

令和 6 年 5 月 29 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20H01840

研究課題名（和文）モアレ・メタマテリアルの物性理論

研究課題名（英文）Theoretical study on physical properties of moiré; meta-materials

研究代表者

越野 幹人（Koshino, Mikito）

大阪大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号：60361797

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 10,200,000円

研究成果の概要（和文）：二次元物質の組み合わせによって作られる様々なモアレ物質を舞台として、電子状態やそのトポロジカルな性質、構造緩和、フォノン物性に関する理論研究を行った。特に、準周期的構造のために取り扱いが困難であったモアレ3層系に関して、構造緩和と電子構造を記述する理論を確立し、様々なモアレ多層系を記述する道を開いた。また準周期的モアレ系と4次元量子ホール系との等価性を発見し、そのエネルギースペクトルに内在するトポロジカル数を同定した。さらにhBN、黒リン、トポロジカル絶縁体、3次元グラファイトを含む様々なモアレ系に対象を広げ、モアレ模様が生み出す非自明な電子構造やフォノン物性、電気伝導特性を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

原子層が重なってできるモアレ物質が非常に注目を集めるが、何千何万という原子を含むモアレ周期がもたらす電子物性を理論的に記述することは困難である。特に複数のモアレ模様が干渉する多層系では、周期系を前提とする通常の固体物性理論が適用できないため、物性研究の進展の大きな妨げになっていた。この研究で行われた一連の仕事はこの部分に光を当てたものであり、従来解析が殆ど行われてこなかったモアレ多層系や3次元積層モアレ系の基礎的な性質を初めて明らかにした。この結果は無数のバリエーションを持つモアレ系の性質を理解するための基本的な枠組みを与え、未来の物性物理の基礎になることが期待される。

研究成果の概要（英文）：We performed theoretical studies on electronic states, topological properties, structural relaxation, and phonon properties in various moiré materials created by the combination of two-dimensional materials. In particular, we have established a theory describing the structural relaxation and electronic structure of moiré three-layer systems, which have been difficult to handle due to their quasiperiodic structure. We also discovered the equivalence between quasiperiodic moiré systems and 4D quantum Hall systems, and identified the topological numbers inherent in their energy spectra. Furthermore we have extended our research to various moiré systems including hBN, black phosphorus, topological insulators, and three-dimensional graphite, and clarified the nontrivial electronic structure, phonon properties, and electrical conduction properties produced by moiré patterns.

研究分野：物性理論

キーワード：2次元物質 グラフェン モアレ物質 ファンデルワールスヘテロ接合

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

2004年にグラフェンが作製されて以来多種多様な二次元原子膜が実現され、二次元物質は物質科学の一大分野として確立した。そして現在、二次元物質同士をファンデルワールス力で積層した複合二次元物質が世界的に注目されている。複合二次元物質の大きな特徴は、層同士の格子の不整合が生み出すモアレ干渉によって物性が支配され、単体と全く異なる性質が出現することである。特に、単体では決して超伝導にならないグラフェンを特定の角度(約1.1度)で重ねただけで、純粋な幾何学構造より超伝導が生じることは、物質科学の世界に大きな驚きをもたらした。これらの特異な現象はモアレ超格子構造が原因となって引き起こされると考えられている。角度制御による詳細な物性探索は、現在のところツイスト二層グラフェンの電気伝導度測定で行われているのみであり、多彩な二次元物質の組み合わせにおける様々な物性の系統的な研究は、そのほとんどが手付かずの未開拓領域であった。

2. 研究の目的

この研究の目的は、多様な二次元物質の組み合わせによって作られる複合二次元物質における電子・フォノンの振る舞いを理論的に記述し、新規物性機能を探ることである。「二次元物質の多様性」×「角度」の自由度により新物性を発現させるという発想は、主に元素組成で性質を制御する三次元物質の物理学とは全く異なる方向性を持つ。理論的には、複合二次元物質はモアレ周期の中に数千ないし数万という膨大な原子を含む極めて複雑な系であり、この複雑さが様々な物性を記述する上での大きな障害となっている。この研究計画では、これら物質群を「モアレ・メタマテリアル」として捉え直し、多様な物質の組み合わせに対して、電子やフォノンの振る舞いを系統的に記述することで、新しい物質科学の基礎を確立することを目的とする。

3. 研究の方法

(a) モアレ電子理論 — モアレバンド・エンジニアリングと新規電子物性開拓

グラフェンからは平坦バンドが得られたように、様々な物質の組み合わせによるモアレ複層系からどんなメタマテリアルが現れるか、またそれがどのような非自明な電子物性(量子輸送現象、磁場応答、光学応答、トポロジカルな性質)をもたらすかは、モアレ物質探索における中心的問題の一つである。またそれぞれの物質において、巨大モアレ格子の電子状態に対する有効理論を構築し、電子間相互作用効果や超伝導の記述に挑む。

(b) モアレフォノン理論 — 熱伝導特性・熱電効果・電子格子相互作用

様々なモアレ・メタマテリアルにおける有効的な巨大原子の格子振動を計算し、そのような格子振動がもたらす熱伝導効果及び熱電効果を解き明かす。また、モアレフォノン系とモアレ電子系との間の電子格子相互作用効果、特に電子同士がモアレフォノンを媒介としてどのように相互作用するかは、特に超伝導への影響の観点からも非常に重要な問題である。

(c) 実験的検証にむけて

東大生産研の町田友樹グループ(実験)と連携することにより、理論によって予言されたモアレ・メタマテリアルの実現を目指す。理論計算によって非自明なバンドや物性を持つ二次元物質の組み合わせを予め綿密に予測した上で、実際に物質を作成し量子輸送特性や超伝導特性の測定を行う。さらに、共同研究の実績のある Cory Dean グループ(Columbia 大学)、Pablo Jarillo-Herrero グループ(MIT)、Philip Kim グループ(Harvard)とも連携し、国際共同研究を行う

4. 研究成果

(1) ツイスト3層グラフェンにおける超モアレ原子構造理論

現在に至るまで、モアレ物質研究の主な対象は単一のモアレ周期を持つツイスト二層系であったが、一方で3層以上のツイスト系では一般に複数のモアレ周期が共存することによって準周期的な空間構造をもたらす。このような周期のない物理系では従来の固体物理の手法では物性の記述が困難であった。ここでは準周期的構造をもつ3層系を取り扱う系統的理論を初めて構築し、最も単純な系である「ツイスト3層グラフェン」に適用した。構造緩和によってマルチスケール・モアレドメイン形成が生じること(図1)それに伴うトポロジカル電子状態の出現を発見した。複雑なドメイン形成は仮想的なモアレ原子の相互作用によって定性的に説明できることも明らかにした。[Phys. Rev. X 13, 041007 (2023)]

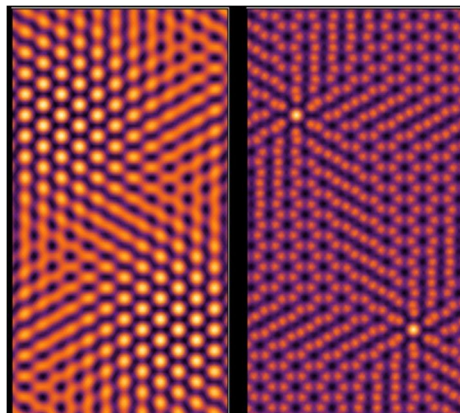


図1: ツイスト3層グラフェンにおけるモアレパターン。左は構造緩和がない場合、右がある場合。明るさは局所的な層間結合エネルギーを表す。

(2) モアレ準結晶におけるトポロジカル不変量

一般に二次元物質同士が任意の角度で重なると、結晶周期の非整合性のために系は共通の周期を持たない準周期系になる。周期のある通常の結晶では電子状態はエネルギーバンドに量子化されるが、準周期系ではバンドが定義できないため、電子状態の量子化の単位も無限小であると考えられてきた。しかし以下の一連の研究で、一般の準周期系の電子状態にも有限の量子化単位があり、エネルギーギャップは複数のトポロジカル数で特徴付けられることを示した。これは任意の準結晶に拡張できる普遍的な概念であることがわかった。

(2-i) hBN/グラフェン/hBN の3層系のエネルギースペクトルとギャップ整数

グラフェンが hBN(六方晶窒化ホウ素)で挟まれた 3 層系は、二つのモアレ模様が重なる複雑な原子構造を持つ(図 2 左)。有効理論を用いて様々なツイスト角における電子状態を計算することで、この系が、二つのモアレ模様の干渉による Hofstadter butterfly 型のスペクトルを持つことを見出した(図 2 右)。さらに、各ギャップ以下の電子数が、複数のブリルアンゾーンの面積の整数の線形結合で現れることを見出した。これは単一のブリルアンゾーンしか持たない周期系の拡張になっている。[Phys. Rev. B 104, 035306 (2021)]

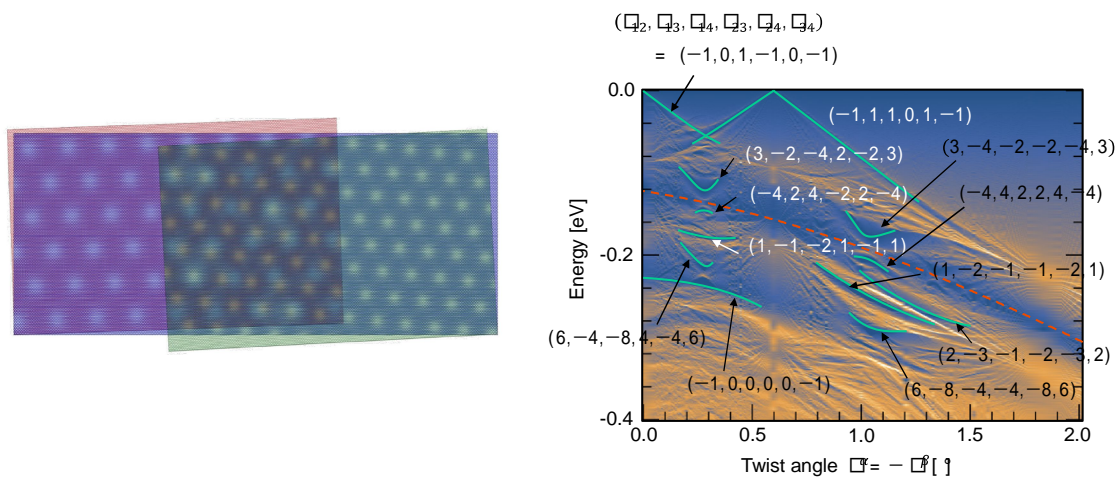


図 2: hBN/グラフェン/hBN の 3 層系のモアレ構造(左)と電子のスペクトルのツイスト角度依存(右)

(2-ii) 一般の二次元準周期系のトポロジカル数と 4 次元量子ホール効果

前項のギャップラベリングを任意の二次元準周期系に拡張して、各ギャップの整数が「第 2Chern 数」と呼ばれるトポロジカル不変量であることを明らかにした。証明の核となるのが二次元準周期系と磁場中 4 次元周期系との間の形式的な対応である。4 次元量子化ホール伝導度が第 2Chern 数で量子化されることで、二次元準周期系のギャップ整数の量子化が示される。[Phys. Rev. Research 4, 013028 (2022)]

(3) グラフェン/hBN 系におけるモアレフォノン

モアレ物質においては、電子と同様にフォノンもモアレ周期の影響を受け、スペクトルが超格子バンドに再構成される。これはモアレフォノンと呼ばれるが、ツイスト二層グラフェンにおいて研究がされている一方で、異種二次元物質からなるヘテロ系での詳しい研究は今までになかった。ここではグラフェン/六方晶窒化ホウ素モアレ超格子の面内音響フォノンを、連続体モデルを用いて理論的に研究した。個々の層のフォノンバンドは強く混成され、分散バンドと平坦バンドからなるモアレフォノンバンドに再構築されることを実証した(図 3)。このフォノンバンド構造は、モアレ領域壁の運動を模した単純なネットワークモデルによって実効的に記述することができ、フラットバンドのモードは独立した弦の振動として解釈されることを示した。また、モアレフォノンは hBN による反転対称性の破れによって角運動量を持つことを明らかにした。[Phys. Rev. B 107, 115301 (2023)]

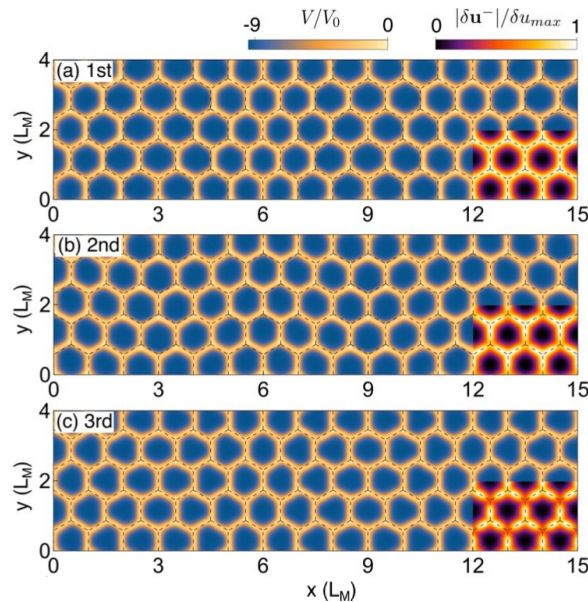


図 3: グラフェン/hBN 系におけるモアレフォノンの振動モードの例

(4) NbSe₂ のファンデルワールス界面における自発的スピンバレー分極

2次元 NbSe₂ が、2次元強磁性体 V₅Se₈ との vdW 界面で自発的なスピン分極を持つ強磁性基底状態を形成することを実証した。この磁性 vdW ヘテロ構造の異常ホール効果 (AHE) を調べたところ、V₅Se₈ 層の数を単層限界まで薄くすると、AHE の符号が反転することがわかった。興味深いことに、これらの試料の AHE 信号は面内磁場によって増強され、AHE 信号には磁化以外の寄与があることが示唆される。この特異な振る舞いはバンド構造計算でもよく再現され、面内磁化によって生じたベリー曲率によって説明できることを示した。これによって、反転対称を持たない 2次元量子物質における磁性とゼーマン型スピン軌道相互作用のユニークな相互作用が明らかにされた。(東大・理研との共同研究)[Nat. Commun. 13, 5129 (2022)]

(5) ツイスト二層グラフェンにおけるツイスト角乱れの実験的観測

ツイスト二層グラフェンでの超伝導が大きな注目を集めている。この系の特徴は、電子構造が層間の回転角 θ に極めて鋭敏に依存する点であり、超伝導の発現は魔法角と呼ばれる $\theta=1^\circ$ 付近のサンプルに限られる。殆どの理論計算では θ が一様であると仮定されているが、実験グループとの共同により実はツイスト二層グラフェンでは θ が場所ごとに分布を持っていることを明らかにした。(Weitzmann Institute, MIT, NIMS との共同研究)[Nature 581, 47 (2020)]。

(6) グラフェン/hBN モアレ超構造での磁気熱電効果による軌道磁気モーメントの観測

グラフェン/hBN モアレ系では、hBN によるモアレポテンシャルでグラフェンのディラックコーンにギャップが開き、そこでは幾何学的曲率に起源を持つ軌道磁気モーメントが生じるが、その実験的測定は困難とされてきた。東京大学の町田グループとの共同により、この軌道磁気モーメントが磁場中の熱電効果の測定によって直接観測できることを示した。[Nature Communications 11, 1 (2020)]。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計26件（うち査読付論文 26件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Lukas.P.A. Krisna, Mikito Koshino	4. 巻 107
2. 論文標題 Moir'e phonons in graphene/hexagonal boron nitride moir'e superlattice	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Phys. Rev. B	6. 最初と最後の頁 115301
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.107.115301	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 Manato Fujimoto, Takuto Kawakami, Mikito Koshino	4. 巻 4
2. 論文標題 Perfect one-dimensional interface states in a twisted stack of three-dimensional topological insulators	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Phys. Rev. Research	6. 最初と最後の頁 43209
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.4.043209	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 H Matsuoka, T Habe, Y Iwasa, Mikito Koshino, M Nakano	4. 巻 13
2. 論文標題 Spontaneous spin-valley polarization in NbSe2 at a van der Waals interface	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nat. Commun.	6. 最初と最後の頁 5129
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-022-32810-2	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 Hiroki Ago, Susumu Okada, Yasumitsu Miyata, Kazunari Matsuda, Mikito Koshino, Kosei Ueno, Kosuke Nagashio	4. 巻 23
2. 論文標題 Science of 2.5 dimensional materials: paradigm shift of materials science toward future social innovation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Sci. Technol. Adv. Mater.	6. 最初と最後の頁 275
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/14686996.2022.2062576	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 Naoto Nakatsuji, Mikito Koshino	4. 巻 105
2. 論文標題 Moir' e disorder effect in twisted bilayer graphene	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Phys. Rev. B	6. 最初と最後の頁 245408
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.105.245408	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 Kazuki Yamamoto, Mikito Koshino	4. 巻 105
2. 論文標題 Topological gap labeling with third Chern numbers in three-dimensional quasicrystals	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Phys. Rev. B	6. 最初と最後の頁 115410
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.105.115410	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 Tenta Tani, Masaru Hitomi, Takuto Kawakami, Mikito Koshino	4. 巻 105
2. 論文標題 Topological edge and corner states and fractional corner charges in blue phosphorene	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Phys. Rev. B	6. 最初と最後の頁 75407
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.105.075407	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 Mikito Koshino, Hiroki Oka	4. 巻 4
2. 論文標題 Topological invariants in two-dimensional quasicrystals	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Phys. Rev. Research	6. 最初と最後の頁 13028
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.4.013028	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 Hitomi Masaru, Kawakami Takuto, Koshino Mikito	4. 巻 104
2. 論文標題 Multiorbital edge and corner states in black phosphorene	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 125302
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.104.125302	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 Sihan Zhao, Ryo Kitaura, Pilkyung Moon, Mikito Koshino, Feng Wang	4. 巻 9
2. 論文標題 Interlayer Interactions in 1D Van der Waals Moire Superlattices	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Adv. Sci.	6. 最初と最後の頁 2103460
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/advs.202103460	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 Oka Hiroki, Koshino Mikito	4. 巻 104
2. 論文標題 Fractal energy gaps and topological invariants in hBN/graphene/hBN double moire systems	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 35306
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.104.035306	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 Matsuki Yoshiyuki, Ikeda Kazuki, Koshino Mikito	4. 巻 104
2. 論文標題 Fractal defect states in the Hofstadter butterfly	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 35305
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.104.035305	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 Fujimoto Manato, Koshino Mikito	4. 巻 103
2. 論文標題 Moire edge states in twisted bilayer graphene and their topological relation to quantum pumping	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 155410
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.103.155410	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 Moriya Rai, Kinoshita Kei, Crosse J. A., Watanabe Kenji, Taniguchi Takashi, Masubuchi Satoru, Moon Pilkyung, Koshino Mikito, Machida Tomoki	4. 巻 11
2. 論文標題 Emergence of orbital angular moment at van Hove singularity in graphene/h-BN moire superlattice	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 5380
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-020-19043-x	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 Kawakami Takuto, Nomura Takafumi, Koshino Mikito	4. 巻 102
2. 論文標題 Electronic properties of a graphyne-N monolayer and its multilayer: Even-odd effect and topological nodal line semimetallic phases	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 115421
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/physrevb.102.115421	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 Crosse J. A., ffsuji Naoto, Koshino Mikito, Moon Pilkyung	4. 巻 102
2. 論文標題 Hofstadter butterfly and the quantum Hall effect in twisted double bilayer graphene	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 35421
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/physrevb.102.035421	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 Uri A., Grover S., Cao Y., Crosse J. A., Bagani K., Rodan-Legrain D., Myasoedov Y., Watanabe K., Taniguchi T., Moon P., Koshino M., Jarillo-Herrero P., Zeldov E.	4. 巻 581
2. 論文標題 Mapping the twist-angle disorder and Landau levels in magic-angle graphene	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nature	6. 最初と最後の頁 47 ~ 52
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41586-020-2255-3	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 Koshino Mikito, Nam Nguyen N. T.	4. 巻 101
2. 論文標題 Effective continuum model for relaxed twisted bilayer graphene and moire electron-phonon interaction	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 195425
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.101.195425	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 Tamaki Gen, Kawakami Takuto, Koshino Mikito	4. 巻 101
2. 論文標題 Topological junction states and their crystalline network in systems with chiral symmetry: Application to graphene nanoribbons	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 205311
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.101.205311	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 Zhang Wenjin 他	4. 巻 5
2. 論文標題 Chemically Tailored Semiconductor Moire Superlattices of Janus Heterobilayers	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Small Structures	6. 最初と最後の頁 2300514
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/sstr.202300514	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 Kawakami Takuto, Tamaki Gen, Koshino Mikito	4. 巻 108
2. 論文標題 Topological domain walls in graphene nanoribbons with carrier doping	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 45401
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.108.045401	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 Kapri Priyadarshini, Kawakami Takuto, Koshino Mikito	4. 巻 228
2. 論文標題 Mechanical properties of 2D metal-organic and covalent-organic frameworks with non trivial topological band dispersion	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Computational Materials Science	6. 最初と最後の頁 112282
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.commatsci.2023.112282	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 Aoki Shoto, Fukaya Hidenori, Kan Naoto, Koshino Mikito, Matsuki Yoshiyuki	4. 巻 108
2. 論文標題 Magnetic monopole becomes dyon in topological insulators	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 155104
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.108.155104	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 Tani Tenta, Kawakami Takuto, Koshino Mikito	4. 巻 108
2. 論文標題 Perpendicular electronic transport and moire-induced resonance in twisted interfaces of three-dimensional graphite	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 165422
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.108.165422	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 Nakatsuji Naoto, Kawakami Takuto, Koshino Mikito	4. 巻 13
2. 論文標題 Multiscale Lattice Relaxation in General Twisted Trilayer Graphenes	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review X	6. 最初と最後の頁 41007
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevX.13.041007	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 Moon Pilkyung, Kim Youngwook, Koshino Mikito, Taniguchi Takashi, Watanabe Kenji, Smet Jurgen H.	4. 巻 24
2. 論文標題 Nonlinear Landau Fan Diagram for Graphene Electrons Exposed to a Moire Potential	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Nano Letters	6. 最初と最後の頁 3339 ~ 3346
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.nanolett.3c04444	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 -

〔学会発表〕 計36件 (うち招待講演 35件 / うち国際学会 23件)

1. 発表者名 M. Koshino
2. 発表標題 Moir'e quasicrystals in twisted 2D systems
3. 学会等名 Workshop on Innovative Nanoscale Devices and Systems (WINDS 2022) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 M. Koshino
2. 発表標題 Physics of Graphene and moire materials
3. 学会等名 Novel Quantum States in Condensed Matter (NQS2022) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 M. Koshino
2. 発表標題 Topological quasicrystals in moir'e materials
3. 学会等名 Pan-Pacific Workshop on Topology and Correlation in Exotic Materials (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 M. Koshino
2. 発表標題 Topological quasicrystals in twisted 2D systems
3. 学会等名 Novel Electronic Properties of two-dimensional materials (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 M. Koshino
2. 発表標題 Quasicrystals in twisted 2D systems
3. 学会等名 10th A3 Foresight Project Workshop Joint Research on Novel Physical Properties and Functionalities of Emerging 2D Materials and van der Waals Heterostructures (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 M. Koshino
2. 発表標題 Topological quasicrystals in twisted 2D systems
3. 学会等名 NT22: 22nd International Conference on the Science and Applications of Nanotubes and Low-Dimensional Materials (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 M. Koshino
2. 発表標題 Physics of twisted 2D materials
3. 学会等名 Brookhaven National Laboratory NSLS-II & CFN Joint Meeting 2D materials and beyond (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 M. Koshino
2. 発表標題 Quasicrystals in twisted 2D systems
3. 学会等名 Photonics and Electromagnetics Research Symposium (PIERS) 2022 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 M. Koshino
2. 発表標題 Moir'e quasicrystals
3. 学会等名 Pioneer Symposium in the Korean Physical Society Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Mikito Koshino
2. 発表標題 Physics of moire materials
3. 学会等名 CEVIS -Correlated Electrons Virtual International Seminars (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Mikito Koshino
2. 発表標題 Quasicrystals in twisted 2D systems
3. 学会等名 CCES Regular seminar, Seoul National University (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Mikito Koshino
2. 発表標題 Physics of twisted 2D materials
3. 学会等名 International Conference on Discrete Geometric Analysis for Materials Design (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Mikito Koshino
2. 発表標題 Topological invariants in quasicrystals
3. 学会等名 Online moire IOP-EPS minicolloquium, (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Mikito Koshino
2. 発表標題 Physics of twisted 2D materials
3. 学会等名 11th Workshop on Semiconductor/Superconductor Quantum Coherence Effect and Quantum Information (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takuto Kawakami
2. 発表標題 Magnetic structures and topological gaps in polyacene
3. 学会等名 The 12th Recent Progress in Graphene and Two-dimensional Materials Research Conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 越野 幹人
2. 発表標題 Physics of two-dimensional materials
3. 学会等名 第 25 回久保記念シンポジウム「統計力学と物性科学の発展」(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 越野 幹人
2. 発表標題 超精密原子層物質 ナノスケールからのトポロジカル物質創成
3. 学会等名 CREST・さががけ「トポロジー」領域 公開シンポジウム「トポロジカル科学の現在と 未来(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Mikito Koshino
2. 発表標題 Electron and phonon properties of twisted bilayer graphene
3. 学会等名 Graphene 2020 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Mikito Koshino
2. 発表標題 Physics of twisted 2D systems
3. 学会等名 International Meeting on Thin Film Interfaces and Composite Crystals (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 越野 幹人
2. 発表標題 モアレ二次元物質の物理
3. 学会等名 2021 年第 68 回応用物理学会春季学術講演会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 越野 幹人
2. 発表標題 モアレ物質の新奇な物性
3. 学会等名 日本物理学会 第 76 回年次大会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 越野 幹人
2. 発表標題 モアレ2次元物質における電子およびフォノンの理論
3. 学会等名 物性研究所スパコン共同利用・CCMS 合同研究会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 越野 幹人
2. 発表標題 ツイスト 2 層グラフェンの特異な物性
3. 学会等名 京都大学基礎物理学研究所研究会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Mikito Koshino
2. 発表標題 Moire phonons in twisted materials
3. 学会等名 6th EU-Japan Workshop on Graphene and Related 2D Materials (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 越野幹人
2. 発表標題 Topological gap labeling in moire quasicrystals
3. 学会等名 東大物性研究所 理論セミナー (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 越野幹人
2. 発表標題 モアレ物質における格子緩和とモアレフォノン
3. 学会等名 名古屋大学研究会「強相関電子系のフロンティア」(招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Mikito Koshino
2. 発表標題 Exploring Moire 2D Materials and Topological Quasicrystals
3. 学会等名 ICTP summer school called "New Trends in Modern Quantum Science (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 越野幹人
2. 発表標題 モアレ二次元物質の物性理論
3. 学会等名 日本物理学会年次大会 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Mikito Koshino
2. 発表標題 Topological moire trilayers
3. 学会等名 BIRS Workshop "The Mathematics and Physics of Moire Superlattices" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Mikito Koshino
2. 発表標題 Topological moire trilayers
3. 学会等名 Asia-Pacific Conference on Condensed Matter Physics (AC2MP) 2023(招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 越野幹人
2. 発表標題 グラフェンの物理学：厚さ100万分の1mmの物質
3. 学会等名 日本物理学会名古屋支部公開講座（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Mikito Koshino
2. 発表標題 Topological moire trilayers
3. 学会等名 Workshop Materials for Quantum Electronics (Mat4QE)（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 越野幹人
2. 発表標題 二次元材料のモアレ物性科学の基礎
3. 学会等名 応用物理学会2024春季講演会 チュートリアル講演（招待講演）
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 越野幹人
2. 発表標題 モアレ準結晶の電子状態：トポロジカル不変量と4次元ホール効果
3. 学会等名 第11回 統計物理学懇談会（招待講演）
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 越野幹人
2. 発表標題 トポロジカル物質の不思議
3. 学会等名 第37回湯川記念講演会「現代物理学の最前線」(招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Mikito Koshino
2. 発表標題 Topological moire trilayers
3. 学会等名 Recent Progress in Graphene Research and 2D materials (RPGR2023) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 越野 幹人	4. 発行年 2023年
2. 出版社 内田老鶴圃	5. 総ページ数 248
3. 書名 グラフェンの物理学	

〔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
研究 分担者	川上 拓人 (Kawakami Takuto) (00750895)	大阪大学・大学院理学研究科・助教 (14401)	

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
研究協力者	藤本 大仁 (Fujimoto Manato)		
研究協力者	中辻 直人 (Nakatsuji Naoto)		
研究協力者	岡 裕樹 (Oka Hiroki)		
研究協力者	人見 将 (Hitomi Masaru)		
研究協力者	玉置 弦 (Tamaki Gen)		
研究協力者	谷 天太 (Tani Tenta)		
研究協力者	山本 和輝 (Yamamoto Kazuki)		

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			
ドイツ	Max Planck Institute			
英国	Manchester University			