

2.5.6 低次元材料

(1) 研究開発領域の定義

低次元材料は、材料の空間的な構造に着目した際にその性質が通常バルク材料（3次元材料）と異なり、2辺（幅と長さ）もしくは1辺（長さ）だけで決まる材料であり、それぞれ二次元、一次元材料と呼ばれる。低次元材料の概念は20世紀から広くあったが、1991年のカーボンナノチューブ（一次元）また2004年のグラフェン（二次元）の発見により、具体的に存在する物質として実用を視野においた研究が開始された。グラフェンの発見に触発されるように、金属カルコゲナイド、カーバイドなどの多くの種類の二次元物質が発見されてきたが、それらの多くはバルクではみられない特徴的な電子状態を持ち、新しい物理構築だけでなく、エレクトロニクス、センシング、エネルギー変換・貯蔵などの応用に期待が持たれている。この項では、こうした、低次元化によって3次元バルク材料からは得ることのできない特異な性質を持つことになる材料に注目する。特に最近の進展が著しい二次元材料を中心に記載する。

(2) キーワード

グラフェン、遷移金属ダイカルコゲナイド（TMD）、金属モノカルコゲナイド、h-BN、ポロフェン、シリセン、六方晶窒化ホウ素、原子層、二次元ナノシート、ヘテロ超格子、Van der Waals heterostructures、層状物質、単層剥離、ビルディングブロック、レイヤーバイレイヤー積層、階層構造制御、モアレ構造、ツイスト積層界面、トポロジー、バレートロンクス、スピントロンクス、ツイストロンクス、エッジトロンクス、二次元超伝導、二次元磁性、相対論的Dirac電子、Weyl電子

(3) 研究開発領域の概要

[本領域の意義]

低次元材料の研究開発を行う意義は、大きく分けて2つある。1つは、「原子～分子レベルでの薄さ、細さ」という構造的特徴を持った物質が示す特異な物性やその応用の探求である。グラフェン、カルコゲン化合物（カルコゲナイド）シートなどにみられる、特徴的な電子状態（層数に依存した電子バンド構造の変調、Dirac電子系の出現、非常に高い易動度など）とそれをういたエレクトロニクスデバイス、遷移金属酸化物や水酸化物ナノシートの優れたエネルギー貯蔵、変換機能（電極活物質、電極触媒）とそれを利用したエネルギーデバイス、低次元物質特有の光学特性や磁気・スピン特性などを利用した、オプトエレクトロニクスやスピントロクスデバイスなどが、その例である。現在に至っても、組成、構造を精密に制御した新規二次元材料の合成が行われていることを考えると、さらなる掘り下げにより新しい発見、成果に期待が持てる。

もう1つは、複数の二次元物質をビルディングブロックとした新たな材料の創生や、二次元物質の積層界面を作ることによって生じる新たな機能の探求である。前者には二次元ナノシートを1枚1枚操作して基板表面の望みの場所に配置した例や、基板上に隙間や重なりがほとんどない形（稠密配列）で単層膜として堆積させ、これをレイヤーバイレイヤーで反復して多層ナノ構造や超格子構造を構築することを可能とした例がある。また、後者では、結晶格子の大きさや対称性の異なる異種の二次元物質を積層して母相にはないトポジカルな性質を発現させた例や、同種の二次元物質を捻って積層することで母物質では現れない物性を発現させた例などがある。二次元結晶の組み合わせは実質無限に存在し、適切な組み合わせを選ぶことで有用な機能性を出すことが可能であると同時に、界面の超構造等に注目することで、元々の低次元物質からは想像もしなかったような物性が発現することが分かってきている。

このように大きなポテンシャルを秘めた低次元物質の研究領域は、今後も固体物理学における1つの中心的な物質系であることは疑いようがない。

[研究開発の動向]

新規二次元材料の創製研究については、多くの物質系で精力的な研究が約20年にわたって展開されてきており、それらにおいては組成や構造をチューニングすることによる機能制御、サイズ、形状の精密制御による品質向上に研究に力点がシフトしてきている。一方で新規二次元系物質の探索もいまださかんであり、フォスフォレン（黒リンの単層）、炭窒化物（MXenes）や二次元金属錯体ナノシート（Coordination nanosheet：CONASH）の発見のように様々な成果があがっている。

半導体であるフォスフォレンや、化学組成、結晶構造に応じて金属から半導体まで幅広い物性を示す遷移金属ダイカルコゲナイドは、どちらも剥片化により、バンドギャップの拡大、間接遷移型から直遷移型半導体への変化という特徴が一般的にみられ、on/off比に優れたトランジスタや発光素子等、様々なデバイス応用が追究されている。トランジスタ応用としては、2011年にKisらが最初に単層MoS₂をチャンネル層に用いた電界効果型トランジスタ（Field Effect Transistor：FET）について報告した後、WSe₂、InSe等、種々の遷移金属カルコゲナイドについての半導体応用が進み、優れた半導体性が見出されるとともに、光センサ等、関連応用技術の開発についても研究が進んでいる。また、FeSeを単層化すると、バルクでは8 Kの超伝導転移温度（ T_c ）が100 Kに達する可能性があることが報告され、高 T_c 発現メカニズムの解明、 T_c 制御への研究が継続されている。一方化学分野では、金属伝導性を示すMoS₂（1T相）やNbS₂が、優れた電気化学触媒活性を示すことが見出され、貴金属フリーH₂O分解触媒（H₂生成）の実現に向けた研究が活発に行われている。

剥離した二次元結晶を再び積層させることで実現される、van der Waals結晶界面の研究も飛躍的に進展してきた。このvan der Waals結晶界面の研究には、主に3つの方向性があげられる。第1に、表面が原子レベルで平坦であることを利用して、良質な基板材料として用いる利用方法がある。例えば、グラフェン等の二次元物質をh-BNで挟んだ界面では、従来の酸化物基板への剥離では得ることが難しかった、試料劣化に対して強く、原子レベルで平坦な二次元界面を実現でき、飛躍的に移動度等を向上させることで、容易に量子輸送現象へアプローチすることが可能となった。このような、h-BNを試料劣化防止のためのキャップや原子平坦性を実現するための基板として用いる方法は、現在では二次元物質研究のスタンダードとなっており、NIMSの谷口、渡邊らによる超高压合成法によって得られた高品質h-BNは世界中の研究グループが使用するところとなっている。また、第2の方向性として、さまざまなvan der Waals結晶を組み合わせることでヘテロ界面を作製し、特徴的な機能性を創出するという取り組みも積極的に行われている。当初、このvan der Waals結晶ヘテロ界面の研究は、界面を構成する各々の二次元物質の特徴を上手く生かした機能性の開拓が積極的に行われてきた。例えば、p型およびn型の半導体二次元結晶を組み合わせることで、特徴的な発光・光電流特性が実現したり、電子・ホールが層間に分離された層間励起子と呼ばれる、安定かつユニークな二次元励起子物性が発見されることが知られている。また、絶縁体超薄膜を挟んでトンネル接合機能を持たせるといった例が挙げられる。さらに最近では、第3の方向性として、前述したような界面を構成する物質の性質の組み合わせによる物性開拓だけでなく、モアレ構造等の界面の長周期構造や対称性を詳細に反映した物性も発見されてきている。この第3の潮流は、van der Waals積層構造研究のパラダイムシフトともとらえられ、後述するように、h-BN/グラフェンの研究を発端として、ツイスト積層させたグラフェンやTMD、グラフェンと黒リン界面等、現在世界中で極めて多彩な研究が進捗中であり、単層の結晶からは

想像もできないような物性が続々と実現されてきている。

以上であげた、個々の二次元物質やvan der Waals界面の物性研究において、特に最近、顕著にみられる傾向は、固体物理学の他分野（ナノ物質研究以外の分野）で提唱されたり、発展したりしてきた概念・コンセプトを積極的に輸入し、融合させていく研究の方向性である。遷移金属ダイカルコゲナイドにおけるバレー物性の理解の進展や最近の磁性van der Waals結晶の発見に伴う、電気磁気物性やスピントロニクス機能の探索、ツイスト二層グラフェンにおける強相関絶縁体層や超伝導相と高温超伝導との類似性の指摘、 WTe_2 やツイスト二層グラフェン磁性相でみられるようなトポロジカル物性、ツイスト界面における準結晶的構造等が良い例である。

酸化物、水酸化物、炭窒化物等のナノシートはグラフェン、カルコゲナイドシートでは現れない物性（誘電性、強誘電性、光触媒性、酸化・還元反応性など）を示すことから、その活用をめざした研究展開が進められている。特に遷移金属酸化物および水酸化物ナノシートの多くは優れたレドックス性を示すことから電極活物質や触媒として期待される。事実これらナノシートの母相となる層状化合物では $LiCoO_2$ に代表されるように正極活物質として実用化されているものも少なくないことは周知の事実である。これらの材料では陽イオン（Liイオンなど）が層間を長距離拡散してレドックスサイトに行きつく必要があるのに対して、これを剥離して得られるナノシートではすべてが表面と表現できるユニークな構造を有しているため、レドックスサイトが大きく露出していることに加えて、イオンの拡散距離も短く済むため、高い電池性能を実現できることが報告されている。このようにこれら遷移金属層状化合物およびそのナノシートは電極活物質として有望な性能を発揮するものの、骨格となる酸化物、水酸化物の大半は絶縁性であるため、特に充放電レート特性などにおいて改善すべき余地も多い。そこで遷移金属酸化物または水酸化物ナノシートを酸化グラフェン（graphene oxide : GO）または還元型酸化グラフェン（reduced GO : rGO）と交互に積み重ねた超格子複合体を合成することにより、優れた電極性能が実現された。さらにこれらの超格子複合体は水分解反応における酸素および水素発生活性においても、貴金属電極触媒と匹敵する極めて高い性能を示すことから注目を集めている。

(4) 注目動向

[新展開・技術トピックス]

- ・グラフェンでは回転角という新しいパラメータが見出され、モアレ超格子が物性発現の新しい設計指針となっている。その中のハイライトがグラフェンモアレ超格子による超伝導発現である。カルコゲン化物シートでも $MoSe_2/WS_2$ ヘテロ構造において構成結晶の面内方位のずれに依存し、バンド構造が変調される現象が観察されており、今後、van der Waalsヘテロ構造体において面内結晶方向の整合性を新たな構造設計指針とした物性制御、機能発現について研究が進むと予想される。
- ・カルコゲン化物ナノシートでは上述した負性抵抗、トンネル素子、多値論理演算素子などの研究発表が相次いでいる。さらにはカルコゲン化物シートが様々な電子バンド構造を有することに着目して、異種シートをヘテロ接合することにより光励起キャリアの移動を制御し、p-nダイオードや発光素子などの開発が報告されている。いずれも高品質なヘテロ界面だからこそその成果といえる。
- ・新材料に関しては、絶縁体である $CrGeTe_3$ および CrI_3 が単層にしても磁気秩序を持つことが明らかにされ、二次元物質を用いた磁性の研究やスピントロニクス機能の開拓への道が開けた。特に、 CrI_3 は層数によって磁性が変化するという特徴を持ち、二層 CrI_3 では特徴的対称性と磁気構造による電気磁気効果およびそれを用いた電場による磁性制御や巨大な磁気トンネル効果といった、これまで特殊な三次元磁性体や磁性薄膜試料で研究されてきたエキゾチックな現象が超巨大応答として報告されている。また、静電的な応答

だけでなく、キャリアをドーピングしてトランジスタ動作させると同時に磁性を制御できるといった報告もなされてきており、強磁性トランジスタといった新しい応用へのポテンシャルも見出されている。他の二次元物質とのヘテロ界面の研究もさかんで、二次元磁性体と遷移金属ダイカルコゲナイドのヘテロ界面はスピンとバレーが結合したユニークな系として認知されるようになってきている。

- ・ 金属的性質を持つ二次元磁性体 Fe_3GeTe_2 や VSe_2 、量子異常ホール効果を示す二次元磁性トポロジカル絶縁体 MnBi_2Te_4 等、新規二次元強磁性体が次々と見つかってきている。二次元反強磁性体の研究も進んでおり、元々劈開可能性等が検証されていた MPX_3 ($\text{M}=\text{Cr, Mn, Fe, Ni, X}=\text{S, Se}$) において磁性の層数依存が報告されたり、遷移金属ダイカルコゲナイド界面での光特性も報告されてきている。
- ・ トポロジカル物性を持つ二次元物質の物性研究にも顕著な進展が見られる。 WTe_2 は二次元トポロジカル絶縁体 (量子スピンホール絶縁体) であることが示されていたが、電界効果によって超伝導が発現することが発見され、トポロジカル超伝導との関連性や二次元超伝導の性質が調べられるようになってきた。また、数層 WTe_2 は、波動関数のトポロジーや幾何学に起因した特徴的バンド構造を持っていることが知られているが、それを反映した新規輸送現象、特に異常光電流効果や非線形ホール効果といった、非線形輸送現象の発見も相次いでいる。
- ・ その他のヘテロ接合体として、グラフェンと h-BN 等、2種の原子層を面内で接合した面内ヘテロ構造についても研究が行われており、この場合でも一次元界面を介した p/n 接合等が実現している。
- ・ 酸化・還元特性に優れた遷移金属酸化物または水酸化物ナノシートを高伝導性のグラフェンと交互に積み重ねた超格子複合体は、これまでで最高レベルの性能を発揮する電極材料、触媒として働くことが最近明らかにされた。例えば MnO_2 ナノシート/ rGO 超格子複合体はこれまでで最高レベルの容量、優れた出力特性、サイクル安定性を示すことが報告されている。また電極触媒能に関しては NiFe 水酸化物/ rGO 超格子複合体が非常に小さな過電圧で酸素発生反応が進行することなどが報告されている。これらの特性は貴金属電極のそれに匹敵あるいは上回るものであることから、さらなる性能向上に向けてナノシートの組成チューニング、グラフェンとの複合ナノ構造のデザインなどに関する多数の研究が進められている。
- ・ 酸化物をはじめとした多くの二次元材料が水溶液中に単分散したコロイドであり、その極めて大きなアスペクト比に由来して、顕著な液晶性を示すことを利用したさまざまな展開が最近さかんになってきている。これらの系では、電解質濃度を制御することによりナノシートの間隔を数十~数百 nm のメソスケールレンジに制御することが可能である。特に酸化チタンナノシートが強磁場印加により数センチメートルサイズの容器内で一方向に配列し、鮮やかな構造色を呈するといった興味深い結果が示されている。さらにこの液晶全体をヒドロゲルやシリカゲルに変換すると、これまでのゲルでは実現できなかった異方的な特性やトップレベルの機械的強度を実現できるといった興味深い結果が得られており、本トピックスにおいては今後大きな飛躍が予感される。
- ・ 種々の金属と有機配位子を液液もしくは気液界面で合成することにより、 CONASH (二次元金属錯体ナノシート) が二次元材料の新顔として報告された。金属イオンと配位子との組み合わせが多様であるためより広範なデザインが可能であり、大きな発展が期待できる。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

EU、米国、韓国、シンガポール、中国等、世界各国では基礎科学から応用研究、産業実用化までをめざす大型プロジェクトや産業界での実用化に向けた展開が行われている。特に、グラフェンの2010年度ノーベル物理学賞受賞を契機として欧州に設立された研究イニシアチブ: Graphene Flagshipは10億ユーロの巨

額な競争的資金を10年計画で研究開発投資中であり、欧州の当該分野の科学技術水準の向上と産業応用の加速化を推進する原動力として機能している。

EUから独立した英国は、Graphene Flagship 中興の祖として継続して研究投資対象国であるが、英国独自の大規模かつ多面的な研究振興施策を講じている。National Graphene Research Center in Univ. Manchester (Director: Prof. V. Falco、2015年設立、6100万ポンド)、EPSRC (英国工学物理科学研究評議会)によるvan der Waalsヘテロ二次元材料やフレキシブル光電子材料開拓など(総額3700万ポンド)をはじめとする総額1.4億ポンド規模の研究投資を行っている。

以下各国の研究開発プロジェクトの概要を述べる。

ドイツでは、基礎から応用にいたる二次元材料とそのデバイス応用研究をMax Planck Institute、大学、Fraunhofer Institute、が相互に役割分担し切れ目のない強固な研究開発体制を構築している。特に、Graphene FlagshipとパートナーのRWTH (アーヘン工科大学)とAMO GmbH (産学連携オープンイノベーションを促進する非営利団体)とが共同で、Aachen Graphene & 2D-Materials Centerを2017年に設立し、CVDによるウェアスケールでのグラフェンおよび遷移金属カルコゲナイド等の二次元材料による大規模集積デバイス・回路・システムの先端研究を国家的に推進している。Graphene Flagship Work Package 6: Sensor (主幹: デルフト工科大学、オランダ)、7: Electronic Devices (主幹: AMO GmbH)、10: Wafer Scale Integration (主幹: CNIT、イタリア)の3本のプロジェクト、European CommissionのFlagship-Era (FETデバイスシステムの先端研究推進プロジェクト)によるTUGRACO - Towards Ubiquitous Graphene based RF Communicationsプログラムを中心として2014~2020年の7年間で100億円規模の研究投資を行っている。

中国では、泰州巨納新能源有限公司が中国初のグラフェン国家基準「ナノテク 専門用語 第13部分: グラフェン及び関連二次元材料」(GB/T 30544.13-2018)を2018年に制定し、グラフェン、CNT、および関連二次元材料の基礎から産業応用にいたる全領域を対象として35億円/年規模の研究投資を行っている。韓国では、韓国政府主導のKorean Graphene Hubが2013~2018年の6年間で約200億円の研究投資を行っている。また、わが国のNEDOに相当するとみられる半官半民のGraphene Materials and Components Commercialization Projectが産業応用に重点を置いて2013~2018年の6年間で230億円規模の研究投資を行っている。シンガポールにおいても二次元材料の研究開発に80億円規模の研究投資を行っていると思われる。

日本におけるグラフェンや原子膜の政府主体のプロジェクトは、2011年NEDOの「希少金属代替材料開発」が最初であり、その後、2012年、NEDO「革新的ナノカーボン材料先導研究開発」、NEDO「低炭素社会を実現する革新的カーボンナノチューブ複合材料開発プロジェクト/グラフェン基盤研究開発」(2012~2014年度)、2013年文部科学省科学研究費新学術領域「原子層科学」(2013~2017年度、10億円規模)、2014年NEDO「低炭素社会を実現するナノ炭素材料実用化プロジェクト」(2014~2016年度、120億円規模)、JSTのCRESTプロジェクトとして、「二次元機能性原子・分子薄膜の創製と利用に資する基盤技術の創出」(2014~2021年度、50億円規模)が推進されてきており、2013年以降、組織的で大きな取り組みが展開されてきた。また低次元材料のトポロジカルな性質をさらに発展させるべくJST-CREST「トポロジカル材料科学に基づく革新的機能を有する材料・デバイスの創出」領域(2018~2028年度、50億円、研究総括: 上田正仁(東大教授))が新設されたことは、組織的な大型研究推進プログラムの継続推進の観点で望ましいといえる。

産業界では、世界的なグラフェン研究の展開のなかで、その応用と産業化での関心が高まり、2010年、化学技術戦略推進機構(現新化学技術推進協会)で企業の情報交換の場としてのグラフェン研究会が設けられた。その後、2011年には技術研究組合単層CNT融合新材料研究開発機構(TASC)グラフェン事業部が企業5社と産業技術総合研究所により設立された。現在、電気、化学関連企業を中心に研究開発が行われ

ている。また、産総研グラフェンコンソーシアムが2013年に立ち上げられ、企業、行政、大学・研究機関の情報交換、連携の場として機能を果たしている。

(5) 科学技術的課題

Van der Waals系層状二次元物質に関する技術的な課題は、大面積で高品質の薄膜成長技術を確立することである。いつまでもスコッチテープで切り貼りしては、そう遠くない将来にこの分野は行き詰まると思われる。これまでの研究はテープにより層状結晶を劈開させ、多数の劈開片の中から単層部分を探し出し、これにマイクロ電極を取り付けて物性測定を行うという形で行われてきており、その中で驚異的といえる物性値が発見されている。これらはある意味、理想的な場合の最高値を示すものであるが、歩留まり、サイズなどからデバイス開発に向けては大きな谷間が存在すると言わざるをえない。その解決をめざして、化学気相蒸着法(CVD)を中心として大面積で高品質の薄膜成長の精力的な検討が行われてきている。その結果、ミリスケールの単層単結晶や、均一膜の作製が達成されている。しかしながら最高物性値を達成するための膜質という面では多くの問題が未解決であり、スコッチテープ法により得られる二次元物質とのギャップは10年以上埋まっていない。

二次元物質界面の作製にも未だ課題が多い。マジック角度ツイスト二層グラフェンや遷移金属ダイカルコゲナイドツイスト界面を作製するためには、0.1度以上の精度での積層角度制御が必要である上に、転写作業後に試料の角度がずれてしまう可能性がある。そのため、作製した界面の質は研究グループや作業者によってかなりばらつきがあるのが現状である。このようなエキゾチックな物性まで探索が可能な、良質な界面を容易にかつ高確率で作製できる技術革新が求められる。

また、二次元物質の中には不安定な物質も多々存在し、試料の劣化は大きな問題である。例えば、遷移金属ダイカルコゲナイドに次ぐ二次元半導体材料として注目を集めている黒リンや二次元磁性体 CrI_3 、 Fe_3GeTe_2 等は大気中で不安定であり、グローブボックス中での劈開・転写作業が必須であり、かつ、h-BN等でキャップすることにより表面や界面を保護する必要がある。このような作業を簡略化するプロセスの開発や新しいデバイス作製手法の開拓が望まれる。

酸化物、炭化物などの二次元ナノシートについても、サイズ、形状を制御した合成が重要な課題である。層状物質の劈開、剥離により得られるナノシートは一辺の長さが1 μm 前後で無秩序な外形を有するものが多い。このサイズを大きくすることができれば、これをビルディングブロックとした材料の構造秩序性が高まり、機能性も向上することが期待でき、理想的には同じ形状、同じサイズのシートが合成できれば、基板上に自己組織化的にタイルを並べるような形で秩序配列させることも可能と予想され、ナノシートの機能をより効果的に取り出すことにつながると期待される。さらにナノメートル領域でのナノシートの配列にとどまらず、上記のメソスケールの配列制御技術が発達すれば、材料科学的な幅が大きく拡大すると期待できる。現在までのところ、層状物質の剥離ナノシート化プロセスの学術的理解は十分とはいえず、サイズ、形状を制御したナノシート合成のためには詳細な基礎研究が今後求められる。

(6) その他の課題

日本のグラフェン・二次元機能性原子膜の研究開発については、研究への関心、予算規模、また、産業界の活動等、世界の先端からは大きく水をあけられている。文部科学省科学研究費新学術領域「原子層科学」(2013～2017年度)では、基礎研究において一定の成果を生み出したが、2017年度には終了しており、JSPS関連でのグラフェン・二次元機能性原子膜への新たなプロジェクトの計画もない。世界各国では、例え

ば、EUのGraphene Flagship等、基礎研究から応用研究、実用化研究への技術移転の流れが加速しており、大学・研究機関と産業界の連携が密接となってきた。一方、日本では従来から裾野の広い物質科学の研究が行われており、グラフェンと関連物質の研究開発には大きなポテンシャルを有するとともに新たな研究成果も多く生まれており、国際的にも学術的優位性を維持している。にもかかわらず、大学・研究機関と産業界の連携は十分には行われていない。日本の基礎科学での強みを生かして、研究の組織的な展開を促すとともに、産業界との強い連携をより一層推進する取り組みが求められる。

新材料創製、デバイス学理創造には、基礎物理、基礎化学に立ち帰った基礎基盤研究の推進が欠かせない。二次元機能性原子薄膜材料を科学技術イノベーションとして将来の新産業創出に結実させ、わが国がこれを主導するためには、デバイスからシステム応用までを俯瞰した目的志向型の材料・プロセス技術の革新が求められる。これらを相補的に推進するためには、省庁の垣根を越えた柔軟な産学官連携研究の推進体制・制度の構築が不可欠である。

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> ・酸化物および水酸化物ナノシート、二次元金属配位高分子は日本発の二次元ナノシートであり、先行的位置を確保している。 ・高品質h-BNはグラフェンやカルコゲン化物の物性研究にとって必要不可欠な素材であり、世界標準になっている。ただ物性研究自体では米国、英国、シンガポールに先行を許している状況にある。 ・二次元超伝導体の研究や非線形伝導等の物性開拓、単層SnSや高品質h-BNの合成等、ユニークな業績を出している。ロボット制御による転写・界面作製といったオリジナリティーのある技術の構築・デモンストレーションも報告された。
	応用研究・開発	○	↘	<ul style="list-style-type: none"> ・企業などは、二次元物質を本格的に応用研究に着手する、緊急性の高い課題を見出していないことと、経済状態から大きな投資をすることはできない。 ・カルコゲン化物ナノシートの応用研究では研究者人口が圧倒的に少ない。
米国	基礎研究	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ・二次元磁性体の発見やその機能開拓、ツイスト積層界面における物性探索に至るまで二次元物質研究を主導しており、トレンドの発信地として確固たる存在感を示している。 ・莫大な研究予算と、アジア諸国からの留学生などの人材によって、依然として高い基礎研究の成果を出している。 ・最近のハイライトであるツイスト積層2層グラフェンにおける超伝導の発見(マジック角)研究に関してはMIT、Caltechなどが中心。 ・MXenesはDrexel大がパイオニアであり、先導している。
	応用研究・開発	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ・応用研究でも研究の活発な展開が行われており、優れた研究成果を生み出している。 ・TMDをチャネル材料とするFETデバイス応用研究が加速しており、ポストSi-CMOSテクノロジーとしての議論が活発化している。デバイス応用研究の動向は、エナジーハーベスターへの重点化が目立つ。 ・カルコゲン化物ナノシートを使った応用研究では多くの先進的成果をあげている。

2.5

俯瞰区分と研究開発領域
物質と機能の設計・制御

欧州	基礎研究	◎	→	<p>【EU】</p> <ul style="list-style-type: none"> グラフェンが発見された欧州では、依然として二次元物質の研究がさかんである。二次元磁性体を用いた機能性開拓等で、米国と同様に、二次元物質研究の潮流を作っており、高いプレゼンスを見せると同時に、励起子の電場による駆動・制御といったユニークな研究成果も報告している。巨額の予算を持つ Graphene Flagship が継続中であり、基礎研究に大きな投資が行われている。 <p>【ドイツ】</p> <ul style="list-style-type: none"> Max Planck Institute、大学、Fraunhofer Institute、が相互に役割分担し切れ目のない強固な研究開発体制を構築している。 <p>【フランス】</p> <ul style="list-style-type: none"> スピントロニクス・製膜に特色ある強みを持っている。 <p>【英国】</p> <ul style="list-style-type: none"> 独自の研究所をマンチェスター大学に設置して、研究を進めている。 <p>【スイス】</p> <ul style="list-style-type: none"> 光電子物性、スピントロニクスの分野が強い。
	応用研究・開発	◎	↗	<p>【EU】</p> <ul style="list-style-type: none"> 2013年にEUでの大型プロジェクト Graphene Flagship (2013～2022、総額10億ユーロ) がスタートし、多くの大学、研究機関の参加のもと応用に向けた様々な分野での研究が展開されており、独自の研究開発でリーダーシップをとりつつある。 <p>【ドイツ】</p> <ul style="list-style-type: none"> Graphene Flagship とパートナーの RWTH (アーヘン工科大学) と AMO GmbH (産学連携オープンイノベーションを促進する非営利団体) とが共同で、Aachen Graphene & 2D-Materials Center を2017年に設立し、CVDによるウェハスケールでのグラフェンおよびTMD等の二次元材料による大規模集積デバイス・回路・システムの先端研究を国家的に推進している。 <p>【英国】</p> <ul style="list-style-type: none"> National Graphene Research Center in Univ. Manchester (Director: Prof. V. Falco、2015年設立、6100万ポンド)、EPSRC (英国工学物理科学研究評議会) による van der Waals ヘテロ二次元材料やフレキシブル光電子材料開拓など総額3700万ポンドをはじめとする総額200億円規模の研究投資を行っている。
中国	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> 応用研究に比較すると基礎研究力は低いが、基礎研究への取り組みも急速に拡大してきており、固体物性実験・理論、材料科学領域でも大きな存在感のある展開をしている。 かつては、国として基礎研究に興味がなく、実用的な研究には多くの予算が与えられるが、予算を与えられない研究者が、お金のかからない基礎研究をするというような様子を感じられた。近年では、米国で有名な成果をあげた研究者が中国の大学で研究室を持ち、基礎研究を主導しているように見受けられる。
	応用研究・開発	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> グラフェンの産業化を活発に進めており、特許登録数も世界でトップとなっている。 グラフェンの電池応用、カルコゲン化物ナノシート積層界面を使った素子開発が活発。有望だと狙いを定めたら一斉に集中して類似テーマに取り組む勢いは大きい。 カルコゲン化物ナノシート積層界面を使った素子開発が活発。

韓国	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> 各大学、研究機関で材料科学、物理等のグラフェン研究がさかんに進められていて、二次元強磁性体・反強磁性体の研究や準結晶的構造を持つ30度ツイスト積層2層グラフェンの報告等、独自の研究成果を創出している。 基礎研究が歴史的に重要視されてこなかったが、メディアなどで批判を受け、基礎科学を積極的に推進するための、IBS (Institute of Basic Science) を設立。他の分野同様グラフェンに関する基礎研究の中核を支えている。
	応用研究・開発	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> CVD製膜技術が強く、それを活かしたタッチパネル、透明電極関連研究が多い。 Global Frontier Program : Soft electronics (2011～2020、総額81億円) のプロジェクトが行われ、約30の研究グループが参加し、新しいプロセス、デバイス等、フレキシブルエレクトロニクスをめざした研究が展開されている。2012年のSamsungとSung Kyunkwan大の共同による30インチのグラフェンシートのRoll-to-roll製膜はディスプレイ応用に特化した先導的成果として有名である。
シンガポール	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> グラフェン研究の世界三大センターの1つが存在する。現在はグラフェンからそれ以外 (beyond graphene : カルコゲン化合物ほか) にシフトしている。 有望な研究者が集まってきており、非線形輸送や新しい二次元バレー物質の理論予測と実証、二次元強磁性体のトランジスタ動作と磁性制御等、いくつかの注目すべき成果をあげている。
	応用研究・開発	△	→	特記事項なし

(註1) フェーズ

基礎研究：大学・国研などでの基礎研究の範囲

応用研究・開発：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

(註2) 現状 ※日本の現状を基準にした評価ではなく、CRDS の調査・見解による評価

◎：特に顕著な活動・成果が見えている

○：顕著な活動・成果が見えている

△：顕著な活動・成果が見えていない

×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) トレンド ※ここ1～2年の研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

関連する他の研究開発領域

・トポロジカル材料 (ナノテク・材料分野 2.5.5)

参考・引用文献

- 1) L. Li et al., "Black phosphorus field-effect transistors", *Nature Nanotech.* 9 (2014) : 372-377. doi : 10.1038/nnano.2014.35
- 2) M. Naguib et al., "Two - Dimensional Materials : 25th Anniversary Article : MXenes : A New Family of Two - Dimensional Materials", *Adv. Mater.* 26, no. 7 (2014) : 982-982. doi : 10.1002/adma.201470041
- 3) H. Maeda, R. Sakamoto and H. Nishihara, "Coordination Programming of Two-Dimensional Metal Complex Frameworks", *Langmuir* 32, no. 11 (2016) : 2527-2532. doi : 10.1021/acs.langmuir.6b00156

2.5

俯瞰区分と研究開発領域
物質と機能の設計・制御

- 4) B. Radisavljevic et al., “Single-layer MoS₂ transistors”, *Nature Nanotech.* 6 (2011) : 147-150. doi : 10.1038/nnano.2010.279
- 5) J.-F. Ge et al., “Superconductivity above 100 K in single-layer FeSe films on doped SrTiO₃”, *Nature Mater.* 14 (2015) : 285–289. doi : 10.1038/nmat4153
- 6) M. A. Lukowski et al., “Enhanced Hydrogen Evolution Catalysis from Chemically Exfoliated Metallic MoS₂ Nanosheets”, *J. Am. Chem. Soc.* 135, no. 28 (2013) : 10274-10277. doi : 10.1021/ja404523s
- 7) Y. Cao et al., “Unconventional superconductivity in magic-angle graphene superlattices”, *Nature* 556, no. 7699 (2018) : 43-50. doi : 10.1038/nature26160
- 8) K. L. Seyler et al., “Signatures of moiré-trapped valley excitons in MoSe₂/WSe₂ heterobilayers”, *Nature* 567 (2019) : 66-70. doi : 10.1038/s41586-019-0957-1
- 9) J. C. W. Song and N. M. Gobor, “Electron quantum metamaterials in van der Waals heterostructures”, *Nature Nanotech.* 13 (2018) : 986–993. doi : 10.1038/s41565-018-0294-9
- 10) Nitin Samarth, “Magnetism in flatland”, *Nature* 546 (2017) : 216-217. doi : 10.1038/546216a
- 11) Cheng Gong et al., “Discovery of intrinsic ferromagnetism in two-dimensional van der Waals crystals”, *Nature* 546 (2017) : 265-269. doi : 10.1038/nature22060
- 12) S. Jiang, J. Shan and K. F. Mak, “Electric-field switching of two-dimensional van der Waals magnets”, *Nature Mater.* 17 (2018) : 406-410. doi : 10.1038/s41563-018-0040-6
- 13) Bevin Huang et al., “Electrical control of 2D magnetism in bilayer CrI₃”, *Nature Nanotech.* 13 (2018) : 544–548. doi : 10.1038/s41565-018-0121-3
- 14) Tiancheng Song et al., “Giant tunneling magnetoresistance in spin-filter van der Waals heterostructures”, *Science* 360, no. 6394 (2018) : 1214-1218. doi : 10.1126/science.aar4851
- 15) Ding Zhong et al., “Layer-resolved magnetic proximity effect in van der Waals heterostructures”, *Nature Nanotech.* 15 (2020) : 187–191. doi : 10.1038/s41565-019-0629-1
- 16) Zaiyao Fei et al., “Two-dimensional itinerant ferromagnetism in atomically thin Fe₃GeTe₂”, *Nature Mater.* 17 (2018) : 778–782. doi : 10.1038/s41563-018-0149-7
- 17) M. Bonilla et al., “Strong room-temperature ferromagnetism in VSe₂ monolayers on van der Waals substrates” *Nature Nanotech.* 13 (2018) : 289–293. doi : 10.1038/s41565-018-0063-9
- 18) Y. Deng et al. “Quantum anomalous Hall effect in intrinsic magnetic topological insulator MnBi₂Te₄”, *Science* 367 (2020) : 895-900. doi : 10.1126/science.aax8156
- 19) Zaiyao Fei et al., “Ferroelectric switching of a two-dimensional metal”, *Nature* 560 (2018) : 336-339. doi : 10.1038/s41586-018-0336-3
- 20) M. P. Levendorf et al., “Graphene and boron nitride lateral heterostructures for atomically thin circuitry”, *Nature* 488 (2012) : 627-632. doi : 10.1038/nature11408
- 21) P. Xiong et al., “Genuine Unilamellar Metal Oxide Nanosheets Confined in a Superlattice like Structure for Superior Energy Storage”, *ACS Nano* 12, NO. 2 (2018) : 1768-1777. doi : 10.1021/acsnano.7b08522

- 22) W. Ma et al., “A Superlattice of Alternately Stacked Ni–Fe Hydroxide Nanosheets and Graphene for Efficient Splitting of Water”, *ACS Nano* 9, NO. 2 (2015) : 1977-1984. doi : 10.1021/nn5069836
- 23) M. Liu et al., “An anisotropic hydrogel with electrostatic repulsion between cofacially aligned nanosheets”, *Nature* 517 (2015) : 68-72. doi : 10.1038/nature14060
- 24) K. Sano et al., “Photonic water dynamically responsive to external stimuli”, *Nature Commun.* 7 (2016) : 12559. doi : 10.1038/ncomms12559
- 25) Y. S. Kim et al., “Thermoresponsive actuation enabled by permittivity switching in an electrostatically anisotropic hydrogel” *Nature Mater.* 14 (2015) : 1002–1007. doi : 10.1038/nmat4363
- 26) K. Sano et al., “Extra - Large Mechanical Anisotropy of a Hydrogel with Maximized Electrostatic Repulsion between Cofacially Aligned 2D Electrolytes”, *Angew. Chem.* 57, no. 38 (2018) : 12508-12513. doi : 10.1002/anie.201807240