

2025 年 3 月 27 日

東京大学

北陸先端科学技術大学院大学

大阪大学

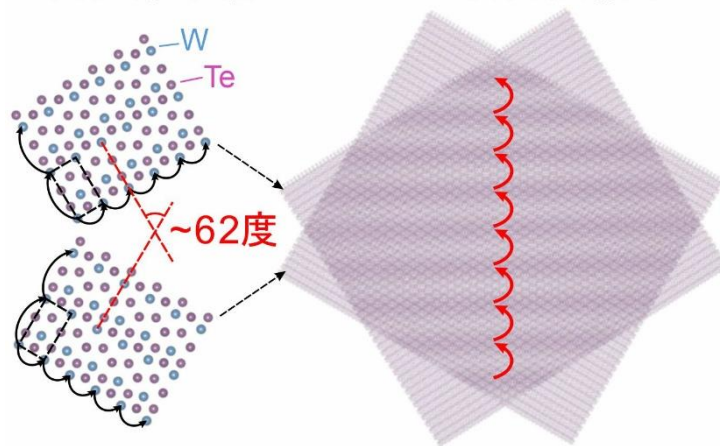
科学技術振興機構 (JST)

二次元格子をひねって重ねると一次元超格子が出現 ——二次元原子層物質が一次元物性研究の新しいプラットフォームに——

発表のポイント

- ◆シート状の原子層二枚を、特定の角度に向きをずらして重ねると、一方向に縞模様を持つ一次元モアレ超格子構造が形成できることを発見しました。
- ◆従来のモアレ超格子は原子層の構造と類似の二次元の周期性を持ちますが、本研究では、一次元の周期性しか持たない新しいコンセプトのモアレ超格子を提案・実証しました。
- ◆モアレ超格子による原子層の性質の人工制御物性変調や、一次元性ならではの異方性の高い新奇物性研究の新しいプラットフォームになることが期待されます。また、素子応用に向けた研究の発展にも寄与することが期待されます。

二次元原子層 × 2 → 一次元超格子



二次元原子層 WTe_2 のツイスト積層による一次元モアレ超格子の形成

概要

東京大学 生産技術研究所の張 奕勁 助教と町田 友樹 教授らの研究グループは、北陸先端科学技術大学院大学 ナノマテリアル・デバイス研究領域の大島 義文 教授および高村 由起子 教授の研究グループ、大阪大学大学院 理学研究科の越野 幹人 教授の研究グループと共同で、原子層物質（注 1）の人工ツイスト二層構造（注 2）において一次元の周期性を持つモアレ超格子（注 3）が実現できることを明らかにしました。

本研究では、二テル化タングステン (WTe_2) の原子層二枚を使用し、それぞれの結晶方位に角度差（ツイスト角）を付けた状態で人工的に重ね合わせた構造（ツイスト二層構造）を作製し、透過型電子線顕微鏡（TEM）を用いて原子の配列パターンを直接観察しました。一般的にツイスト二層構造で出現するモアレ超格子内の原子配列パターンは二次元の周期性を持って変

化しますが、本研究では特定のツイスト角において配列パターンの変化が一次元的になる、すなわち周期性が一方向のみになることを世界で初めて示しました（図 1）。また、本モアレ超格子が従来のモアレ超格子とは異なる原理で形成されていることを理論的に突き止めました。一次元性による母物質の物性変調に伴う新奇物性探索の新しい舞台になることが期待されます。

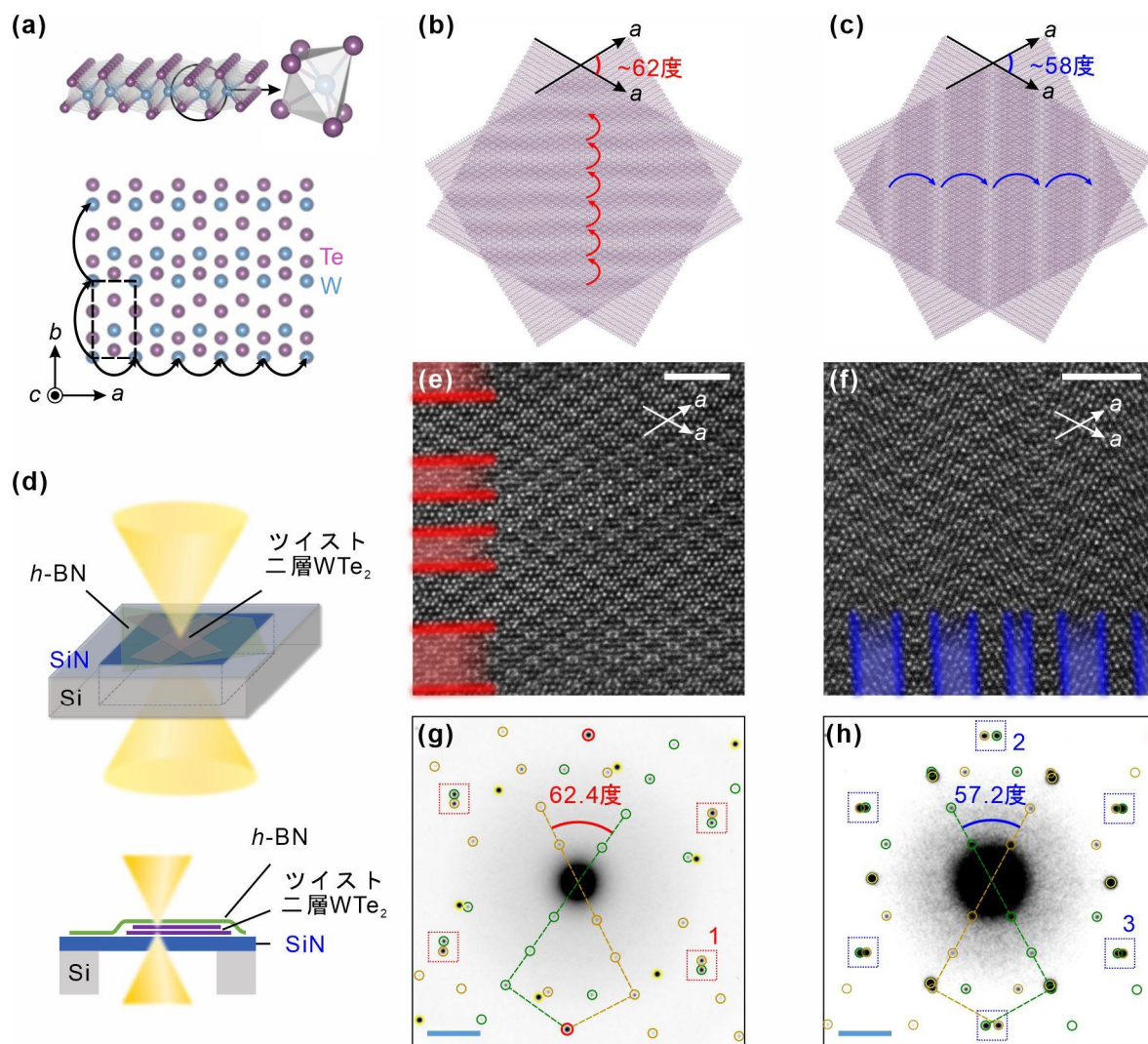
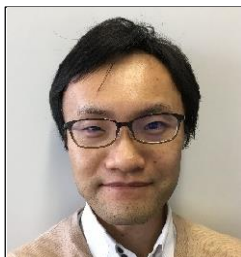


図 1：透過型電子線顕微鏡を用いたツイスト二層 WTe_2 の原子像観察。

(a) WTe_2 原子層の模式図。 a 軸方向と b 軸方向で周期性が異なる。(b, c) WTe_2 原子層二枚をツイスト角 62 度 (b) および 58 度 (c) でツイスト積層させた構造。単独の原子層が持つ周期性与異なる一次元的な周期性が出現する。(d) 試料構造および実験の模式図。 $h\text{-BN}$ は試料の保護層。(e, f) ツイスト角 62 度 (e) および 58 度 (f) で作成したツイスト二層 WTe_2 試料の原子像。白いスケールバーは 10 nm (ナノメートル)。(g, h) 62 度 (g) および 58 度 (f) ツイスト試料の電子回折像。緑と茶色の点がそれぞれの原子層の構造の周期性を示す回折スポット。赤枠 (e) と青枠 (f) で示された回折スポットのペアがモアレ超格子の周期性を表す。どちらの場合も回折スポットのペアが平行に並んでいることから、モアレ超格子が一方向のみに周期性を持っていることがわかる。青いスケールバーは 2 nm^{-1} (ナノメートルインバース)。

発表者コメント：張 奕勁助教の「もしかする未来」



本研究は偶然の発見から始まりました。パワーポイントの上で結晶構造を二つ重ね、片方をぐるぐる回転させていたところ一瞬縞模様が見えたのがきっかけです。モアレ超格子の原子配列を実際に観察し、また、理論的にその起源と一次元性を示すことができました。カーボンナノチューブなどの一次元物質は低次元特有の現象を示しますが、その特性を残したまま大面積化することは困難でした。今回、ナノチューブよりも面積の大きい原子層物質を用いて一次元構造が作製できたので、今後は一次元性を反映した物性の探索を進めていきたいと思っています。

発表内容

原子層物質の人工ツイスト積層構造技術は、現在の原子層物質を用いた基礎物性研究の中心的な技術の一つです。異なる原子層物質を積層する場合だけでなく、同一の原子層物質を積層する場合であっても、それぞれの結晶方位をずらして積層（ツイスト積層）すると、元の物質の持つ周期性よりも大きな周期性を持つモアレ超格子が出現します。モアレ超格子が出現することで、元の原子層物質の物性を大きく変調し、新物性を誘起することが可能になります。例えば、単層グラフェンをツイスト角 1.05 度でツイスト積層すると、低温で超伝導転移を誘起できることが知られています。一般的に、モアレ超格子の大きさはツイスト角の増加とともに小さくなるため、これまでの研究は低ツイスト角領域（0 度付近）を中心に行われてきました。

この度、本研究チームは、原子層物質二テルル化タングステン (WTe_2) を用いた研究から、高ツイスト角でもモアレ超格子が出現し、さらに、特定の角度 (62 度と 58 度付近の二点) では一次元的なモアレ構造が出現することを発見しました。 WTe_2 の特徴は、結晶構造が異方的、すなわち、結晶方位によって周期の大きさが異なることです (図 1a)。代表的な原子層物質であるグラフェンや二セレン化タングステン (WSe_2) は等方的 (物理的な性質が方向によって異なること) な結晶構造を持っており、高ツイスト角ではモアレ超格子は出現しません。本研究では、透過型電子顕微鏡 (TEM) を用いてツイスト二層 WTe_2 の原子配列パターンを直接観察することで高ツイスト角領域における一次元モアレ超格子を実験的に示しました (図 1c, d)。また、構造の周期性を示す電子回折パターン (注 4) において、モアレ超格子の周期を示す回折スポットのペアが全て平行になるという特徴を観測しました (図 1e, f)。

モアレ超格子の周期性は元の原子層の持つ周期性から説明できますが、従来のモデルでは高ツイスト角領域におけるモアレ超格子を説明できません。本研究では従来のモデルを拡張することで、高ツイスト角領域においてモアレ超格子が出現し、さらに、62 度と 58 度付近でモアレ超格子が一次元になる、すなわち、周期性が一方向のみになることを理論的に示すことに成功しました (図 2)。加えて、電子回折パターンのシミュレーションから、実験的に観測された回折スポットペアの特徴 (図 1e, f 参照) が一次元性を示す証拠になっていることを理論的に示すことにも成功しました (図 3)。また、一次元モアレ超格子の出現は WTe_2 に特異な現象ではなく、異方的な結晶構造を持つすべての原子層物質で起こりうる普遍的な現象であることも明らかにしました。

一次元的なモアレ超格子を形成することで、従来の二次元的なモアレ超格子で誘起された物性変調とは異なる変調効果が期待されます。従来、カーボンナノチューブなど一次元物質の持つ物性の研究や素子応用には、無数のチューブを配向させた膜の形成という技術的な障壁がありましたが、人工ツイスト積層構造の一次元モアレ超格子ではマイクロメートルスケールで

一次元構造が広がるため、基礎研究のみならず素子応用に向けた研究の発展にも寄与することが期待されます。

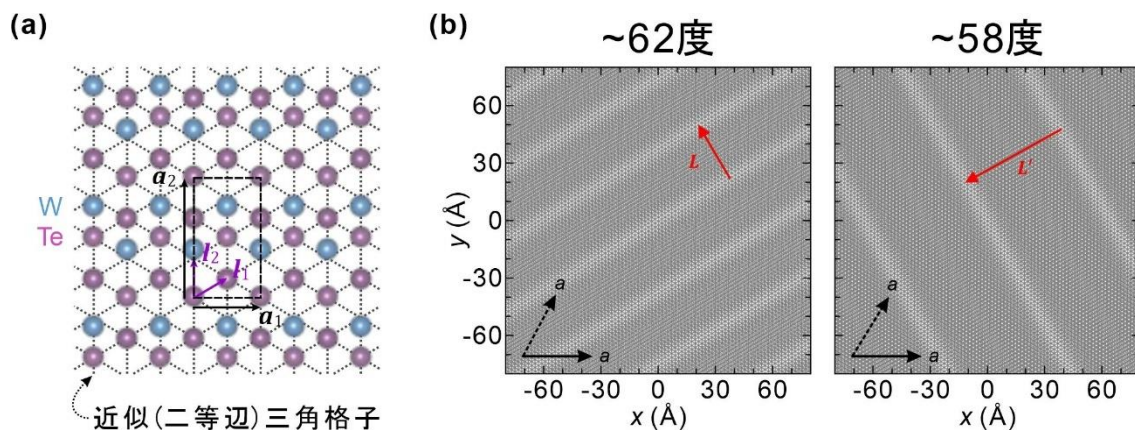
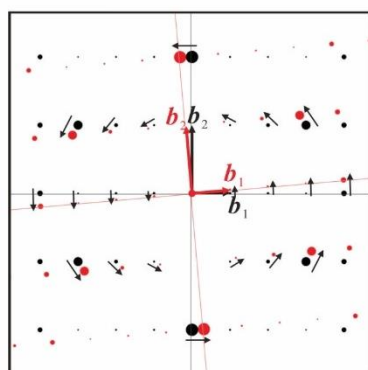
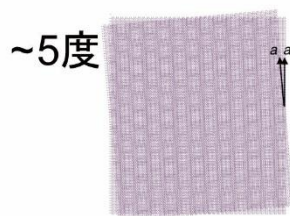


図 2：近似三角格子モデルを用いた一次元モアレ超格子の再現。

(a) WTe_2 原子層の結晶構造。格子ベクトル a_1 、 a_2 で囲われた長方形がユニットセル（周期一つ分の構造）。W 原子と Te 原子を区別せず原子位置に多少の動きを許容すると、格子ベクトル l_1 、 l_2 で定義された三角格子（灰色点線）で近似できる。近似された格子は正三角形ではなく二等辺三角形になっている。(b) 近似三角格子をツイスト積層した場合のモアレ超格子。一次元構造が再現されている。

従来のモアレ超格子
(低角度・二次元)



本研究のモアレ超格子
(高角度・一次元)

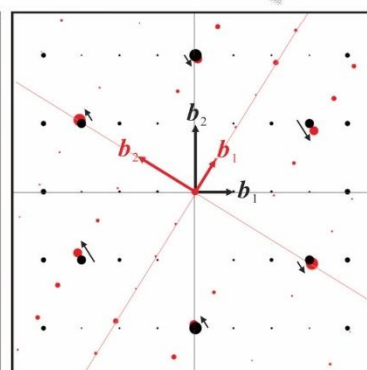
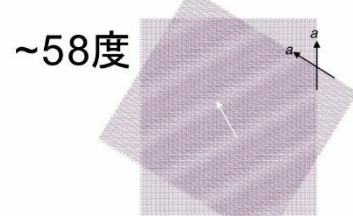
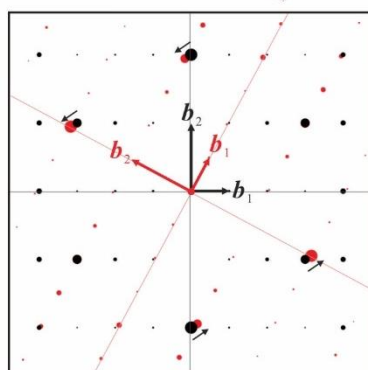
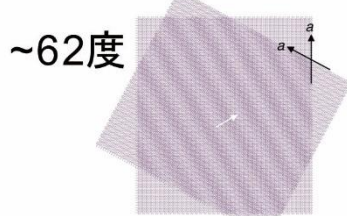


図 3：人工ツイスト二層 WTe_2 の電子回折パターンのシミュレーション。

従来の低ツイスト角の場合と本研究における高ツイスト角の場合の比較。ベクトル b_1 、 b_2 はそれぞれ格子ベクトル a_1 、 a_2 (図 2a 参照) の周期を示す逆格子ベクトル。黒点と赤点がそれぞれの原子層に由来する原子回折スポット。黒矢印で示された解析スポットのペアがモアレ超格子の周期性（大きさおよび方向）を決定する。低ツイスト角の場合モアレ超格子の周期は様々な方向を向くため、二次元の超格子となる。一方 62 度と 58 度付近ではすべて平行になり一方向にしか周期性が存在しないため、一次元の超格子となる。

発表者・研究者等情報

東京大学生産技術研究所

張 奕勁 助教

町田 友樹 教授

北陸先端科学技術大学院大学ナノマテリアル・デバイス研究領域

大島 義文 教授

高村 由起子 教授

大阪大学大学院理学研究科

越野 幹人 教授

論文情報

雑誌名：ACS Nano

題 名：Intrinsic One-Dimensional Moiré Superlattice in Large-Angle Twisted Bilayer WTe₂

著者名：Xiaohan Yang, Yijin Zhang*, Limi Chen, Kohei Aso, Wataru Yamamori, Rai Moriya, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi, Takao Sasagawa, Naoto Nakatsuji, Mikito Koshino, Yukiko Yamada-Takamura, Yoshifumi Oshima & Tomoki Machida*

DOI: 10.1021/acsnano.4c17317

URL: <https://doi.org/10.1021/acsnano.4c17317>

研究助成

本研究は、科学技術振興機構（JST）戦略的創造研究推進事業 さきがけ「トポロジカル材料科学と革新的機能創出（研究総括：村上 修一）」研究領域における「極性二次元物質とそのヘテロ構造におけるバルク光起電力効果（JPMJPR20L5）」、同 さきがけ「新原理デバイス創成のためのナノマテリアル（研究総括：岩佐 義宏）」研究領域における「顕微分光による二次元物質デバイスの物性開拓（JPMJPR24H8）」、同 戦略的創造研究推進事業 CREST「原子・分子の自在配列・配向技術と分子システム機能（研究総括：君塚 信夫）」研究領域における「原子層のファンデルワールス自在配列とツイスト角度制御による物性の創発（JPMJCR20B4）」、日本学術振興会 科学研究費助成事業 学術変革領域（A）「2.5次元物質科学：社会変革に向けた物質科学のパラダイムシフト」（課題番号：JP21H05232、JP21H05233、JP21H05234、JP21H05235、JP21H05236）、および文部科学省 マテリアル先端リサーチインフラ事業（課題番号：JPMXP1223JI0033）の支援により実施されました。

用語解説

（注1）原子層物質

原子層物質とは、原子1個または数個分の厚みしかない層状の物質。原子間力で層間が弱く結合しており、二次元物質とも呼ばれる。層状構造を持つ単結晶から、スコッチテープなどの粘着性のテープを貼り付けて剥がすことで得られる（テープに付着している）、数ナノメートル以下まで薄くした二次元シート状の薄膜として作製する。代表例としてグラフェン、二硫化モリブデンなどが挙げられる。

(注2) ツイスト二層構造

原子層を二つ用意し、それぞれの結晶方位の間に相対的な角度差をつけて人工的に重ねた構造。

(注3) モアレ超格子

複数の原子層物質を重ねた際に出現する新たな周期構造。元の原子層物質の構造が持つ周期とは異なる周期性を持つ。

(注4) 電子回折パターン

物質に電子線を照射した際に観察される干渉パターン。物質の構造の持つ対称性や周期性を反映したパターンが出現する。

問合せ先

(研究内容については発表者にお問合せください)

東京大学 生産技術研究所

助教 張 奕勁 (ちょう えきけい)

Tel : 03-5452-6158 E-mail : yzhang[at]iis.u-tokyo.ac.jp

教授 町田 友樹 (まちだ ともき)

Tel : 03-5452-6742 E-mail : tmachida[at]iis.u-tokyo.ac.jp

<報道に関する問合せ>

東京大学 生産技術研究所 広報室

Tel : 03-5452-6738 E-mail : pro[at]iis.u-tokyo.ac.jp

北陸先端科学技術大学院大学 広報室

Tel : 0761-51-1032 E-mail : kouhou[at]ml.jaist.ac.jp

大阪大学 理学研究科 庶務係

Tel : 06-6850-5280 E-mail : ri-syomu[at]office.osaka-u.ac.jp

科学技術振興機構 広報課

Tel : 03-5214-8404 E-mail : jstkoho[at]jst.go.jp

<JST 事業に関する問合せ>

科学技術振興機構 戦略研究推進部 グリーンイノベーショングループ

安藤 裕輔 (あんどう ゆうすけ)

Tel : 03-3512-3526 E-mail : presto[at]jst.go.jp