

令和 2 年 6 月 2 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K05496

研究課題名(和文) 3次元曲面ネットワーク物質における電子物性の理論

研究課題名(英文) Theory of the electronic properties in three-dimensional surface network materials

研究代表者

越野 幹人 (Koshino, Mikito)

大阪大学・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) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：グラフェンが作る多種多様な幾何学構造を舞台として、電子状態、磁場中効果、フォノン物性に関する幅広い理論研究を行った。グラフェンが曲面となり周期的につながった3次元グラフェンにおいては、磁場中に現れる特殊な1次元チャンネルによって3次元量子ホール効果が生じることを明らかにした。またグラフェンが積層したねじれ2層グラフェンにおいては、モアレ効果による特殊な電子状態、フォノン状態を記述する理論を構築するとともに、30度グラフェンにおける準結晶効果を理論・実験の両面から明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

究極に薄い2次元物質であるグラフェンは、面と面をつなぎ合わせることで様々な幾何学構造を実現でき、その構造に依存して全く異なる性質を呈する。この研究ではグラフェンが作る様々な形の物質に着目し、その物理的性質を理論的に調べた。グラフェンが曲面となって空間を埋め尽くす3次元グラフェンでは、曲面のトポロジーによって全く異なる電気伝導特性を示すことを見出した。またグラフェン同士を回転させて重ねたねじれ積層グラフェンでは、モアレ干渉効果によって、もとのグラフェンとは全く異なる電子状態や格子振動が生じることを明らかにした。これらの研究は未来の物質科学とナノテクノロジーの基礎になることが期待される。

研究成果の概要(英文)：We theoretically studied the physical properties of a wide variety of geometric structures of graphenes, including the electronic band structures, the magnetic field effects and the phonon properties. In three-dimensional graphene, i.e., the negatively-curved three-dimensional (3D) graphene network, we found that the 3D quantum Hall effect is caused by emergent one-dimensional channels in the magnetic field. We also investigated the moire effects on the electron and phonon properties in the twisted bilayer graphenes, and also studied the quasi-crystalline effect in 30-degree twisted bilayer graphene theoretically and experimentally.

研究分野：物性理論

キーワード：グラフェン 2次元物質 量子ホール効果

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

グラフェンは炭素原子が蜂の巣格子状に並んだ平面状の物質であるが、六角格子の中に異なる多角形を混ぜることで曲面を作ることが出来る。五角形をいれると面はボール状に閉じるが、逆に七角形を入れると、曲面は馬の鞍のように反り返り、空間を埋め尽くす無限の3次元構造を作ることが出来る。このような立体構造を持つグラフェンは、体積当たりのグラフェンの高集積化という応用的側面からも大きな興味を持たれており、様々な方法によって作成が試みられてきた。最近になり、ナノ多孔質ニッケルの表面にグラフェンを成長させることで、多孔質の幾何学構造を維持した切れ目のないグラフェンネットワークが作成され、さらにこれを用いて従来のグラフェンデバイスよりも1000倍の電気容量を持つトランジスタが作成された。3次元曲面物質は現実のものとなったのである。この系は局所的(数nm程度)には2次元面で構成されるが大域的(100nm~1 μ m程度)としては3次元という「次元のはざま」にある新しい系であり、固体物理学に全く新しい問題を与える。またグラフェンのみならず、窒化ホウ素、シリセン、遷移金属カルコゲナイド等のあらゆる2次元物質からも原理的には作成が可能であり、膨大な多様性を持つ。

2. 研究の目的

これら3次元曲面物質を新しい物質のクラスと捉え、その電子物性を量子力学的な理論手法で解き明かすのがこの研究の目的である。

(1) 曲面のトポロジーがつくる電子構造 3次元の「質量のない電子」の実現へ
2次元物質が作る3次元曲面ネットワークがどのような3次元電子構造を持つのかは非自明な問題である。トポロジカル物質の観点からも3次元曲面物質は重要な研究対象となる。現在までに数nm程度の小さな単位構造を持つ限られた例について調べられているが、現実の3次元グラフェンを含む包括的な理論研究は未だなされていない。

(2) 量子伝導と散乱問題 トポロジカル欠陥と大域的ランダムネスによる量子波散乱 電気伝導は最も基本的な物性でありその理論構築はデバイス等への応用上も極めて重要となる。3次元グラフェンでは、五角形や七角形といったトポロジカル欠陥が格子に入ることで曲面になることを可能にしているが、このような欠陥は同時に電子波の散乱をもたらす電気抵抗の主要な要因となる。これらがもたらす量子散乱を解析することで伝導現象を理論的に記述することを目指す。

(3) 磁気抵抗とホール効果 曲がった空間での特殊なランダウ準位形成と磁気伝導 磁気抵抗(磁場による電気抵抗の変化)とホール効果は、その系の電子の正体を知る上で非常に重要な現象である。3次元曲面電子系に一樣磁場を印加すると、場所によって磁場方向が曲面に対して垂直になったり平行になったりするため、「2次元の住人」からすれば非一樣な磁場を感じる特異な状況となる。このような、通常の2次元系とも3次元系とも異なる特殊な状況下でランダウ準位に相当するものがどのように形成され、そしてそれがどのような磁気伝導を与えるかを、理論的に明らかにする必要がある。

3. 研究の方法

ステージ I (平成 29 年) : 3次元曲面物質の電子構造、磁場中の電子状態の解明

種々の曲面構造に対するバンド計算、ワイル半金属相の探究、ランダウ準位構造

ステージ II (平成 30-31 年) : 量子伝導と散乱問題、磁気抵抗とホール効果の研究

トポロジカル欠陥、大域的ランダムネスのモデル化、磁場中電気伝導の理論構築

ステージ III (平成 30-31 年) : 他の物質種の3次元曲面物質への展開

TMD系、Si, Ge, Sn系(トポロジカル絶縁体)など、様々な物質種の曲面物質の研究

・ 3次元曲面物質の電子構造の解明

3次元曲面物質のモデルとして、まずは規則的な周期曲面結晶を考え、局所的・大域的構造と電子状態の関係を探る。具体的には、従来の研究を大幅に拡張し、様々な曲面のトポロジーとそれを実現する格子構造(7員環、8員環を含む様々なクラス)に対して強束縛モデルを構築し電子状態を計算する。特に価電子バンドと伝導バンドが点で接するワイル半金属、線で接するラインノード半金属などトポロジカル物質が実現する状況を探索し、そのトポロジーに依存した電子構造的な性質を見出す。また3次元曲面結晶における一樣磁場下での電子構造を、強束縛近似とパイエルス位相の方法で求める。有効磁場(面に垂直な磁場成分)が場所によって異なる状況において、局所的なランダウ準位がどのように接続し全体のスペクトルを作るのか明らかにする。

・ 量子伝導の解明

格子中のトポロジカル欠陥は特殊なゲージ場束(数学的には磁束に類似)としてディラック方程

式に取り入れられる。まず一つのゲージ場束に対する散乱行列を解くことで孤立した欠陥のもたらす電子波の散乱を明らかにする。さらに欠陥が系の中にある密度で分布することを考慮して、電気伝導度を定量的に見積もることを目指す。さらに、大域的な曲面構造を持つ不規則性を量子計算に取り込む。具体的には、いくつかの種類の曲面の3次元単位胞を考え、それを散乱行列として表現する。単位胞がランダムな組合さったマクロな系を散乱行列の羅列とみなすことで、電気伝導度の計算が可能となる。

・磁気抵抗とホール効果

前項までにおける磁場中電子状態の取扱いと、量子散乱を計算する手法を組み合わせることで、磁場中の電気伝導を理論的に記述する。弱磁場中の磁気抵抗、量子干渉による弱局在効果、さらに強磁場中による3次元ホール効果について解析する。特に、3次元多孔質グラフェンにおける強磁場電気伝導度の測定は今後の実験が待たれており、実験結果との詳細な比較検討が可能であると期待される。

4. 研究成果

3次元グラフェンを始めとする様々なグラフェン幾何学構造を舞台として、電子物性、フォノン物性に関する理論を構築した。

(1) 3次元グラフェンにおけるランダウ準位と量子ホール効果の理論

3次元周期的グラフェンネットワークにおける磁場中の電子スペクトルと量子ホール効果の理論的計算を行った。3次元グラフェンが2次元物質と大きく異なる点は、系が曲面で構成されるために、空間的に一様な磁場を印加したときも、面を垂直に貫く磁場成分が場所によって異なることである。電子状態計算の結果、局所的な磁場がゼロとなる軌跡（零磁場線）に沿って、一方方向のみ運動することができる特殊なカイラル1次元状態が現れることを見出した。フェルミエネルギーがこの領域にあるとき、3次元系にも関わらず、ホール伝導度が整数量子化することも明らかにした。磁場の角度を変化させると、零磁場線のトポロジーが変化し、それに伴いホール伝導度の量子化値が変化するトポロジカル転移が起こるがわかった。これは3次元空間に埋め込まれた2次元曲面という「次元の狭間」特有の物理現象として捉えることができる。

[T. Kiryu and M. Koshino, Phys. Rev. B 99, 085443 (2019)]

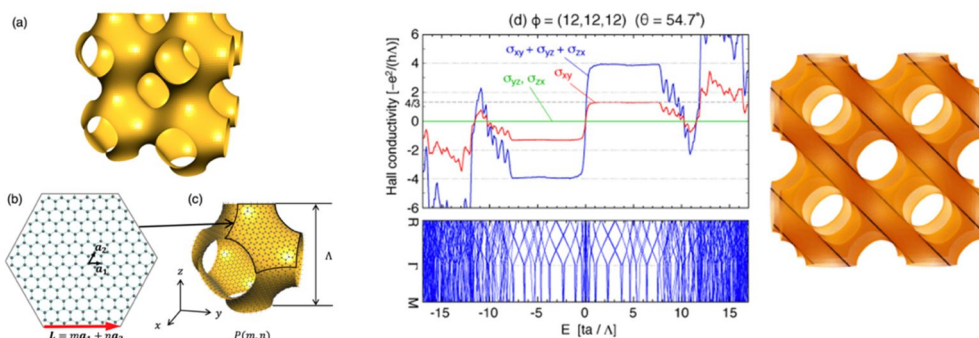


図1 .左：3次元グラフェンの原子構造の例 右：3次元グラフェンにおけるホール伝導度の量子化と、ゼロ磁場線の軌跡。

(2) 回転積層グラフェンにおける格子緩和の理論

グラフェンが積層して出来るグラファイトは通常 AB 積層構造と呼ばれる規則的な様式で積層するが、一方で層と層の結晶軸の角度に互いに回転して積層した系も存在する。このような系はねじれ2層グラフェン (twisted bilayer graphene) と呼ばれる。特に角度が小さい時は、2層の原子構造の干渉によって長周期のモアレ模様[図 2(a)]を生じ、電子物性に大きな影響を与える。ごく最近になり約1度の回転角で重ねたねじれ2層グラフェンで超伝導が観測され、大いに注目を集めている。従来多くの理論研究ではグラフェンが蜂の巣格子構造を保ったまま重なっていると仮定されるが、現実には原子は動くことができるため、層間の相互作用によって格子構造が歪み、モアレ模様に変化を与える。Nam と越野は、層間相互作用のエネルギーと歪みによる弾性エネルギーを適切にとりいれることで回転積層グラフェンの再安定構造を理論的に求めた。角度が小さくなる(即ちモアレ周期が大きくなる)につれて AB 領域または BA 領域が占める割合が多くなって、三角形のドメイン構造を形成することが明らかになった [図 2(b)]。[N.N.T. Nam and M. Koshino Phys. Rev. B 96, 075311 (2017).]

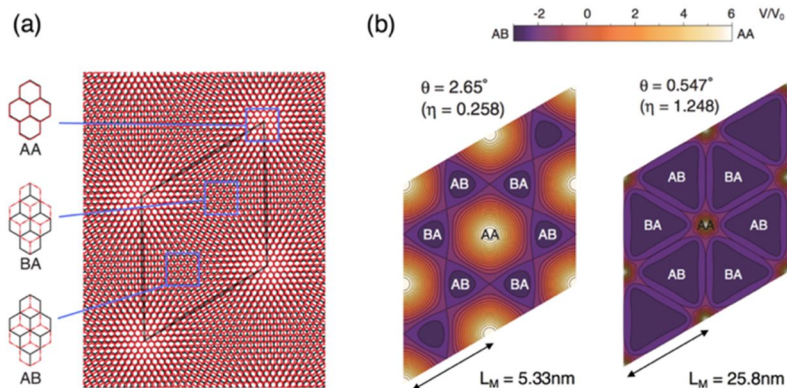


図 2: (a) 回転積層グラフェンの模式図。(b) 回転積層グラフェン(回転角 θ)の再安定構造における層間相互作用エネルギー。色が暗いほどエネルギーが低いことを表す。

(3) ねじれ 2 層グラフェンにおけるモアレフォノン

2018 年超伝導の発見以来大きな注目を集めているねじれ 2 層グラフェンであるが、これまでモアレ干渉模様による電子状態の変調が詳しく研究されてきたが、フォノンに対する影響は議論されてこなかった。ここでは、ねじれ 2 層グラフェンのフォノン状態を有効モデルによって初めて理論的に計算した。モアレ効果により、グラフェンの音響フォノンバンドはモアレフォノンバンドに再構成される。その固有振動モードはモアレ模様を「原子」とする、有効的な結晶の格子振動として理解されることを明らかにした。韓国高等科学院 (KIAS) の Young-Woo Son との共同研究 [M. Koshino, Y.-W. Son, Phys. Rev. B 100, 075416 (2019)].

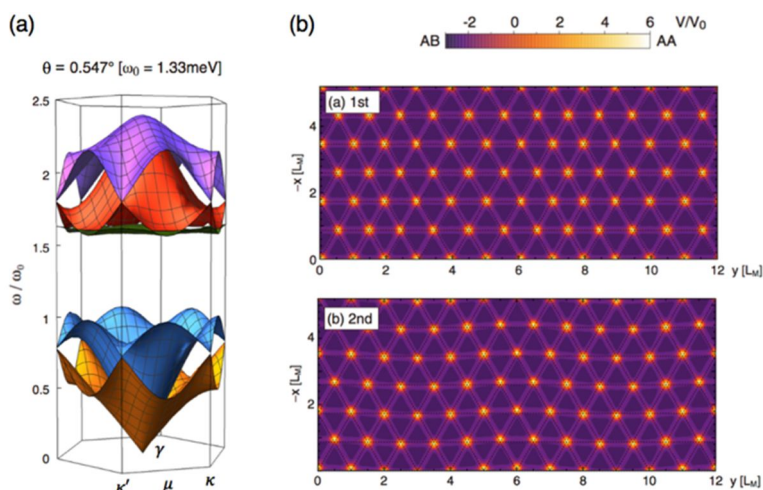


図 3: (a) ツイスト 2 層グラフェンにおけるモアレフォノンのエネルギー分散。(b) 下から 2 番目までのバンドに対応する振動の様子。

(4) 回転積層グラフェンにおけるワニエ軌道と有効モデルの構築

複合 2 次元物質は、格子構造が整合しないために系全体に共通の周期がなく、第一原理計算をはじめとする、周期結晶を対象とした標準的な理論手法が適用できない困難な物理系である。ねじれ 2 層グラフェンは数万個の原子が寄与する極めて複雑な電子系であり、理論解析の大きな障壁となっていたが、これをわずかに数個の有効原子に置き換えるワニエ軌道モデルを提唱し、困難な多体問題を計算可能にするための基礎を与えた。阪大の黒木、越智、東北大の是常、MIT の Liang Fu らとの共同研究。[M. Koshino, N.F.Q. Yuan, T. Koretsune, M. Ochi, K. Kuroki, L. Fu, Phys. Rev. X 8, 031087 (2018)]

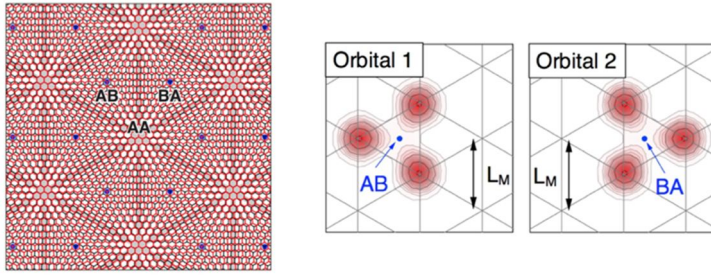


図 4: 回転積層グラフェンの模式図(右)と、その低エネルギーバンドにおけるワニエ軌道 (左)

(5) 30 度回転積層グラフェンにおける準結晶状態の発見

準結晶とは、結晶ともアモルファスとも異なる固体の第3の形態で、原子が特殊な規則で配列した物質である。越野らは、韓国 SKKU の実験グループとの共同で、特別な合成方法でグラフェン 2 枚が互いに 30 度で重なった系を生成することで、炭素のみからなる準結晶を実現することに成功した (図 5)。グラフェンの中の電子は、相対論的ディラック粒子とよばれる、質量のない特殊な粒子として振る舞うことが知られており、今回実現されたグラフェン準結晶は「ディラック準結晶」とも言うべき新しい物理系といえる。従来の準結晶と異なり、2 次元物質を特定の角度で重ねるという従来と全く異なる方法で実現されており、準結晶の パラダイムを爆発的に広げることが期待される。J. R. Ahn(成均館大学)、P. Moon(ニュー ヨーク大学上海)、P. Kim(ハーバード大学)Y. W. Son(韓国高等科学院)らとの共同研究。[Science 361, 782-786 (2018)]

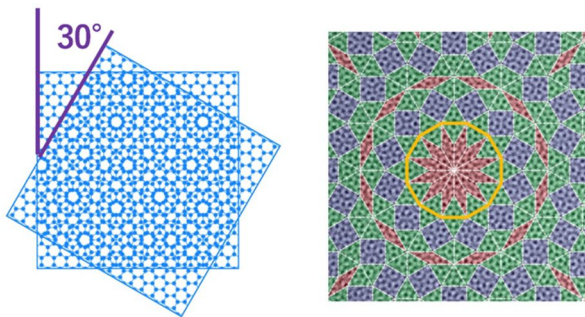


図 5: 30度積層2層グラフェン(左)とその準結晶構造(右)

(6) 30 度回転積層グラフェンにおける準結晶バンド構造の理論

30 度回転積層グラフェン準結晶系は、周期がないために通常バンド理論で記述することができない困難な系である。このような準周期積層系での電子構造を記述するための理論手法を考案し、それを用いて 30 度積層グラフェンにおける電子構造を解析した。12 個の円錐が交わる特別なエネルギーで共鳴状態を生じることを明らかにした (図 6)。この「擬バンド理論」理論を用いることで、電気伝導、光吸収を始めとする様々な物性が記述できると期待される。周期系を前提とした固体物理の 基礎概念が、準周期系でどのように変わるかは興味深い問題である。P. Moon(ニューヨーク大学上海)、Y.-W. Son(韓国高等科学院)との共同研究 [P. Moon, M. Koshino, Y.-W. Son, Phys. Rev. B 99, 165430 (2019)].

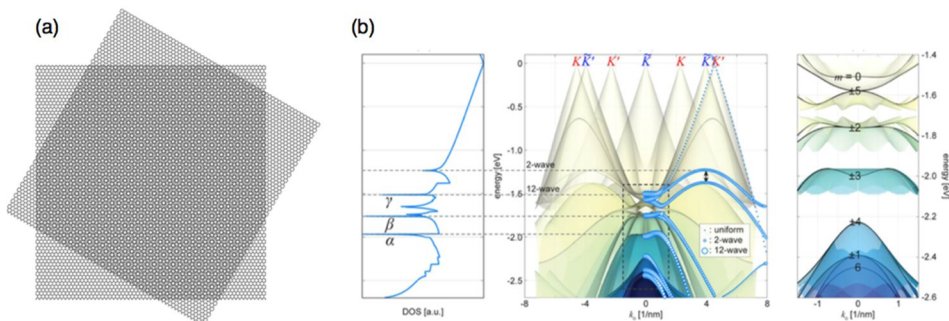


図 6: (a) 30度積層2層グラフェンと (b) その擬バンド構造。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計21件（うち査読付論文 21件 / うち国際共著 11件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Tsim Bonnie, Nam Nguyen N. T., Koshino Mikito	4. 巻 101
2. 論文標題 Perfect one-dimensional chiral states in biased twisted bilayer graphene	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 125409
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.101.125409	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 Zhao Sihan, Moon Pilkyung, Miyauchi Yuhei, Nishihara Taishi, Matsuda Kazunari, Koshino Mikito, Kitaura Ryo	4. 巻 124
2. 論文標題 Observation of Drastic Electronic-Structure Change in a One-Dimensional Moire Superlattice	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 106101
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.124.106101	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 Fujimoto Manato, Koschke Henri, Koshino Mikito	4. 巻 101
2. 論文標題 Topological charge pumping by a sliding moire pattern	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 41112
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.101.041112	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 Slizovskiy Sergey, McCann Edward, Koshino Mikito, Fal'ko Vladimir I.	4. 巻 2
2. 論文標題 Films of rhombohedral graphite as two-dimensional topological semimetals	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Communications Physics	6. 最初と最後の頁 164
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s42005-019-0268-8	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 Koshino Mikito	4. 巻 99
2. 論文標題 Band structure and topological properties of twisted double bilayer graphene	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 235406
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.99.235406	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 Moon Pilkyung, Koshino Mikito, Son Young-Woo	4. 巻 99
2. 論文標題 Quasicrystalline electronic states in 30 rotated twisted bilayer graphene	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 165430
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.99.165430	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 Fujimoto Manato, Koshino Mikito	4. 巻 100
2. 論文標題 Diamagnetic levitation and thermal gradient driven motion of graphite	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 45405
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.100.045405	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, Son Young-Woo	4. 巻 100
2. 論文標題 Moire phonons in twisted bilayer graphene	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 75416
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.100.075416	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 Toshiki Kiryu and Mikito Koshino	4. 巻 99
2. 論文標題 Quantum Hall effect in three-dimensional graphene	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Phys. Rev. B	6. 最初と最後の頁 85443
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) DOI:10.1103/PhysRevB.99.085443	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 Yang Li and Mikito Koshino	4. 巻 99
2. 論文標題 Twist-angle dependence of the proximity spin-orbit coupling in graphene on transition-metal dichalcogenides	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Phys. Rev. B	6. 最初と最後の頁 75438
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) DOI:10.1103/PhysRevB.99.075438	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, Noah F. Q. Yuan, Takashi Koretsune, Masayuki Ochi, Kazuhiko Kuroki, Liang Fu	4. 巻 8
2. 論文標題 Maximally-localized Wannier orbitals and the extended Hubbard model for the twisted bilayer graphene	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Phys. Rev. X	6. 最初と最後の頁 31087
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) DOI:10.1103/PhysRevX.8.031087	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 Tetsuro Habe and Mikito Koshino	4. 巻 98
2. 論文標題 Interaction-induced insulating states in multilayer graphenes	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Phys. Rev. B	6. 最初と最後の頁 125201
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) DOI:10.1103/PhysRevB.98.125201	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 Masayuki Ochi, Mikito Koshino, Kazuhiko Kuroki	4. 巻 98
2. 論文標題 Possible correlated insulating states in magic-angle twisted bilayer graphene under strongly competing interactions	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Phys. Rev. B	6. 最初と最後の頁 81102
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) DOI:10.1103/PhysRevB.98.081102	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 Sung Joon Ahn, Pilkyung Moon, Tae-Hoon Kim, Hyun-Woo Kim, Ha-Chul Shin, Eun Hye Kim, Hyun Woo Cha, Se-Jong Kahng, Philip Kim, Mikito Koshino, Young-Woo Son, Cheol-Woong Yang, Joung Real Ahn	4. 巻 361
2. 論文標題 Dirac Electrons in a Dodecagonal Graphene Quasicrystal	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Science	6. 最初と最後の頁 782-786
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) DOI:10.1126/science.aar8412	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 Carlos Forsythe, Xiaodong Zhou, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi, Abhay Pasupathy, Pilkyung Moon, Mikito Koshino, Philip Kim and Cory R. Dean	4. 巻 13
2. 論文標題 Band structure engineering of 2D materials using patterned dielectric super- lattices	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Nature Nanotechnology	6. 最初と最後の頁 566-571
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) DOI:10.1038/s41565-018-0138-7	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 該当する

1. 著者名 Takafumi Nomura, Tetsuro Habe, Ryota Sakamoto, and Mikito Koshino	4. 巻 2
2. 論文標題 Three-dimensional graphdiyne as a topological nodal-line semimetal	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Phys. Rev. Materials	6. 最初と最後の頁 54204
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) DOI:10.1103/PhysRevMaterials.2.054204	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 Y. Ito, Y. Tanabe, K. Sugawara, M. Koshino, T. Takahashi, K. Tanigaki, H. Aoki, M. Chen	4. 巻 20
2. 論文標題 Three-dimensional porous graphene networks expand graphene-based electronic device application	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Phys. Chem. Chem. Phys.	6. 最初と最後の頁 6024-6033
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) DOI:10.1039/C7CP07667C	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 A. Igarashi, M. Koshino	4. 巻 95
2. 論文標題 Magnetotransport in Weyl semimetal nanowires	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Phys. Rev. B	6. 最初と最後の頁 195306 1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) DOI:10.1103/PhysRevB.95.195306	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 G. Chen, M. Sui, D. Wang, S. Wang, J. Jung, P. Moon, S. Adam, K. Watanabe, T. Taniguchi, S. Zhou, M. Koshino, G. Zhang, Y. Zhang	4. 巻 17
2. 論文標題 Emergence of Tertiary Dirac Points in Graphene Moire Superlattices	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Nano Lett.	6. 最初と最後の頁 3576-3581
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) DOI:10.1021/acs.nanolett.7b00735	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 M. Koshino, K. Sugisawa, E. McCann	4. 巻 95
2. 論文標題 Interaction-induced insulating states in multilayer graphenes	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Phys. Rev. B	6. 最初と最後の頁 235311 1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) DOI:10.1103/PhysRevB.95.235311	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 Nguyen N. T. Nam, M. Koshino	4. 巻 96
2. 論文標題 Lattice relaxation and energy band modulation in twisted bilayer graphene	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Phys. Rev. B	6. 最初と最後の頁 75311 1-12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) DOI:10.1103/PhysRevB.96.075311	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20件 (うち招待講演 17件 / うち国際学会 13件)

1. 発表者名 Mikito Koshino
2. 発表標題 Moire phonons in the twisted bilayer graphene
3. 学会等名 Materials Research Meeting 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Mikito Koshino
2. 発表標題 Lattice relaxation and moire phonons in the twisted bilayer graphene
3. 学会等名 Recent Progress in Graphene and 2D Materials Research 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019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 Strongly Correlated Electron Systems 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Mikito Koshino
2. 発表標題 Physics of twisted bilayer graphenes and van-der Waals superlattices
3. 学会等名 IBS Center for Correlated Electron Systems Regular Seminar (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Mikito Koshino
2. 発表標題 Electronics properties in twisted 2D materials
3. 学会等名 3rd International Workshop on 2D material (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 越野幹人
2. 発表標題 ツイスト積層2次元物質の電子・フォノン物性(シンポジウム講演)
3. 学会等名 日本物理学会 2019 年秋季大会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Mikito Koshino
2. 発表標題 Electronics properties in twisted 2D materials
3. 学会等名 The 5th Conference on Condensed Matter Physics (Liyang, China, June 27-30, 2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Mikito Koshino
2. 発表標題 Electronic theory of twisted bilayer graphene
3. 学会等名 Korean Physical Society Spring Meeting 2019, (Daejeon Korea, April 24-26, 2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Mikito Koshino
2. 発表標題 Physics of twisted bilayer graphenes and van der Waals heterostructures
3. 学会等名 MIT Chez Pierre Seminar (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Mikito Koshino
2. 発表標題 Effective model for the twisted bilayer graphene
3. 学会等名 The 9th A3 Symposium on Emerging Materials (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Mikito Koshino
2. 発表標題 Effective theory for the flat band in the twisted bilayer graphene
3. 学会等名 The 10th Recent Progress in Graphene and Two-dimensional Materials Research Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Mikito Koshino
2. 発表標題 Physics of incommensurate 2D materials
3. 学会等名 EU-Japan Tokyo Satellite Symposium Program on 2D materials (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Mikito Koshino
2. 発表標題 Effective theory for the twisted bilayer graphene
3. 学会等名 19th International conference on the Science and Application of Nanotubes and Low- dimensional Materials (NT18) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Mikito Koshino
2. 発表標題 Electronic properties of incommensurate 2D crystals
3. 学会等名 19th International Symposium on the Physics of Semiconductors and Applications (ISPSA 2018) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 桐生敏樹, 越野幹人
2. 発表標題 磁場中の 3 次元多孔質グラフェンの電子状態の理論的研究
3. 学会等名 日本物理学会 2017 年秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 林智宏, 越野幹人
2. 発表標題 グラフェンのトポロジカル欠陥における電子の有効理論
3. 学会等名 日本物理学会 2017 年秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 M. Koshino
2. 発表標題 Magnetotransport in Weyl semimetal nanowires
3. 学会等名 APS March Meeting 2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 M. Koshino
2. 発表標題 Physics of Moire Interfaces in 2D Materials
3. 学会等名 5th Ito International Research Center (IIRC) Conference (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 M. Koshino
2. 発表標題 Hofstadter 's butterfly in 2D and 3D
3. 学会等名 Symposium: Hofstadter Butterfly (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 M. Koshino
2. 発表標題 Physics of moire superlattices
3. 学会等名 Collaborative Conference on 3D & Materials Research (CCMR 2017) (招待講演)
4. 発表年 2017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
研究協力者	桐生 敏樹 (Kiryu Toshiki)		
研究協力者	林 智宏 (Hayashi Tomohiro)		
研究協力者	田邊 洋一 (Tanabe Yoishi)		
研究協力者	伊藤 良一 (Ito Yoshikazu)		