

令和 4 年 5 月 27 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02593

研究課題名（和文）ファンデルワールス超構造の量子物性開拓

研究課題名（英文）Exploration of quantum phenomena emerging at van der Waals superstructures

研究代表者

中野 匡規（Masaki, Nakano）

東京大学・大学院工学系研究科（工学部）・特任准教授

研究者番号：70592228

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）：本研究では、種類が豊富で多彩な物性を示す遷移金属カルコゲナイドに注目し、これを原子層数層レベルにまで薄くした際に初めて発現する2次元物性の開拓に取り組んだ。特に、半導体や酸化物の分野で確立された技術である分子線エピタキシー（MBE）法を利用したlayer-by-layer成長に取り組み、劈開が困難な物質や薄膜準安定相などを含む様々な2次元物質のエピタキシャル成長と、その2次元極限における電子物性を解明することに成功した。また、2次元超伝導体と2次元強磁性体を積層させた磁性ファンデルワールス超構造のMBE成長に成功し、その界面において、単一物質では得られない特異な電子状態を実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の学術的意義としては、まず劈開が困難な物質や薄膜準安定相の超薄膜化に成功し、その2次元物性を解明した点が挙げられる。また、それらの物質を積層させたファンデルワールス超構造を作製し、単一物質では得られない特異な電子状態を実現した点にも大きな意義がある。一方、大局的な視点からは、2次元物質の大面积試料を作製するためのプロセスを確立した点に大きな意義がある。今後はこの大面积性を生かして、従来は試料サイズの関係で制限されていた物性評価手法の飛躍的拡大と、それに伴う2次元物性の理解の深化・発展、さらには様々な機能性デバイスの作製を通じた応用研究の飛躍的発展などが期待される。

研究成果の概要（英文）：We explored quantum phenomena emerging when a material is thinned down to the two-dimensional (2D) limit. We in particular focused on transition-metal dichalcogenides, which are known to exhibit various types of properties depending on a combination of transition metals and chalcogens. By using molecular-beam epitaxy (MBE) technique that has been widely used in the field of semiconductors and oxides, we successfully realized layer-by-layer epitaxial growth of a wide variety of 2D materials including hardly-cleavable and thermally-metastable compounds, and revealed their electronic properties at the 2D limit. We also succeeded in fabrication of a magnetic van der Waals superstructure based on a 2D superconductor and a 2D ferromagnet by MBE, and demonstrated an emergent electronic ground state that could not be achieved by an individual material.

研究分野：二次元物質科学

キーワード：薄膜・界面物性 二次元物質 エピタキシー

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

グラフェンの登場以降、原子層わずか数層からなる 2 次元物質が示す特異な電子物性が注目を集めている。特に遷移金属カルコゲナイド (TMDC) を一層だけ取り出した単層 TMDC は代表的な 2 次元物質であり、空間反転対称性の破れやスピン軌道相互作用などの特徴に起因して多彩な創発物性を示すことがわかってきた。このような単層 TMDC の作製には、グラフェンの単離に用いられた劈開法を用いる場合が多いが、劈開法には試料サイズが小さいことや単層化が可能な物質が限定的などの問題がある上に、母物質へのドーピングによる機能化や異なる物質を積層させた超構造の構築など、物質科学の観点に立った研究を行う目的にはあまり適さない。そのような目的に対しては、半導体や酸化物の分野で確立された技術である分子線エピタキシー (MBE) 法を用いることが最適であるが、これまで MBE による 2 次元物質のエピタキシャル成長の研究例は限定的であり、特に超構造の物性にまで踏み込んだ研究は皆無であった。

### 2. 研究の目的

以上の背景を踏まえて、本研究の研究目的を以下のように設定した。

- (1) 単層物性の開拓：MBE による TMDC 単結晶薄膜の layer-by-layer 成長を確立し、あらゆる TMDC の単層化と、その単層物性の開拓に取り組む。また、様々な TMDC へのドーピングや構造多型の作り分けなどに取り組み、新奇量子物質の人工合成を実現する。
- (2) 界面物性の開拓：異なる TMDC を積層させたファンデルワールス超構造を作製し、単一物質では得られない物性や機能性の開拓に取り組む。
- (3) 革新デバイスの実現：様々な TMDC 超薄膜・超構造を用いた電界効果デバイスを作製し、次世代エレクトロニクスの基盤となりえる革新デバイスを動作実証する。

### 3. 研究の方法

本研究では「MBE による試料作製」、「電子線回折や X 線回折などによる構造評価」、「電気抵抗測定や磁化測定などによる電子物性の評価」を基本的なサイクルとし、これを様々な物質系やその積層超構造に適用することで、様々な新奇物性や機能性の開拓を行うという方法を取った。以下では前述の 3 つの研究目的に対して実際に行ったことの概略を述べる。

#### (1) 単層物性の開拓

本項目では、できるだけ多くの層状物質の超薄膜化にトライし、うまく超薄膜化を実現できた場合にはその電子物性を明らかにすることを目指した。特に、劈開が困難な物質系や薄膜準安定相などの、従来の劈開法によるアプローチでは対象外であった物質系に注目することで、MBE によるアプローチならではの成果に繋がるように意識した。具体的な成果の詳細は後述するが、様々な超伝導体や磁性体の超薄膜化を実現し、その 2 次元物性を明らかにすることに成功した。また、薄膜でのみ存在する物質相・電子相・磁性相を実現することにも成功した。

#### (2) 界面物性の開拓

本項目では、(1) で得られた物質系をベースとするファンデルワールス超構造の構築にトライし、界面での近接効果に起因した創発電子物性を実現することを目指した。特に、2 次元超伝導体と 2 次元強磁性体を積層させたファンデルワールス超構造を中心に、良質なヘテロ界面の構築と、主に輸送特性の評価に基づく新奇物性開拓に取り組んだ。

#### (3) 革新デバイスの実現

本項目では、(1) で得られた強相関 2 次元物質超薄膜や薄膜準安定相、あるいは (2) で得られたファンデルワールス超構造に対して電界効果デバイスを作製し、様々な強相関 2 次元物性を電氣的にスイッチングすることで新機能を実現することを目指した。特に、ゲート媒質にポリマー電解質を用いる電気化学デバイスに注目し、層間へのアルカリ金属イオンのインターカレーションに伴う電子数変化を利用した物性制御に取り組んだ。

### 4. 研究成果

以下では本研究で得られた具体的な研究成果に関して、既に論文化されている内容と、現在論文投稿中の内容、そして今後論文化する予定の内容を中心に詳述する。

#### (1) 単層物性の開拓

##### ① 遍歴反強磁性体 $V_5Se_8$ のエピタキシャル成長と創発強磁性の発見 (図 1a、図 2a)

2 次元極限まで磁気秩序を示す 2 次元磁性体として、ファンデルワールス結晶の一種である  $Cr_2Ge_2Te_6$  や  $CrI_3$ 、あるいは  $Fe_3GeTe_2$  などを劈開して得られる単結晶ナノフレークが広く研究されている。一方、MBE による 2 次元磁性体の開拓も精力的に行われているが、これまで信頼性のある実験結果は報告されていない。我々は 3d 遷移金属を含む TMDC に注目して 2 次元磁性体の探索を行ってきたが、特に MBE で V と Se の化合物を作製すると  $V_5Se_8$  という物質が選択的

に成長し、これが遍歴強磁性を示すことを発見した。 $V_3Se_8$  はバルクでは遍歴反強磁性体であることが知られており、この遍歴強磁性は薄膜でのみ現れる創発物性である。また、膜厚依存性などを検討することにより、この強磁性が異方性の弱いハイゼンベルグ強磁性であることを明らかにした。このような異方性が弱い強磁性体は外部から磁気特性を変調できる可能性があるため重要である。実際に、この  $V_3Se_8$  と  $NbSe_2$  を積層させたファンデルワールス超構造では  $NbSe_2$  の影響で  $V_3Se_8$  の磁性が大きく変化することを明らかにした（後述）。

#### ② 準安定相 $3R-TaSe_2$ のエピタキシャル成長とイジング超伝導状態の実現（図 1b）

層状超伝導体である  $NbSe_2$  を単層にすると、超伝導を担うクーパー対のスピンの面直方向にロックされた特異な超伝導状態（イジング超伝導状態）を形成することが知られている。一方、類縁物質である  $TaSe_2$  は  $NbSe_2$  とよく似たバンド構造を持つことが知られており、単層化に伴って  $NbSe_2$  と同様にイジング超伝導状態を形成するものと期待されるが、超薄膜領域における超伝導物性はこれまで報告がない。この  $TaSe_2$  を MBE で作製したところ、まずバルクには存在しない構造多型である  $3R$  構造が選択的に得られることがわかった。また、この  $3R$  構造  $TaSe_2$  は熱力学的最安定相である  $2H$  構造  $TaSe_2$  と比べて一桁高い超伝導転移温度を示す一方で、 $2H$  構造  $TaSe_2$  で観測される電荷密度波相は消失することがわかった。さらに、膜厚が 6 層の試料に対して面内上部臨界磁場の温度依存性を検討した結果、6 層という比較的厚い試料においても 2 次元超伝導的な振る舞いを示し、かつ単層  $NbSe_2$  とほぼ同程度の巨大な上部臨界磁場を有するイジング超伝導状態を形成することがわかった。このように複数層でも強固なイジング超伝導状態が形成されることは、 $3R$  構造の特殊な積層様式と  $TaSe_2$  が内包する巨大なスピン軌道相互作用に起因しているものと考えられる。

#### ③ 単層 $CrSe_2$ の構造多型制御と新奇電子状態の実現（図 1c）

$3d$  遷移金属を含む TMDC は、強い電子相関に起因した特異な電子物性の発現が期待されるが、一般に劈開が困難であるため、その単層物性はほぼ未開拓である。なかでも  $CrSe_2$  はバルク自体が極めて不安定な物質であり、特殊な手法でしか単結晶試料を作製することができないため、研究例がほとんどない。この  $CrSe_2$  を MBE で作製したところ、まずバルクで存在することが知られている  $T$  構造の  $CrSe_2$  を再現性良く作製可能であることがわかった。そして、この  $T$  構造  $CrSe_2$  の単層試料に対して角度分解光電子分光（ARPES）による電子構造の評価を行い、この物質の基底状態が強相関絶縁体であることを明らかにした。一方で、成長条件を調節することで、バルクには存在しない  $H$  構造の  $CrSe_2$  を準安定相として合成できることがわかった。そして、この  $H$  構造  $CrSe_2$  の単層試料に対して ARPES 測定を行い、この物質が  $H$  構造  $MoSe_2$  や  $H$  構造  $WSe_2$  と同様のバレー半導体であることを明らかにした。

#### ④ 遍歴面直強磁性体 $Cr_3Te_4$ のエピタキシャル成長と 2 次元イジング強磁性の実現（図 2b）

$Cr$  と  $Te$  の化合物には  $CrTe_2$  の層間にインターカレートされた  $Cr$  の濃度に応じて様々な種類が存在し、そのうちのいくつかは室温を超える強磁性転移温度 ( $T_C$ ) を示すことが知られている。そのように高い  $T_C$  を有する層状強磁性体の 2 次元極限における振る舞いを明らかにするために、MBE による  $Cr-Te$  化合物のエピタキシャル成長に取り組んだ。まず作製した試料の詳細な構造評価を行うことにより、得られた物質が  $Cr_3Te_4$  ( $Cr_{1/2}CrTe_2$ ) であることを明らかにした。そして、薄膜作製後に熱処理を施すことで、バルクと同程度の  $T_C$  が得られることを見出した。次に、熱処理前後の試料に対して磁気異方性の評価を行い、両者ともに面直磁気異方性を示すイジング強磁性体であることを明らかにすると共に、特に熱処理前の試料が非常に大きな面直磁気異方性を示すことを発見した。さらに、それぞれの試料に対して  $T_C$  の膜厚依存性を評価し、熱処理後の試料は膜厚の減少に伴って  $T_C$  も減少するのに対して、熱処理前の試料は 2 次元極限まで  $T_C$  がほとんど変化しないことを発見した。このように 2 次元極限まで  $T_C$  がほぼ変化しないという振る舞いは極めて珍しく、交換相互作用が 2 次元的であることを示唆している。詳細な熱処理温度依存性を検討したところ、熱処理の有無で得られる状態は異なる 2 つの磁性相に相当し、両者はバンドの特異点によって隔てられていることを示唆する結果が得られた。

#### ⑤ 遍歴面内強磁性体 $Cr_{1/3}NbSe_2$ のエピタキシャル成長と 2 次元 XY 強磁性の実現（図 2c）

TMDC の層間ギャップに磁性イオンがインターカレートされた物質系は、磁性イオンの種類や濃度と母物質の組み合わせに応じて豊富な種類が存在し、その磁性も多岐に渡ることが知られている。また最近では、これらの物質系のトポロジカル物性にも注目が集まっており、2 次元磁性とトポロジカル磁性の両方の観点から興味深い物質系である。これらの物質系のうち、まずは  $NbSe_2$  の層間に  $Cr$  イオンをインターカレートした物質に注目し、エピタキシャル成長を試みた。その結果、製膜条件を調節することで  $Cr_{1/4}NbSe_2$  と  $Cr_{1/3}NbSe_2$  を選択的にエピタキシャル成長させることが可能であることや、 $Cr_{1/3}NbSe_2$  は明瞭な面内強磁性を示すことなどがわかった。さらに、 $Cr_{1/3}NbSe_2$  の超薄膜を作製し、その磁性を評価することで、この物質は単層極限まで金属的な振る舞いを示し、かつ面内強磁性を維持していることを明らかにした。このような遍歴性を示す 2 次元 XY 強磁性体は他に例がなく、BKT 転移に代表される 2 次元 XY 強磁性体に特有の相転移現象の観測につながるものと期待される。

## (2) 界面物性の開拓

### ① $V_5Se_8/NbSe_2$ ヘテロ構造における特異な磁気近接効果の発見 (図 3a)

単層  $NbSe_2$  はゼーマン型スピン軌道相互作用により伝導キャリアのスピンが面直方向にロックされた特異な電子状態を示す。このような強い異方性を持つスピン偏極キャリアが隣接する磁性体の磁性に与える影響を検討するために、 $NbSe_2$  と遍歴強磁性体である  $V_5Se_8$  のヘテロ構造を作製し、磁気輸送特性を評価した。その結果、 $V_5Se_8$  の膜厚が 3 層の試料においても明瞭な面直磁気異方性が観測され、 $T_c$  も単体の場合と比べて大きく上昇することがわかった。これは、 $NbSe_2$  におけるスピン偏極キャリアが  $V_5Se_8$  の磁気異方性に強く影響し、元々は弱い異方性を示すハイゼンベルグ強磁性体であった  $V_5Se_8$  が強い一軸異方性を有するイジング強磁性体にスイッチされたことを示している。さらに、この新現象に対する知見を深めるために SPring-8 で X 線磁気円二色性測定を行い、磁気輸送測定で得られた結果が V のスピン分極に起因していることを明らかにした。また、総和則を用いた解析から、V の全磁気モーメントに対する軌道磁気モーメントの寄与がほぼゼロであることを見出した。このことは、同ヘテロ構造で観測された面直磁気異方性の起源が  $V_5Se_8$  中でのスピン軌道相互作用以外に存在することを示唆している。

### ② $V_5Se_8/NbSe_2$ ヘテロ構造におけるフェロバレー強磁性 $NbSe_2$ の実現 (図 3b)

一方で、同ヘテロ構造において  $NbSe_2$  側が受ける電子状態の変調に注目した研究にも取り組んだ。具体的には、同ヘテロ構造において  $V_5Se_8$  の層数を単層極限まで薄くすることで  $NbSe_2$  の寄与を増大させた試料を作製し、異常ホール効果を評価した。その結果、そのような試料では  $V_5Se_8$  単体や  $V_5Se_8$  の層数が十分に厚いヘテロ構造試料では観測されない正の異常ホール効果が出現することがわかった。また、そのような正の異常ホール効果を示す試料に対して面内磁場を印加すると、異常ホール効果のシグナルが増強する様子が観測された。以上の結果を理解するために、仮想的な強磁性  $NbSe_2$  の異常ホール伝導率を計算したところ、実験結果とよく一致した。このことは、バルクでは超伝導体である  $NbSe_2$  が  $V_5Se_8$  との接触界面近傍ではフェロバレー強磁性という新しい量子状態を形成していることを示唆している。また、面内磁場に対して異常ホールシグナルが増強する理由について考察し、これが単層  $NbSe_2$  に特徴的なゼーマン型スピン軌道相互作用と強磁性状態のカップリングによって生じていることを明らかにした。

### 【研究成果の意義】

本研究成果の学術的意義としては、まず劈開が困難な物質や薄膜準安定相の超薄膜化に成功し、その 2 次元物性を解明した点が挙げられる。また、それらの物質を積層させたファンデルワールス超構造を作製し、単一物質では得られない特異な電子状態を実現した点にも大きな意義がある。一方、大局的な視点からは、2 次元物質の大面积試料を作製するためのプロセスを確立した点に大きな意義がある。今後はこの大面积性を生かして、従来は試料サイズの関係で制限されていた物性評価手法の飛躍的拡大と、それに伴う 2 次元物性の理解の深化・発展、さらには様々な機能性デバイスの作製を通じた応用研究の飛躍的発展などが期待される。

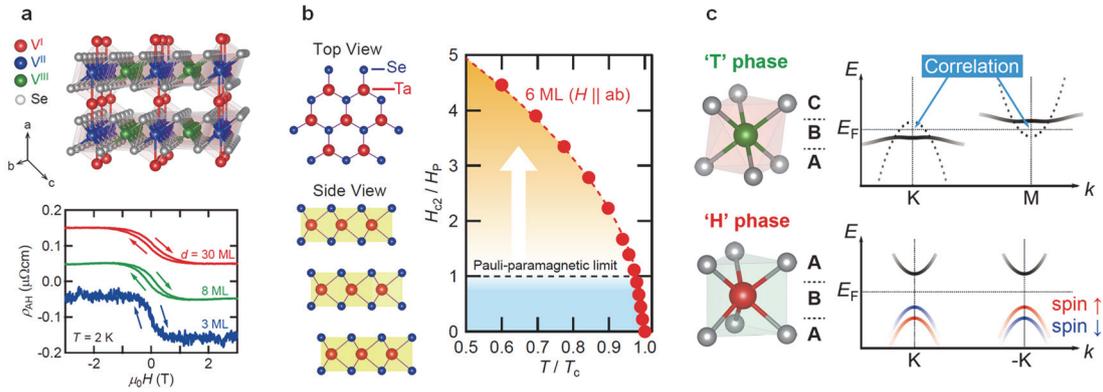


図 1: 強相関 2 次元物質における創発電子物性

- a, 遍歴反強磁性体  $V_5Se_8$  のエピタキシャル成長と創発強磁性の発見  
 b, 準安定相  $3R\text{-TaSe}_2$  のエピタキシャル成長とイジング超伝導状態の実現  
 c, 単層  $\text{CrSe}_2$  の構造多型制御と新奇電子状態の実現

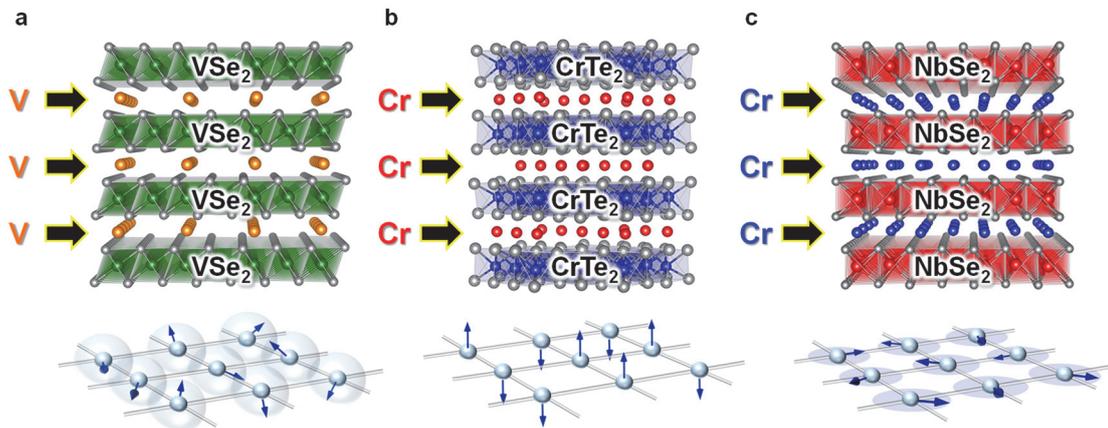


図 2: 様々な遍歴 2 次元強磁性体のエピタキシャル成長

- a, 遍歴反強磁性体  $V_5Se_8$  における 2 次元ハイゼンベルグ強磁性  
 b, 遍歴面直強磁性体  $Cr_3Te_4$  における 2 次元イジング強磁性  
 c, 遍歴面内強磁性体  $Cr_{1/3}NbSe_2$  における 2 次元 XY 強磁性

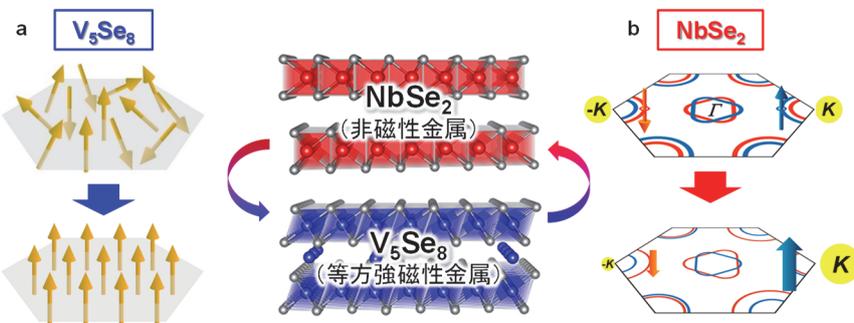


図 3: 強相関ファンデルワールス超構造における創発電子物性

- a,  $V_5Se_8/NbSe_2$  ヘテロ構造における特異な磁気近接効果の発見  
 b,  $V_5Se_8/NbSe_2$  ヘテロ構造におけるフェロバレー強磁性  $NbSe_2$  の実現

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 N. Yoshikawa, H. Sugauma, H. Matsuoka, Y. Tanaka, P. Hemme, M. Cazayous, Y. Gallais, M. Nakano, Y. Iwasa, R. Shimano	4. 巻 17
2. 論文標題 Ultrafast switching to an insulating-like metastable state by amplitudon excitation of a charge density wave	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nature Physics	6. 最初と最後の頁 909-914
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41567-021-01267-3	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 該当する
1. 著者名 T. Mizutani, S. Tanaka, T. Saze, K. Fujii, H. Matsuoka, M. Nakano, H. Wadati, M. Kitamura, K. Horiba, Y. Iwasa, H. Kumigashira, M. Yoshiki, M. Taguchi	4. 巻 103
2. 論文標題 Total reflection hard x-ray photoelectron spectroscopy: Applications to strongly correlated electron systems	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 205113
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.103.205113	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 中野匡規	4. 巻 90
2. 論文標題 MBEを利用した2次元物質研究の最前線	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 応用物理	6. 最初と最後の頁 419-423
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11470/oubutsu.90.7_419	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 Matsuoka Hideki, Barnes Stewart Edward, Ieda Jun'ichi, Maekawa Sadamichi, Bahramy Mohammad Saeed, Saika Bruno Kenichi, Takeda Yukiharu, Wadati Hiroki, Wang Yue, Yoshida Satoshi, Ishizaka Kyoko, Iwasa Yoshihiro, Nakano Masaki	4. 巻 21
2. 論文標題 Spin-Orbit-Induced Ising Ferromagnetism at a van der Waals Interface	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nano Letters	6. 最初と最後の頁 1807 ~ 1814
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.nanolett.0c04851	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 Masaki Nakano, Yue Wang, Satoshi Yoshida, Hideki Matsuoka, Yuki Majima, Keisuke Ikeda, Yasuyuki Hirata, Yukiharu Takeda, Hiroki Wadati, Yoshimitsu Kohama, Yuta Ohigashi, Masato Sakano, Kyoko Ishizaka, and Yoshihiro Iwasa	4. 巻 19
2. 論文標題 Intrinsic 2D ferromagnetism in V5Se8 epitaxial thin films	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nano Letters	6. 最初と最後の頁 8806-8810
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.nanolett.9b03614	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 Yuki Tanaka, Hideki Matsuoka, Masaki Nakano, Yue Wang, Sana Sasakura, Kaya Kobayashi, and Yoshihiro Iwasa	4. 巻 20
2. 論文標題 Superconducting 3R-Ta1+xSe2 with giant in-plane upper critical fields	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nano Letters	6. 最初と最後の頁 1725-1730
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.nanolett.9b04906	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 Hideki Matsuoka, Masaki Nakano, Takashi Shitaokoshi, Takumi Ouchi, Yue Wang, Yuta Kashiwabara, Satoshi Yoshida, Kyoko Ishizaka, Masashi Kawasaki, Yoshimitsu Kohama, Tsutomu Nojima, Yoshihiro Iwasa	4. 巻 2
2. 論文標題 Angle dependence of Hc2 with crossover between the orbital and paramagnetic limits	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 012064(R)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.2.012064	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69件(うち招待講演 19件/うち国際学会 23件)

1. 発表者名 中野匡規
2. 発表標題 ファンデルワールス超構造の創発電子物性
3. 学会等名 第38回無機・分析化学コロキウム(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中野匡規
2. 発表標題 二次元量子物質超構造の構築と機能開拓
3. 学会等名 第5回固体化学フォーラム研究会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masaki Nakano
2. 発表標題 Proximity-induced ferromagnetism in 2D NbSe <sub>2</sub>
3. 学会等名 2nd International Meeting on Thin Film Interfaces, Surfaces and Composite Crystals (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masaki Nakano
2. 発表標題 Interplay between spin-orbit coupling and magnetism at a magnetic van der Waals interface
3. 学会等名 13th CEMS Topical Meeting Online "Emergent 2D Quantum Material Systems" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中野匡規
2. 発表標題 二次元物質薄膜超構造のMBE成長と物性開拓
3. 学会等名 公社)日本表面真空学会 東日本合同セミナー「先端的試料作製技術—原子層物質—」(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masaki Nakano
2. 発表標題 Spin-orbit-mediated proximity coupling at a magnetic van der Waals interface
3. 学会等名 The March Meeting 2022 of the American Physical Society (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Masaki Nakano
2. 発表標題 Emergent properties of 2D magnets and their heterostructures explored by MBE
3. 学会等名 2D van der Waals Spin Systems, SPICE Online Workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中野匡規
2. 発表標題 MBEで切り拓くファンデルワールス界面の創発輸送現象
3. 学会等名 第59回 フラレン・ナノチューブ・グラフェン総合シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Masaki Nakano
2. 発表標題 Emergent Ising ferromagnetism at a magnetic van der Waals interface
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 2021年

1. 発表者名 中野匡規
2. 発表標題 二次元磁性体の軟X線磁気円二色性分光
3. 学会等名 Spring-8/SACLAユーザー共同体 (SPRUC) 機能磁性材料分光研究会、2020年度第1回研究会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中野匡規
2. 発表標題 二次元遷移金属カルコゲナイドの創発スピン物性
3. 学会等名 第68回化合物新磁性材料専門研究会、低次元カルコゲナイドの新機能・物性・デバイス研究 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masaki Nakano
2. 発表標題 Superconductivity and magnetism in group-V TMDC ultrathin films grown by MBE
3. 学会等名 PDI Topical Workshop on 2D Materials Grown by MBE (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masaki Nakano, Yoshihiro Iwasa
2. 発表標題 Emergent transport phenomena in MBE-grown 2D materials and their heterostructures
3. 学会等名 Compound Semiconductor Week 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masaki Nakano, Yoshihiro Iwasa
2. 発表標題 Emergent properties of MBE-grown 2D materials
3. 学会等名 CEMS Symposium on Emergent Quantum Materials (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masaki Nakano
2. 発表標題 Emergent transport properties of MBE-grown group-V TMDCs
3. 学会等名 The 3rd International Workshop on 2D Materials (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中野匡規
2. 発表標題 MBEで切り拓く2次元物質の創発物性
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 Masaki Nakano
2. 発表標題 Emergent transport phenomena in MBE-grown 2D materials
3. 学会等名 The Seventh RIKEN-NCTU Symposium on Physical and Chemical Sciences (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masaki Nakano, Yoshihiro Iwasa
2. 発表標題 Exploring emergent phenomena in 2D materials by MBE
3. 学会等名 11th Conference on Recent Progress in Graphene and 2D Materials Research (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masaki Nakano
2. 発表標題 Superconductivity and magnetism in MBE-grown TMDC ultrathin films and heterostructures
3. 学会等名 4th EU-Japan Flagship Workshop on Graphene and Related 2D Material (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中野匡規
2. 発表標題 遷移金属カルコゲナイド薄膜ヘテロ構造のMBE成長と物性開拓
3. 学会等名 薄膜第131委員会、マイクロビームアナリシス第141委員会、半導体界面制御技術第154 委員会 合同研究会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中野匡規
2. 発表標題 二次元物質のスピン物性開拓とスピントロニクスへの展開
3. 学会等名 科学研究費補助金 基盤研究(A)「ナノ超構造体を基盤とした革新的ナノスピカロリトロニクス機能の創出」、第15回チームミーティング (招待講演)
4. 発表年 2020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			
フランス	Paris University			
米国	University of Miami			