しており、これらにおいても準安定状態を含む様々な電荷密度波状態が観測されている。

本研究で得られた結果は、伝統的な自由エネルギー理論に内在していた強力な予言能力に光を当て、最新の実験結果への適用可能性を示すものであり、今後の層状物質の研究に役立つものと思われる。本研究成果は Sci. Rep. 誌に掲載された(参考文献[2])

### (3) 電荷密度波状態の相転移ダイナミクス

上述の(2)によって、そのランドスケープを詳しく明らかにした自由エネルギーをもとにして、時間依存理論への拡張を行った。これによって TaS<sub>2</sub> や TaSe<sub>2</sub> などの層状(2 次元)物質における電荷密度波状態の非平衡ダイナミクスのシミュレーションを行った。具体的には、最低温で実現する整合電荷密度波状態を初期状態として、急激に温度を上げた際に生じる不整合電荷密度波状態への相転移ダイナミクスのシミュレーションに成功した。その結果、相転移ダイナミクスは対称性が低下した境界から系全体へ広がって進行することや、この過程において転位などのトポロジカル欠陥が重要な役割を果たすことが明らかになった。2 次元における電荷密度波状態の動力学シミュレーションは計算が困難であり類似の研究は少なく、このように相転移ダイナミクスの時空間情報が得られた意義は大きいと考えている。この成果に関して、アメリカ物理学会において口頭発表を行った。

### (4) 電荷密度波状態と高次高調波発生

高次高調波発生は、入力された光の周波数がより高い整数倍の周波数に変換される非線形光学現象であり、最先端の超高速物理学には欠かせないものである。従来は原子ガスが用いられていたが、最近の実験では、バルク固体中での高調波発生の実現に道が開かれ、固体中の電子と光の相互作用が、どのようにして高い周波数に変換されるのかについて、様々な議論がある。

本研究では、フロケの定理と呼ばれる数学的な定理を援用して、光によって駆動される電子ダイナミクスの高周波モードが高次の高調波につながることを説明した。我々は、この理論的枠組みを、1 次元結晶の単純なモデルに適用した。このモデルは、オンサイトの電位が交互に変化するタイトバインディングモデルであり、電荷密度波が存在する場合の電子の極めてシンプルなモデルになっている。本研究では、ポテンシャルの散乱がない場合のダイナミクスの解析解を求め、散乱の影響を摂動論によって解析した。その結果、散乱(電荷密度波)がない場合の最高周波数は小さいが、散乱がある場合の最高周波数は十分に大きくなることがわかった。

この結果から、変換の最高次数は入力周波数の 2 乗に反比例するという予測が得られた(図 4 参照)。この変則的な挙動は、実験による検証がなされることを期待する。さらに、このフロケ理論的アプローチは、様々なモデルに適用可能なほど一般的であり、固体の次元性や対称性の影響を明らかにするために今後役立つことが期待される。本研究成果は、Phys. Rev. A 誌に掲載された(文献[3])。

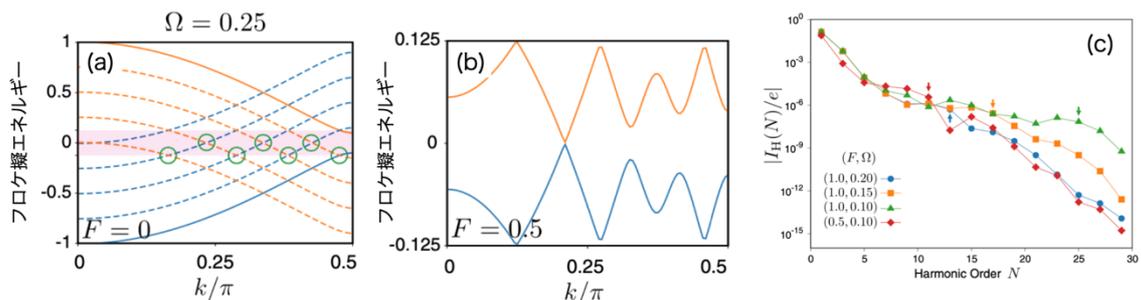


図 4: (a) レーザーとの結合が無い場合の擬エネルギースペクトル。レーザー周波数  $\Omega$  の整数倍シフトしたレプリカバンドを図示している。(b) レーザーとの結合ありの場合の擬エネ

ルギースペクトル。(a)において丸で囲んだ場所で準位反発が生じている。(c) 各高調波次数  $N$  における高調波電流の強度。レーザーの強度  $F$  と周波数  $\Omega$  の4つの組み合わせについて結果を図示し、矢印は摂動論に基づく解析的計算が予言する高調波カットオフ次数。文献 [3]より。

### (5) 離散時間結晶の新しいメカニズム

時間と空間の等価性は相対性理論だけにとどまらず、物理学の様々な文脈で示唆を与える。この観点から考えると、空間の並進対称性が自発的に低下した電荷密度波状態の時間並進についてのアナロジーは近年、(離散) 時間結晶として注目を集めている非平衡状態である。

本研究ではフロケ動的対称性という、周期駆動系に固有の新しい対称性を発見および定式化し、この対称性が離散時間結晶を導くことを示した。具体例として、周期的に振動する円偏光磁場のもとにあるハバード模型にこの対称性が内在することを指摘し、ハバード模型の磁化が離散時間結晶の振る舞いをするを解析的および数値的に示した。さらに、円偏光磁場の強度を変化させるだけで、この時間結晶の振動周期をコントロールできることを示した。時間結晶の振動周期が円偏光磁場の振動周期の整数倍になるときは離散時間結晶、整数倍にならないときには離散時間「準」結晶に対応する。空間におけるアナロジーでは、これらはそれぞれ commensurate CDW および incommensurate CDW に対応する。

本研究は、物理学における時間と空間の等価性についての新しい例を与え、電荷密度波状態の研究においても新しい視点をもたらす。時間結晶の研究においても、新しい発生メカニズムを発見した点で意義がある。本研究成果は、Phys. Rev. Lett. 誌に掲載され(参考文献[4])、科学新聞(2020年8月21日号)に掲載された。

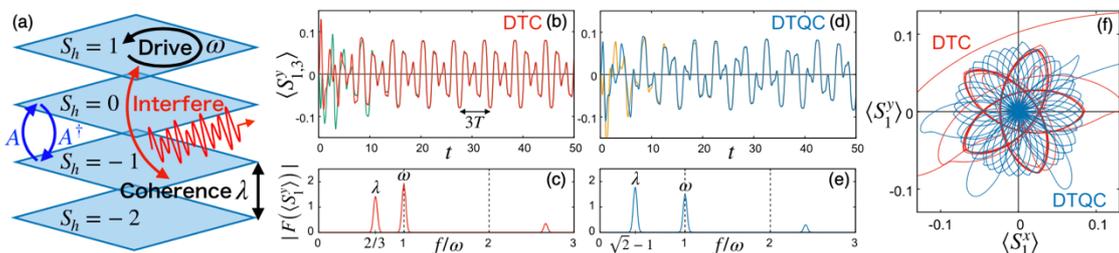


図 5: (a) ハバード模型における時間結晶のメカニズムの概念図。円偏光磁場が実効的に作る静磁場の方向についての磁化セクターの干渉を表す。(b,c) 1次元ハバード模型のオンサイト磁化 ( $y$  方向) の時間発展とフーリエスペクトル。離散時間結晶に対応。(d,e) 磁場の強度を変えて離散時間「準」結晶が生じた場合。(f) 離散時間結晶および準結晶におけるオンサイト磁化の軌跡。文献[4]より。

### <参考文献>

- [1] T. N. Ikeda, H. Tsunetsugu, K. Yonemitsu, Appl. Sci. 9, 70 (2019).
- [2] K. Nakatsugawa, S. Tanda, T. N. Ikeda, Sci. Rep. 10, 1239 (2020).
- [3] T. N. Ikeda, K. Chinzei, H. Tsunetsugu, Phys. Rev. A 98, 063426 (2018).
- [4] K. Chinzei, T. N. Ikeda, Phys. Rev. Lett. 125, 060601 (2020).

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計12件（うち査読付論文 12件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 7件）

1. 著者名 Ikeda Tatsuhiko N., Sato Masahiro	4. 巻 6
2. 論文標題 General description for nonequilibrium steady states in periodically driven dissipative quantum systems	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Science Advances	6. 最初と最後の頁 eabb4019
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1126/sciadv.abb4019	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 Ikeda Tatsuhiko N.	4. 巻 2
2. 論文標題 High-order nonlinear optical response of a twisted bilayer graphene	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 032015(R)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.2.032015	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 Chinzei Koki, Ikeda Tatsuhiko N.	4. 巻 125
2. 論文標題 Time Crystals Protected by Floquet Dynamical Symmetry in Hubbard Models	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 60601
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.125.060601	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 Fukai Kouhei, Nozawa Yuji, Kawahara Koji, Ikeda Tatsuhiko N.	4. 巻 2
2. 論文標題 Noncommutative generalized Gibbs ensemble in isolated integrable quantum systems	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 33403
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.2.033403	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 Nakatsugawa Keiji、Tanda Satoshi、Ikeda Tatsuhiko N.	4. 巻 10
2. 論文標題 Multivalley Free Energy Landscape and the Origin of Stripe and Quasi-Stripe CDW Structures in Monolayer MX <sub>2</sub> Compounds	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 1239
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-020-58013-7	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 Cheng Bing、Kanda Natsuki、Ikeda Tatsuhiko N.、Matsuda Takuya、Xia Peiyu、Schumann Timo、Stemmer Susanne、Itatani Jiro、Armitage N. P.、Matsunaga Ryusuke	4. 巻 124
2. 論文標題 Efficient Terahertz Harmonic Generation with Coherent Acceleration of Electrons in the Dirac Semimetal Cd <sub>3</sub> As <sub>2</sub>	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 117402
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.124.117402	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 Chinzei Koki、Ikeda Tatsuhiko N.	4. 巻 2
2. 論文標題 Disorder effects on the origin of high-order harmonic generation in solids	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 13033
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.2.013033	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 Ikeda Tatsuhiko N.、Sato Masahiro	4. 巻 100
2. 論文標題 High-harmonic generation by electric polarization, spin current, and magnetization	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 214424
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.100.214424	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 Ikeda Tatsuhiko N.	4. 巻 4
2. 論文標題 Generation of DC, AC, and Second-Harmonic Spin Currents by Electromagnetic Fields in an Inversion-Asymmetric Antiferromagnet	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Condensed Matter	6. 最初と最後の頁 92 ~ 92
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/condmat4040092	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 T. N. Ikeda, H. Tsunetsugu and K. Yonemitsu	4. 巻 9
2. 論文標題 Photoinduced Dynamics of Commensurate Charge Density Wave in 1T-TaS <sub>2</sub> Based on Three-Orbital Hubbard Model	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Appl. Sci.	6. 最初と最後の頁 70
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/app9010070	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 T. N. Ikeda	4. 巻 97
2. 論文標題 Revisiting the Floquet-Bloch theory for an exactly solvable model of one-dimensional crystals in strong laser fields	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Phys. Rev. A	6. 最初と最後の頁 63413
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevA.97.063413	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 T. N. Ikeda, K. Chinzei and H. Tsunetsugu	4. 巻 98
2. 論文標題 Floquet-theoretical formulation and analysis of high-order harmonic generation in solids	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Phys. Rev. A	6. 最初と最後の頁 63426
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevA.98.063426	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33件（うち招待講演 5件 / うち国際学会 7件）

1. 発表者名 Minoru Kanega, Tatsuhiko N. Ikeda, Masahiro Sato
2. 発表標題 Theory of nonlinear optical responses in Kitaev spin liquids
3. 学会等名 APS March Meeting 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tatsuhiko N. Ikeda, Koji Kawahara, Keiji Nakatsugawa, Satoshi Tanda
2. 発表標題 Anisotropic Charge Density Waves in Thermal Quench of 2H-TaSe <sub>2</sub>
3. 学会等名 APS March Meeting 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Keiji Nakatsugawa, Tatsuhiko N. Ikeda, Satoshi Tanda
2. 発表標題 Origin of Stripe CDW Structures and Multivalley Free Energy Landscape in MX <sub>2</sub> Systems
3. 学会等名 APS March Meeting 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 金賀穂, 池田達彦, 佐藤正寛
2. 発表標題 非線形光学効果の中に現れるキタエフスピン液体の特性
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 池田達彦
2. 発表標題 整合角ねじれ2層グラフェンの高次高調波発生の理論
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 萱沼洋輔, 池田達彦, 田中智
2. 発表標題 Volterra型積分方程式法による固体中の高次高調波発生の定式化と解析
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中津川啓治, 池田達彦, 豊嶋剛司, 丹田聡
2. 発表標題 MX2系におけるCDW自由エネルギー多谷構造のUniversality
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tatsuhiko N. Ikeda
2. 発表標題 High-harmonic generation from solids: Floquet-theoretical approach and Dirac semimetals
3. 学会等名 The Schwinger Effect and Strong-Field Physics, YITP Molecule-Type Virtual (Zoom) Workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tatsuhiko N. Ikeda
2. 発表標題 Nonequilibrium steady states in periodically driven dissipative quantum systems
3. 学会等名 Fundamental Aspects of Statistical Mechanics and the Emergence of Thermodynamics in Non-Equilibrium Systems (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鎮西弘毅, 池田達彦
2. 発表標題 ハバード模型におけるフロケ動的対称性に保護された時間結晶相
3. 学会等名 日本物理学会 2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 神田夏輝, Bing Cheng, 池田達彦, 松田拓也, 夏沛宇, Timo Schumann, Susanne Stemmer, 板谷治郎, N. P. Armitage, 松永隆佑
2. 発表標題 3次元ディラック半金属Cd <sub>3</sub> As <sub>2</sub> 薄膜における室温高効率テラヘルツ高次高調波発生と非平衡ダイナミクス
3. 学会等名 日本物理学会 2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 池田達彦, Bing Cheng, 神田夏輝, 松田拓也, 夏沛宇, Timo Schumann, Susanne Stemmer, 板谷治郎, N. P. Armitage, 松永隆佑
2. 発表標題 ディラック半金属におけるテラヘルツ高次高調波の発生機構と電子の散乱・緩和時間依存性
3. 学会等名 日本物理学会 2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 松田拓也, 神田夏輝, 池田達彦, 松永隆佑
2. 発表標題 空間反転対称性の破れたワイル半金属 $\text{WTe}_2$ のテラヘルツ非線形応答
3. 学会等名 日本物理学会 2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐藤正寛, 池田達彦
2. 発表標題 量子マスター方程式による多体系における高次高調波発生の解析
3. 学会等名 日本物理学会 2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 金質穂, 池田達彦, 佐藤正寛
2. 発表標題 Kitaev磁性体における電気磁気相互作用による高次高調波発生の理論
3. 学会等名 日本物理学会 2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 丹田聡, 中津川啓治, 池田達彦
2. 発表標題 MX <sub>2</sub> 系における $13 \times 13$ 、 $7 \times 7$ 構造及びNC-Stripe-C逐次相転移: 実験と理論
3. 学会等名 日本物理学会 2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中津川啓治, 池田達彦, 丹田聡
2. 発表標題 Origin of stripe structure in MX2 systems
3. 学会等名 日本物理学会 2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 池田達彦, 佐藤正寛
2. 発表標題 周期駆動された散逸量子系における非平衡定常状態の一般的記述
3. 学会等名 日本物理学会 2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐藤正寛, 池田達彦
2. 発表標題 高次高調波における量子磁性体と超伝導体のアナロジー
3. 学会等名 日本物理学会年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 松田拓也, 神田夏輝, 池田達彦, 松永隆佑
2. 発表標題 空間反転対称性の破れたワイル半金属における室温テラヘルツ第二高調波発生
3. 学会等名 日本物理学会年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名	池田達彦, Bing Cheng, 神田夏輝, 松田拓也, 夏沛宇, Timo Schumann, Susanne Stemmer, 板谷治郎, N. P. Armitage, 松永隆佑
2. 発表標題	ディラック半金属におけるテラヘルツ高次高調波発生理論
3. 学会等名	日本物理学会年次大会
4. 発表年	2020年

1. 発表者名	神田夏輝, Bing Cheng, 池田達彦, 松田拓也, 夏沛宇, Timo Schumann, Susanne Stemmer, 板谷治郎, N. P. Armitage, 松永隆佑
2. 発表標題	ディラック半金属Cd3As2薄膜における高効率テラヘルツ高調波発生とサブサイクル分光
3. 学会等名	日本物理学会年次大会
4. 発表年	2020年

1. 発表者名	深井康平, 野澤優治, 川原光滋, 池田達彦
2. 発表標題	非可換保存量の組を用いた一般化ギブスアンサンブル
3. 学会等名	日本物理学会年次大会
4. 発表年	2020年

1. 発表者名	池田達彦
2. 発表標題	様々な固体からの高次高調波発生
3. 学会等名	第9回「凝縮系理論の最前線」(招待講演)
4. 発表年	2020年

1. 発表者名 池田達彦
2. 発表標題 層状MX <sub>2</sub> 化合物における自由エネルギー-多谷構造とストライプCDW構造の起源
3. 学会等名 第13回 物性科学領域横断研究会 (領域合同研究会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tatsuhiko N. Ikeda
2. 発表標題 Floquet-Theoretical Analysis of High-Harmonic Generation in Solids
3. 学会等名 Trends in Theory of Correlated Materials (TTCM2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 池田達彦
2. 発表標題 Floquet 理論を用いた固体高次高調波の研究
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 池田達彦, 佐藤正寛
2. 発表標題 磁気励起による高調波発生の理論と実験提案
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 池田 達彦
2. 発表標題 Kronig-Penneyポテンシャル中のFloquet-Bloch固有状態
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 池田 達彦, 鎮西 弘毅, 常次 宏一
2. 発表標題 Floquet-Bloch理論による固体高次高調波の定式化と解析
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. N. Ikeda, K. Chinzei, H. Tsunetsugu
2. 発表標題 Floquet-Theoretical Formulation and Analysis of High-Harmonic Generation in Solids
3. 学会等名 Trends in Theory of Correlated Materials (TTCM 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中津川 啓治, 丹田 聡, 池田 達彦
2. 発表標題 単層電荷密度波: 中西・斯波理論再訪
3. 学会等名 日本物理学会年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 池田 達彦, 常次 宏一, 米満 賢治
2. 発表標題 TaS2における電荷密度波の光誘起ダイナミクスの理論
3. 学会等名 日本物理学会年次大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------