

領域略称名：原子層

領域番号：2506

平成27年度科学研究費補助金「新学術領域研究
(研究領域提案型)」に係る中間評価報告書

「(研究領域名) 原子層科学」

(領域設定期間)

平成25年度～平成29年度

平成27年6月

領域代表者 (東北大学・理学研究科・教授・齋藤 理一郎)

目 次

研究領域全体に係る事項

1. 研究領域の目的及び概要	6
2. 研究の進展状況	8
3. 審査結果の所見において指摘を受けた事項への対応状況	1 1
4. 主な研究成果（発明及び特許を含む）	1 3
5. 研究成果の公表の状況（主な論文等一覧、ホームページ、公開発表等）	1 6
6. 研究組織（公募研究を含む）と各研究項目の連携状況	2 1
7. 若手研究者の育成に関する取組状況	2 3
8. 研究費の使用状況（設備の有効活用、研究費の効果的使用を含む）	2 4
9. 総括班評価者による評価	2 5
10. 今後の研究領域の推進方策	2 7

研究組織

研究項目	課題番号 研究課題名	研究期間	代表者氏名	所属機関 部局 職	構成員数
X00	25107001 原子層科学の推進	平成25年度～ 平成29年度	齋藤 理一郎	東北大学・理学研究科・教授	9
A01 計	25107002 グラフェン関連原子層 の新規合成法および大 面積合成法の開発	平成25年度～ 平成29年度	楠 美智子	名古屋大学・エコトピア科学研究 所・教授	7
A02 計	25107003 原子層の量子物性測定 と新規物性探索	平成25年度～ 平成29年度	長田 俊人	東京大学・物性研究所・准教授	7
A03 計	25107004 複合原子層の界面特性 理解と原子層デバイス への応用	平成25年度～ 平成29年度	長汐 晃輔	東京大学・工学系研究科・准教授	6
A04 計	25107005 原子層の電子物性、量子 輸送および光物性の理論	平成25年度～ 平成29年度	越野 幹人	東北大学・理学研究科・准教授	8
計画研究 計5件					
A01 公	26107502 超高品質半導体原子層 物質の革新的合成・機能 化法の開発	平成26年度～ 平成27年度	加藤 俊顕	東北大学・工学研究科・講師	1
A01 公	26107510 「ボトムアップ型」金属 錯体ナノシートの原子 層科学	平成26年度～ 平成27年度	坂本 良太	東京大学・理学系研究科・助教	3
A01 公	26107519 グラフェンのエッジ修 飾による物性制御	平成26年度～ 平成27年度	廣戸 聡	名古屋大学・工学研究科・助教	1
A01 公	26107528 酸化グラフェンの欠陥 を有機分子で修復する	平成26年度～ 平成27年度	仁科 勇太	岡山大学・異分野融合先端研究コ ア・准教授	3
A01 公	26107530 二次元半導体ヘテロ構 造の結晶成長と光機能 開拓	平成26年度～ 平成27年度	宮田 耕充	首都大学東京・理工学研究科・准教 授	1

A01 公	26107532 自己集積的手法による 原子膜複合体の形成	平成26年度～ 平成27年度	高井 和之	法政大学・生命科学部・准教授	1
A02 公	26107501 格子不整合ひずみグラ フェンのその場原子レ ベル顕微同定によるマ ルチスケール物性制御	平成26年度～ 平成27年度	藤川 安仁	弘前大学・理工学研究科・教授	2
A02 公	26107503 放射光ナノ顕微分光に よる原子層デバイスの 界面状態オペランド解 析とその系統的研究	平成26年度～ 平成27年度	永村 直佳	物質・材料研究機構・先端的共通技 術部門・研究員	7
A02 公	26107506 ナノ可圧法を用いた巨 大格子歪み導入による 面内電子伝導制御とデ バイス応用	平成26年度～ 平成27年度	藤田 淳一	筑波大学・数理解物質科学研究科・教 授	3
A02 公	26107507 ホウ素ドーピンググラフェン の局所電子状態と制御	平成26年度～ 平成27年度	中村 潤児	筑波大学・数理解物質科学研究科・教 授	2
A02 公	26107508 単層／多層グラフェンに おける超伝導近接効果	平成26年度～ 平成27年度	神田 晶申	筑波大学・数理解物質科学研究科・准 教授	1
A02 公	26107515 グラフェン-吸着分子間 相互作用のナノ分光学 的解明と新規グラフェ ンデバイスの創成	平成26年度～ 平成27年度	矢野 隆章	東京工業大学・総合理工学研究科・ 助教	1
A02 公	26107517 低次元系における電子 格子相互作用ダイナミ クスの実験的解明	平成26年度～ 平成27年度	片山 郁文	横浜国立大学・工学研究院・准教授	3
A02 公	26107520 グラフェンにおける非 平衡キャリアの超高速 分光による研究	平成26年度～ 平成27年度	小山 剛史	名古屋大学・工学研究科・講師	1
A02 公	26107522 ナノグラフェン・遷移金 属カルコゲナイドにお ける新規光物性の開拓	平成26年度～ 平成27年度	松田 一成	京都大学エネルギー理工学研究所・ 教授	2

A02 公	26107529 酸化グラフェンを基軸 としたグラフェンハイ ブリッドの多重機能発 現	平成26年度～ 平成27年度	速水 真也	熊本大学・自然科学研究科・教授	1
A02 公	26107512 磁気光学測定によるグ ラフェンの超強磁場物 性の開拓	平成26年度～ 平成27年度	中村 大輔	東京大学・物性研究所・助教	2
A03 公	26107504 超格子原子層材料の展 開	平成26年度～ 平成27年度	藤田 武志	東北大学・原子分子材料科学高等研 究機構・准教授	3
A03 公	90466780 極軽量・原子層メカニカ ル構造の機能化	平成26年度～ 平成27年度	米谷 玲皇	東京大学・工学系研究科・講師	1
A03 公	26107516 グラフェンによる新機 能 THz デバイスの開拓	平成26年度～ 平成27年度	河野 行雄	東京工業大学・量子ナノエレクトロ ニクス研究センター・准教授	1
A03 公	26107521 グラフェンによるフレ キシブルデバイスのパ シベーション	平成26年度～ 平成27年度	大野 雄高	名古屋大学・エコトピア科学研究 所・教授	1
A03 公	26107524 原子層界面からのテラ ヘルツ放射の計測と機 能開拓	平成26年度～ 平成27年度	川山 巖	大阪大学・レーザーエネルギー学研 究センター・准教授	1
A03 公	26107531 室温・大気中グラフェン ナノリボン合成とトラ ンジスタ応用	平成26年度～ 平成27年度	野内 亮	大阪府立大学・21 世紀科学研究機 構・特別講師	1
A04 公	26107505 原子層物質のスピン物性	平成26年度～ 平成27年度	野村 健太郎	東北大学・金属材料研究所・准教授	1
A04 公	26107509 計算科学に基づく新奇 原子層物質複合系の物 性解明と物質設計	平成26年度～ 平成27年度	岡田 晋	筑波大学・数理物質科学研究科・教 授	1
A04 公	26107514 電界印加密度汎関数計 算による原子層デバイ スのキャパシタンス の解析	平成26年度～ 平成27年度	安藤 康伸	東京大学・工学系研究科・助教	3

A04 公	26107515 グラフェン—吸着分子 間相互作用のナノ分光 学的解明と新規グラフ ェンデバイスの創成	平成26年度～ 平成27年度	岸 亮平	大阪大学・大学院基礎工学研究科・ 助教	1
A04 公	26107526 グラフェン量子素子デ バイスの理論的創成	平成26年度～ 平成27年度	草部 浩一	大阪大学・基礎工学研究科・准教授	2
A04 公	26107534 グラフェン原子層境界 における谷分極伝導	平成26年度～ 平成27年度	中西 毅	産業技術総合研究所・ナノ材料研究 部門・主任研究員	2
公募研究 計 29 件					

研究領域全体に係る事項

1. 研究領域の目的及び概要（2ページ程度）

研究領域の研究目的及び全体構想について、応募時に記述した内容を簡潔に記述してください。どのような点が「我が国の学術水準の向上・強化につながる研究領域」であるか、研究の学術的背景（応募領域の着想に至った経緯、応募時までの研究成果を発展させる場合にはその内容等）を中心に記述してください。

1-1. 研究領域の目的及び全体構想

目的：本領域の目的は、グラフェン（グラファイトの原子層）を中心として、「原子層が創る科学」を探索する新しい研究領域「原子層科学」の創成である。物質初の「単原子層の物質」であるグラフェンは、従来の半導体材料を凌駕する著しい性質をもつ。各国で原子層科学の大きなプロジェクトが始動するなど、有用性は世界の認めるところである。本物質群に関して我が国の学術水準を向上・強化することは、炭素科学において長年世界をリードしてきた日本にとって急務の課題であり、2013年に本新学術領域が発足した。

全体構想：本領域は、右図の4つの計画研究からなる。(1)原子層の合成法の探索（化学、工学）、(2)原子層固有の物性の探求（物理、工学）、(3)原子層デバイスへの応用（工学、物理）、(4)原子層電子状態の理論の構築（物理、化学）。この4つの分野を有機的に連携させ、他の原子層（h-BN, MoS₂ など）との複合層を含め原子層物質の探求を行う。本申請では、原子層科学を創成し、新たな学理と産業の創出を目指す。

1-2. 研究の学術的背景：ナノカーボン研究の学術水準の向上・強化の必要性

炭素科学・材料研究では日本は世界をリード：炭素材料研究において日本は常に世界をリードしてきた。1970年代の炭素繊維の研究は、現在ボーイング 787 の機体材料に採用され隆盛を極めている。1980年代のグラファイト層間化合物は、今日の Li イオン電池産業の基盤を作った。炭素原子同士を繋ぐ技術であるクロスカップリングは製薬・材料の産業を創出・牽引した。1985年に C₆₀分子、1991年にカーボンナノチューブ、2004年にグラフェンの発見と、ナノカーボン（10億分の1mの大きさの炭素材料）が科学の世界に大きなインパクトを与えた。ナノカーボン研究においても、理論・実験ともに日本の活躍は世界の中で著しい。現在ナノチューブの大量合成や応用は日本が中国とともに世界をリードしている。一方グラフェンは比類なき性質をもち、その基礎・応用研究において世界中で熾烈な競争がある。グラフェンをはじめとする原子層物質に関する研究開発は、我が国の伝統ある炭素科学・材料研究における学術水準の向上・強化に必須の研究領域である。

応募時に領域の着想に至った経緯：グラフェンは、2004年に剥離（はくり）法が報告され急展開した材料であり、原子層1層固有の現象が起きるところに過去にない大きな特徴をもつ。研究が勃興したばかりの分野であるため、グラフェンに限らず他の原子層物質を含めた研究を世界に先駆けて包括的に行うことで、広い学問体系に展開することが期待できる。しかし現実には、合成研究では良い試料の作製のみ追求、物性では単結晶を剥離した試料で究極の物性のみ追求、理論では深遠な物理のモデルとして追求するなど、全体としての統一的な見方や方向性を持たず、肥大しているようにも見える。これでは、研究分野の発展は期待できない。分野を超えて成果を利用できる体制を整備し、広い視野において研究の方向を定めるこ

とが本領域の創成と発展に必要である。本目的は、この物質のもつ大きな波及効果を含め、新学術領域研究の趣旨に合致するものである。

新学術領域発足後の研究領域を取り巻く世界の大きな変化：本新学術領域研究が発足した2013年以降、原子層科学の分野が国内外で大きく展開した。この展開を見ると、本領域の発足は、結果からみて非常にタイミングの良いスタートであったとすることができる。大きな展開となった契機として、(1)遷移金属ダイカルコゲナイド (MoS₂, MoSe₂, MoTe₂, WS₂, WSe₂, WTe₂など) やシリセン (Si)、ゲルマネン (Ge)、フォスフォレン (P) などの新規1原子層物質が次々と合成されたこと、また(2)理論的な解析から、多層の結晶では間接エネルギーギャップの半導体であった原子層半導体物質が、1原子層にすると直接エネルギーギャップの半導体に変化するなど、光学デバイス材料としても有用な半導体として注目を集めたことなどがあげられる。さらに(3)重い元素でできた原子層物質では、スピン軌道相互作用によってエネルギーバンドが分裂することを利用し、スピンに依存した現象や、光吸収を起こす2つの波数領域 (バレー) に依存した現象を作り出す実験が報告され、電気的に光の偏光を制御するなど従来の半導体技術ではできなかったバレートロンクスが実現した。また(4)六方窒化ホウ素(h-BN) や酸化物原子層など絶縁体の原子層物質も多く研究され、金属、半導体、絶縁体の原子層物質群がそろった。この原子層を意図的に積層することによって、複層原子層デバイスを設計するという挑戦があり、2015年になって原子層発光ダイオード(LED)を作ったという報告が英国よりなされた。これらの研究の波及効果は著しく大きい。(5)理論的研究では、原子層物質を用いることにより、40年前に理論的に予想されていて実験で実現できなかった物理現象や、逆に40年前に実験で観測されていて理論的に説明できなかった現象が、本新学術領域研究の成果として解明されるなど科学の発展にも大きく貢献した。

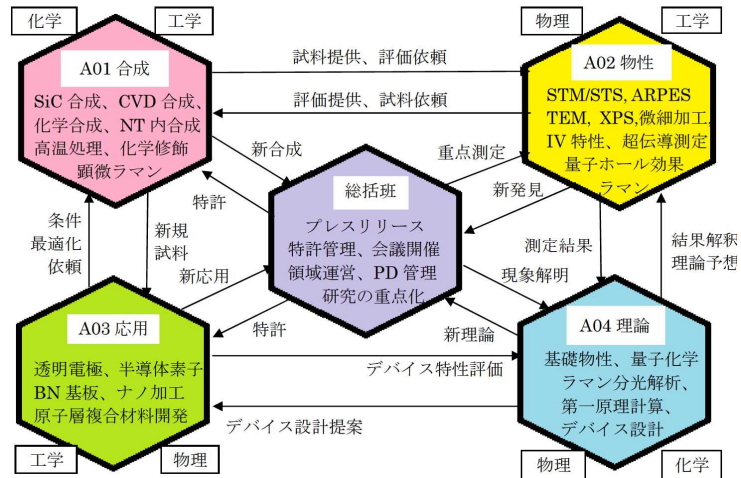
現在原子層物質の応用研究に関する主導権をとるため、世界の各国や地域で原子層物質に関する100億円を超える巨大プロジェクトが複数(EU、英国、韓国など)立ち上がっている。国内でも本新学術領域の他に2014年度からJSTのCREST研究として次世代デバイス開発を目指した2次元物質に関するプロジェクトが始まっている。また、研究を取り巻くコミュニティとしては、日本物理学会、応用物理学会、日本化学会、フラーレン・ナノチューブ・グラフェン(FNTG)学会、その他、新たに企業研究者の集まりであるグラフェンコンソーシアム(主催 産業技術研究所(AIST))、酸化グラフェンの応用を目指す酸化グラフェン研究会(熊本大学)などが発足し、大学・企業ともに原子層物質の研究開発を開始する研究者が著しく増えた。本新学術領域研究では、新規参入の研究者との交流を深めるために、グラフェンに関する講習会を年に2-3回程度2年間にわたって行い、多くの一般参加を得るなど分野の広がりを実感している。2015年6月には原子層およびナノチューブに関する国際会議NT15が名古屋で原子層科学・FNTG学会共催にて行われ、領域代表がコアのNT15組織委員として参画するが、前年度米国で開催したNT14より参加者が2.5倍の600名を超えるなど、本新学術領域および領域をとりまく世界のアクティビティは非常に高い。

2. 研究の進展状況〔設定目的に照らし、研究項目又は計画研究ごとに整理する〕（3 ページ程度）

研究期間内に何をどこまで明らかにしようとし、現在までにどこまで研究が進展しているのか記述してください。また、応募時に研究領域として設定した研究の対象に照らして、どのように発展したかについて研究項目又は計画研究ごとに記述してください。

2-1. 領域の横の繋がり の設定と進展：

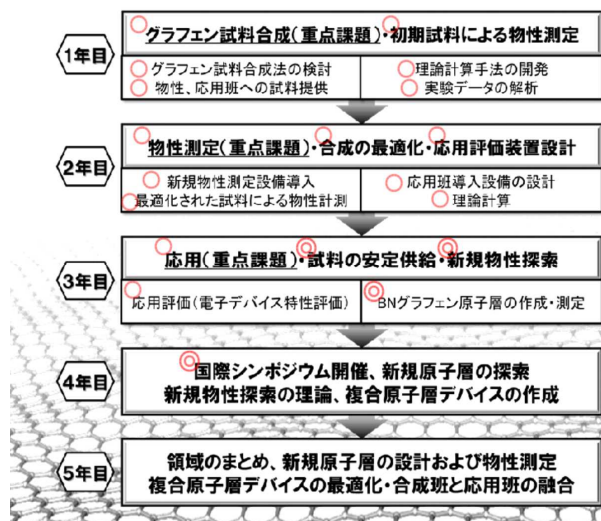
発足時の計画において右図に示す横の繋がりを提案した。この繋がりのはじめとして、A01 合成班（1 年度目予算重点配分）による原子層試料合成の進展が必須で、2-3 に示すように期待通りの進展があった。合成した試料が供給され A02 で物性評価し（2 年度目重点予算）、A04 の理論的な裏付けとともにフィードバックするなど計画通りの論文発表がある。これらの領域の流れと



並行して、応用に向けたデバイスを A03（3 年度目重点予算）で作製・評価する研究も着実に動いている。共用の実験設備も多く、概念図のような有機的連携が必然的に必要であるため計画研究 1 つの組織を大きくしたことが有効に働いている。総括班も、各種活動（別項目）を通じて、全体の共同研究を促進するとともに、多くの活動を着実にやっている。

2-2. 領域の時系列の設定と進展状況：

申請時の時系列の設定は右図に示す通りである。現在 2 年目の重点予算配分まで着実に行われている（○の項目）。この時系列より早い動き（◎）として、2 年度目に



応用班と合成班でグラフェン以外のカルコゲナイド原子層の合成に成功したことである。物性班に 2 年度に予算の重点配分が行われ、さらに公募研究においても物性

評価の手薄な新原子層の評価に関する分野を強化することで、各種原子層の物性測定に対応した。理論班と応用班においても、相互の共同研究や合成班及び物性班との共同研究が領域発足後に多く始められ、現在総数 157 件の共同研究が進行中である。さらに有機的な連携をはかるために、各種講習会をすでに 2 年間で 5 回行うなど、総括班を中心とするアクティビティは高い。また、4 年目に行う国際シンポジウムを前倒して 3 年目の今年に、**NT15（ナノチューブや原子層物質に関する国際会議、2015 年 6 月、名古屋大学）**を、総括班を中心とする組織委員会で開催する。NT15 には、原子層科学からほぼ全員の参加があり、現時点の集計で、前回の NT14 の 2.5 倍の 600 名超の参加者を集めている。そのうち海外からは、30 か国 240 名の参加登録がある。また 2015 年 3 月には、米国 NSF 財団の調査団が日本の原子層科学研究の調査に来日、また 2015 年 10 月には、EU のグラフェンフラグシップ（10 年間で 1000 億の研究プロジェクト）の代表チームが来日予定であり、共同研究の実施を模索している。このように原子層科学領域における研究は非常に活性化されている。以下各計画研究の設定目的と進展状況を示す。進展状況は、◎：予想以上の成果もしくは予

定より早い成果（下線部）。○：想定通りの成果に分けて表示した。問題があるテーマは無い。

2-3. 合成班の設定目的と進展状況（○）

高品質グラフェン・新規原子層物質の合成手法を確立することが設定目的である。2年度までに各分担者の独自の合成法の開発を達成し、サンプル提供を予定通り実現した。

(1) 化学気相蒸着（CVD）法による大面積化（10 cm 直径、結晶サイズ mm 単位）（◎）

野田は、誘電体/絶縁体基板上にグラフェンを直接形成するエッチング析出法を開発した。

丸山は、CVD で mm サイズのグラフェンの単結晶成長に成功、多くにサンプル提供した。

北浦は、クリーンな WS₂/h-BN 界面を実現した。成長した WS₂ の結晶方位は h-BN と一致、また発光スペクトルはエキシトン由来の非常にシャープな発光ピークを示した。

加藤（公募）は、WS₂ において新たな発光現象を見いだした。

(2) SiC 熱分解法によるウェーハサイズの大面積化（◎）

楠は、SiC 熱分解法により mm サイズの低欠陥単結晶グラフェン成長を実現した。共同研究で遠藤（物性班）が量子ホール測定、長汐（応用班）が量子容量測定を予定より早く開始。

(3) 化学剥離法による良質試料作製と基板上での「その場観察」（○）

斉木は、メタンプラズマを用いて、酸化グラフェンを還元し、高移動度を示す良質試料作製に成功。また、放射光を利用し Cu 基板上のグラフェンの結晶成長観察に成功した。

(4) ナノチューブ空間利用によるグラフェンナノリボンの合成（○）

篠原、北浦は、ナノチューブ内空間の重合によりグラフェンナノリボンの合成に成功した。

(5) 有機合成法によるグラフェンリボンの化学合成法（○）

依光は、パラジウム触媒を用いた有機化学合成法によりグラフェンリボン合成に成功し、近赤外領域の吸収が著しく増強されることを見いだした

2-4. 物性班の設定目的と進展状況（○）

各種原子層物質を、量子伝導測定および原子像観察・光電子分光を用いて測定し、新奇な物性現象の探索と解明を行うのが目的である。2年度目の重点目標は予定通り実現した。

(1) h-BN 上高移動度グラフェンを用いたディラック電子系の量子伝導物性の解明（○）

八木は、共同研究により h-BN 上に形成した多層（5、7、9層）グラフェンを作製した。

また1、2層のグラフェンに周期的に穴を形成した試料で、整合磁気抵抗ピークを観測した。

(2) 新しい原子層物質の探索と物性物理の開拓（◎）

長田は、単層および2層フォスフォレン（リンの新しい原子層）を開拓し、垂直の電場下の電子構造の機構を解明した。

町田は、金属/MoS₂/グラフェンのショットキーダイオード構造（縦型 FET 素子）を作製し 10⁵ 以上の ON/OFF 比を達成した。

山本は、グラフェン-超伝導体接合において、クーパー対分離を予定より早く達成した。この結果「グラフェンバレートロニクス」という新分野を拓いた。

(3) ミクロプローブ手法による物性発現機構の微視的同定と理解（○）

劉は、格子欠陥の電子顕微鏡による検出・同定を行った。回転角が異なる二層グラフェンについてラマン分析と電子顕微鏡による原子構造解析の対応付けに成功した。

菅原は、スピン分解光電子分光装置におけるエネルギー分解能を6 meVまで向上させた。新しいシリセン層間化合物CaSi₂を合成、直線的なバンド分散の観測に成功した。

2-5. 応用班の設定目的と進展状況（◎）

応用班の設定目的は、原子層デバイスを作りデバイスの動作原理を理解することである。以下のテーマで順調に進展している。

(1) 原子層膜の複層化技術の確立 (○)

長汐、塚越、上野による、複層化デバイスの特性向上に必須な清浄界面形成を実現するための、複層化に用いるポリマー材料を溶融しない乾式プロセスの開発が順調に進展している。

(2) 新規原子層材料の結晶成長 (◎)

塚越、上野は、各種遷移金属ダイカルコゲナイド原子層を作製し、FETの形成と動作特性測定を行った。またラマン分光では理論班の齋藤と共同で解析し論文を発表した。

(3) 原子層膜間及び絶縁体/原子層間の相互作用の理解 (○)

長汐は、2層グラフェンにおいて電流のオフが取れない問題に関して、不純物準位状態を調べ、影響を低減する指針を得た。

(4) 原子層膜/金属間の相互作用の理解 (○)

塚越は、MoS₂と金属電極とのコンタクト抵抗率の層数依存性を評価した。層数が増すに従って抵抗率が増加することを、エネルギーギャップの大きさの層数依存性から説明した。

(5) パッシブデバイスとしての原子層の透明電極応用 (◎)

長谷川は、グラフェン透明電極を有機LED(OLED)へ適用し、発光輝度の向上に成功した。

2-6. 理論班の設定目的と進展状況 (◎)

理論班の設定目的は、原子層物質の学理を構築すること、また実験との共同研究によって理論的に説明することである。遷移金属カルコゲナイド、シリセン、フォスフォリン等の新しい原子層物質の領域内外との共同研究も活発に行い、予想以上に進展している。

(1) MoTe₂ のラマン分光 (◎)

齋藤理は、実験(2.5(2))と共同で、新原子層MoTe₂の微細なラマンスペクトルを二重共鳴ラマン分光の理論を用いて同定した。

(2) 原子層界面におけるスピントロニクス (○)

越野は、MoTe₂などの原子層界面において、電子の屈折方向がスピンに大きく依存するスピン依存伝導現象を見出した。

(3) トポロジカルな原子層物性評価 (○)

初貝、青木は、シリコンの原子層膜であるシリセンのバンド構造解析をおこない、トポロジカルな観点からの新しい解釈を示した。

(4) 第一原理計算による新物質開発 (○)

齋藤晋は、UC Berkeleyとの共同研究で窒化ホウ素ナノチューブの第一原理計算を行い、電子格子相互作用に起因する超伝導が発現することを示した。また岡田は、グラフェンナノリボンの電界下での電子構造計算では、自由電子に近い状態が系の電氣的性質に極めて重要な役割を示すことが明らかにした。

(5) ホフスタッダーダイヤグラムの観測 (◎)

越野は、コロロンビア大学、MITとの共同研究で、h-BNとグラフェンの複合薄膜の磁場中のスペクトルが、Hofstadter butterflyという構造を持つことを示した。この構造は1970年代に理論的に予想されたが、今回40年の年月を経て実験によって確かめられた。

(6) 原子層ナノ構造からデバイス応用への展開 (◎)

若林は、2枚の半無限グラフェンシートを接続する量子ポイントコンタクト構造において電気伝導特性を予想した。安藤康は、応用班長汐と共同で、2層グラフェンの有する量子電気容量と電界強度を計算した。

(7) 新物質設計 (○)

岡田は、アセペンタレンと呼ばれる原子層が強磁性になることを示した。岸は、「開殻性を持つジラジカル中間体」の構造安定性と光学応答特性を調べた。

3. 審査結果の所見において指摘を受けた事項への対応状況（2 ページ程度）

審査結果の所見において指摘を受けた事項があった場合には、当該コメント及びそれへの対応策等を記述してください。

審査結果の所見をそのままコピーしたものを示す。

研究領域名	原子層科学
領域代表者	齋藤 理一郎（東北大学・大学院理学研究科・教授）
研究期間	平成25年度～平成29年度
科学研究費補助金審査部会における所見	<p>本研究領域は、グラフェンを中心として、新規原子層による原子層複合系を総合的に探究する新しい領域を立ち上げ、原子層の合成法探索、原子層固有の物性探索、原子層デバイスへの応用、原子層電子状態の理論構築の4つの分野を有機的に連携し、MoS₂ や h-BN 等の原子層との複合層を含めて、原子層物質の探求を行うことを目的とする。マネジメント能力のある領域代表者の下に、実力のある研究者が結集しており、成果が期待できる。</p> <p>一方で、<u>グラフェン研究の世界的な潮流に対する本研究領域の新規性及び具体的な到達点を明示することや、素子応用展開を促すためのブレークスルーを切り拓く、戦略や着想を更に深める必要がある</u>との意見があった。本研究領域では、生成を担う計画研究による良質の大面积グラフェン試料の作成とその試料の早急な物性評価及び応用を担当する計画研究への提供が、本領域の成否を大きく左右すると思われる。<u>提案されている多くの生成方法の中から、早急に標準試料を決定し、他の計画研究へ安定的に提供</u>することが極めて重要である。</p>

ここで指摘された3つの事項は、下記のような質問形式に直すことができる。

- (1) 世界的な大きなプロジェクトがあるようだけれども、本研究領域はやっていけるか？
- (2) 素子応用展開をいろいろ提案しているが、何が最も有効で重要な戦略か？
- (3) いろいろ合成方法の提案があるが、使える試料を早急に作り提供できるか？

この3項目について総括班の中で話し合い、第2年度までに以下のような戦略を考えた。

(1) グラフェン研究の世界的な潮流に対する本研究領域の新規性及び具体的な到達点を明示

戦略1：EU、英国、韓国など 100 億円を超える巨大資金の潮流の多くは、具体的な応用の実現を目標にして、予算の多くはインフラに使われている。本新学術領域の発足時の戦略は、実用化前の段階に対象を絞り、実用化における鍵となる試料や技術を得ること、またグラフェンでしか得られない新しい科学を追求することである。これによってインフラのコストは不要である。また外国が我々の新学術領域研究と共同研究をせざるを得ないような良い試料・技術を提供することで存在感を得ることができる。本領域の新規性といえる例として、グラフェンなど原子層の性能を決定的に向上する h-BN 基板の提供（渡邊）や欠陥構造の原子像まで見ることができる高解像度の電子顕微鏡観察技術（劉）、また伝統的に強いグラフェンの理論（越野・齋藤）などがあり、発足時に提案した。発足後は多くの新原子層の台頭に対抗して、新原子層の合成と複層化技術の早期確立することを新たに戦略とした。

戦略1に対する第2年度までに達成した到達点：A.渡邊らによる h-BN 基板の提供は、世界中で独占して他は追従できない。その結果 2 年間で 75 件の試料提供による共同研究が、渡邊・谷口のグループによってなされた。その半分弱が本新学術領域研究内での共同研究であり、h-BN 基板上のグラフェンは、ディラック電子の性質を顕著に示す科学として注目をあびた。しかし現在は世界中で同じ基板を使っており、物性物理では世界と競合が避けられない。B:電子顕微鏡写真による欠陥構造のその場観察は、特にグラフェン結晶境界の原子像に関して、これも他の追従を許さない成果を示した。C:進展状況でも示したが、越野らの理論はコロンビア大学 MIT 大学の実験を説明し、物理学におけるエポックともいえる成果を示した。これらが世界的な潮流に対して、達成した到達点である。

(2) 素子応用展開を探るためのブレークスルーを切り開く、戦略や着想を深める

戦略2：発足時から、グラフェンを素子材料として応用展開するには、グラフェンにエネルギーギャップがないこと、また原子層デバイス固有の問題（電極、絶縁層）が指摘されていた。世界的な潮流としては、(1)エネルギーギャップを開けるような形状にすること、(2)デバイス作製技術を向上すること、などが広く指摘されていた。一方応用班の戦略は、原点に立ち返りグラフェン素子を単に半導体デバイスと見たときに、何が原理的に違うかを実験的に明確にすることである。その上で問題点の原因と対策を明らかにする、という素朴なアプローチが、結果的に問題解決に対し近道ではないか、という考えのもと、各グループの具体的な到達点を定め課題を実行した。

戦略2に対する第2年度までの到達点：一原子層のグラフェンデバイスでは、短チャンネル問題、量子キャパシタンス問題、電極の問題などを設定して、理論との共同研究によるシミュレーションを含め、現状の問題を理解するために十分な結果を得た。またエネルギーギャップを作るために2原子層グラフェンデバイス、多層グラフェンデバイスの特性を検証した。半導体デバイスとして使う場合、移動度を犠牲とすれば、カルコゲナイド層状物質半導体原子層を使うことができる。そのため、応用班の中でこの新規半導体原子層をいち早く合成しFET素子作製やラマン分光などの物性測定を行った。ラマン分光の解析では、理論との共同研究が新学術領域研究内で行われ、すでに論文発表に至っている。さらに複層化技術における問題抽出とその解決法の確立が具体的な到達点である。

(3) 多くの生成方法の中から早急に標準試料を決定、他の計画研究へ安定的に提供する

戦略3：さまざまな合成方法の提案は、その中から択一して標準試料を作るものではない。(1)欠陥が多くても良いから大面積な試料、(2)欠陥が全くない1個の単結晶、(3)半導体基板上に低温で直接合成、(4)溶液中（ナノチューブ内）で合成でき、形状が決まっている試料、など様々な目的にかなう試料を作るためのものである。したがって発足時の具体的な達成目標は、試料の提供先を確保すること、個々の目的に合った試料を提供することである。発足後の達成目標は、新規原子層物質の合成にいち早く着手すること、またグラフェンと同様に共同研究体制を確保することである。

戦略3に対する第2年度までの到達点：合成試料の供給はこの新学術領域の共同研究体制の柱の一つであり、第1年度に合成班に予算を重点配分し、各種合成装置の導入とテスト試料の提供先の検討を全体会議で行うことにした。その結果、試料作製の前に共同研究の話が多くでき、試験的にできた試料を新学術領域内に供給できた。この結果、予定よりも早い段階で共同研究がスタートすることができ、この意味で新学術領域研究は計画通り進展している。また発足後に多くの新規原子層が次々と発見され、新規原子層の合成に対しても合成班だけでなく物性班、応用班でも取り組むグループが複数現れ、すでに物性班、応用班による物性測定も始まるなど、発足時に想定していなかった研究が急速に始まっている。これは、原子層科学がグラフェンの科学から大きく展開するという非常に良い時期に、本新学術領域研究がスタートしたことにもよる。

3つの質問に関しまとめると以下ようになる。(1)世界に対して新学術領域研究の存在感を確立した。(2)原点に返った戦略によって、より実用化に向けた、いわゆる「出口イメージ」を獲得した。(3)計画通りのサンプル提供と、時代の流れに対応した新規原子層物質の提供も可能にした。

4. 主な研究成果（発明及び特許を含む）[研究項目ごとに計画研究・公募研究の順に整理する]

(3 ページ程度)

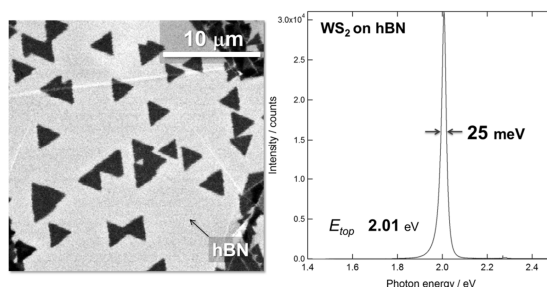
本研究課題（公募研究を含む）により得られた研究成果（発明及び特許を含む）について、新しいものから順に発表年次をさかのぼり、図表などを用いて研究項目ごとに計画研究・公募研究の順に整理し、具体的に記述してください。なお、領域内の共同研究等による研究成果についてはその旨を記述してください。

計画研究 A01 : 「グラフェン関連原子層の新規合成法および大面積合成法の開発」

・主要論文 1. h-BN 上への TMDC 直接成長

北浦良 (A01)、渡邊賢司 (A03)、日比野浩樹 (NTT 物性科学基礎研) との共同研究 [M. Okada *et al.*, *ACS Nano*, **8**, 8273 (2014).]

初年度に重点配分により初年度に導入した 3 連結電気炉を用いた CVD 法により、六方晶窒化ホウ素(h-BN)を基板として、単層 WS₂ を直接成長させた。溶液プロセスを経ない 1 段階直接成長によって、クリーンな WS₂/h-BN 界面を実現できた。その発光スペクトルはエキシトン由来の非常にシャープな発光ピークを示すことを明らかにした。



CVD 法による高品質 WS₂/h-BN

・主要論文 2. WS₂ における局在励起子の観測

加藤俊顕(A01 公募)[T. Kato *et al.*, *ACS Nano*, **8**, 12777 (2014).]

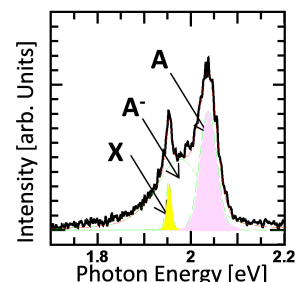
原子層物質である二硫化タングステン(WS₂)において新たな発光(PL)現象を発見し、欠陥に補足された局在励起子によることを実験的に初めて立証した。

その他の重要な成果：大面積・良質グラフェン合成技術の開発：

輻射光を利用して Cu 基板上で成長するグラフェンのその場実時間観察に成功した。[斉木幸一朗, *Nature. Commun.*, **6**, 6834(2015)].

SiC 熱分解法により、ミリメートルスケールの低欠陥単結晶グラフェン

成長を実現した。[楠, *Semicond. Sci. Tech.*, **29**, 064009 (2014). (2014 Article Highlights)]. 班内会議の情報交換をもとに、原料分子の選択により窒素ドープ位置を規定したグラフェン成長に成功した。[斉木・依光, A01 内共同研究, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **17**, 14115 (2015)]. パラジウム触媒を用い、ポルフィリン二分子の共平面型架橋に成功。[依光, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **53**, 4395 (2014)]. CVD 法に関しては、エッチング析出法[野田優 *Carbon*, **82**, 254 (2015)]、エタノールガスを用いて[丸山, *ACS Nano*, **8**, 11631 (2014)]、良質・大面積グラフェンの成長に成功した。ビス(ジチオレン)金属錯体ナノシートの大面積合成とそれに伴う導電性変化を観測した。[坂本良太(A01 公募)と University of Utah との共同研究, *Nature Commun.*, **6**, 6713 (2015)].



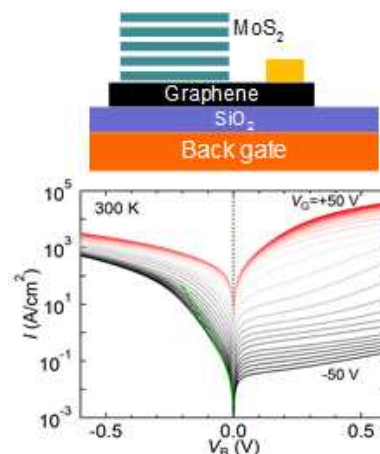
単層 WS₂ グレインバウンダリー周辺の自由励起子 (X 位置)

計画研究 A02 : 「原子層の量子物性測定と新規物性探索」

・主要論文 1. 金属/MoS₂/グラフェンショットキーダイオード構造における電流の ON/OFF 制御

町田友樹 (A02) による応用研究[R. Moriya *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **105**, 083119 (2014)].

金属/MoS₂/グラフェンショットキーダイオード構造(縦型 FET 素子)を作製し二次元面に垂直方向の電流をバックゲート電圧により

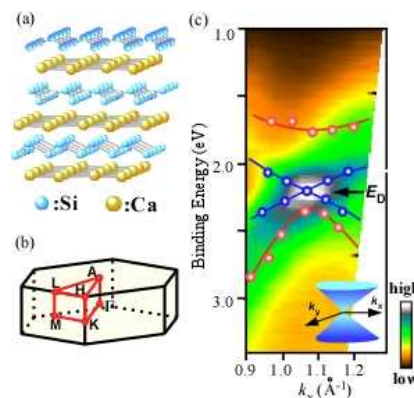


ON/OFF 制御したところ、最大 10^5 以上の ON/OFF 比を実現した。電流の ON/OFF 比は MoS_2 の原子層数に依存するが、メカニカル劈開法および原子層転写技術を用いて作製した今回の素子では、CVD 法により作製された同構造の素子に比べて一貫して優れた特性が得られている。同時に 10^4 A/cm^2 を超える ON 電流密度が観測されており、これまでのファンデルワールスヘテロ構造を用いた縦型 FET 素子の課題であった高い ON/OFF 比と大きな ON 電流密度の両立を実現した。

・主要論文 2. シリセン層間化合物の電子構造

菅原克明 (A02) による基礎研究[E. Noguchi *et al.*, *Adv. Mater.*, **27**, 856 (2015)].

グラフェンに続く新たな原子層物質シリセンは、グラフェンの炭素がシリコンに置換した物質であり、その電子構造に興味を持たれていた。しかし金属基板上に作製したシリセンを用いた実験では、基板との強い相互作用によりシリセン本来の電子状態が喪失してしまうため、実験的研究は進んでいなかった。そこで別のアプローチとして何層にも積層した多層シリセン間にカルシウムを挿入したシリセン層間化合物 CaSi_2 の高分解能光電子分光を行った。その結果、グラフェンに類似した π バンドを観測するとともに、ディラックコーン分散を観測した。これはバックリング構造をもつシリセンでのディラックコーン形成を初めて実証したものである。



その他の重要な成果：グラフェンにおけるバレーホール効果の実証

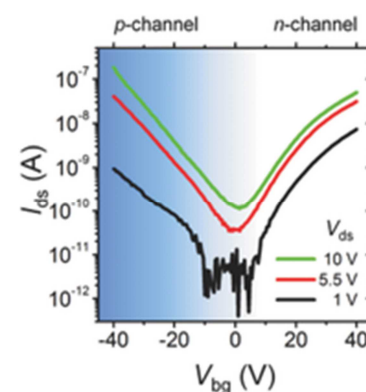
垂直電場下の 2 層グラフェンにおいて非局所伝導の実験を行った。これは K 点と K' 点に逆符号のバレー曲率を発生させ、そのバレーホール効果で発生したバレー流を逆バレーホール効果によって電気的に検出することを企図した実験である。観測された異常な非局所抵抗の定量的解析により、バレー流の発生が実証された[山本倫久 (A02)、渡邊賢司 (A03) ら、arXiv:1501.04776]。

計画研究 A03：「複合原子層の界面特性理解と原子層デバイスへの応用」

・主要論文 1. 新規 2 次元半導体のインバータ動作

塚越一仁・上野啓司 (A03)、若林克法・齋藤理一郎(A04)らによる共同研究 [Adv. Mater., **26**, 3263 (2014). ACS Nano, **8**, 3895 (2014). Phys. Rev. B, **91**, 205415 (2015).]

理論・実験グループの共同研究で、新規 2 次元原子層である MoTe_2 に関して、p 型及び n 型の両方でゲート変調することを初めて示した (右図)。この特性を生かしたインバータ動作を実証した。さらに単層の MoTe_2 の未同定振動モードについて起源を理論的側面から齋藤らが解析した。実験と理論の共同により原子層科学への理解の深まった好例である。

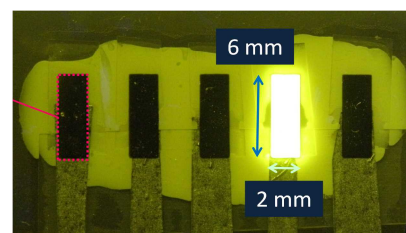


MoTe₂ の両極ゲート動作。

・主要論文 2. グラフェン透明電極を利用した有機 EL 素子

長谷川雅考(A03)による実用化研究 [Carbon, **82**, 60 (2015).]

グラフェンを用いた有機 EL 素子の最重要課題である低抵抗化をドーパント材料として塩化金を選択することで達成した。グラフェン膜と Al に電圧を印加し、発光観察に成功した (右図)。PEN 基板上にグラフェンを転写して高分子有機 EL 素子の作製を試み、最大で $7,000 \text{ cd/m}^2 @ 15 \text{ V}$ と輝度の格段の向上に成功している。



有機 EL の輝度向上！

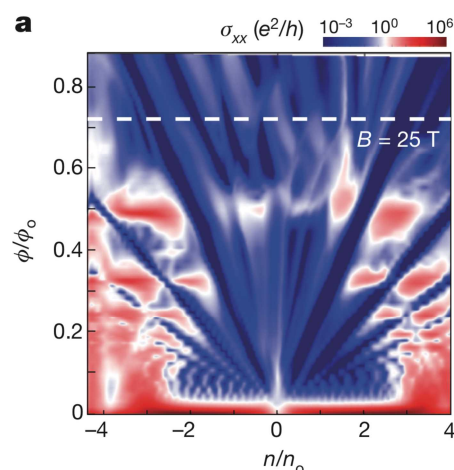
その他の重要な成果：デバイス応用展開を可能とする要素技術：

2層グラフェンのエネルギーギャップ内に存在する準位を定量評価した。また、原子層絶縁体 *h*-BN は layer-by-layer で絶縁破壊が進行することを示した[長汐晃輔、渡邊賢司(A03)の共同研究 *ACS Nano*, **9**, 916 (2015).]。また、新規2次元材料に対する電流注入に関して、コンタクト抵抗の層数依存性がエネルギーギャップの層数依存に起因していることを示した[塚越一仁(A03) *ACS Nano*, **8**, 12836 (2014).]。様々な遷移金属ダイカルコゲナイド単結晶の化学蒸気輸送法による作製及び物性測定を行った。[上野啓司、塚越一仁(A03)による共同研究 *Nanoscale*, **5**, 9666 (2013).]。

計画研究 A04 : 「原子層の電子物性、量子輸送および光物性の理論」

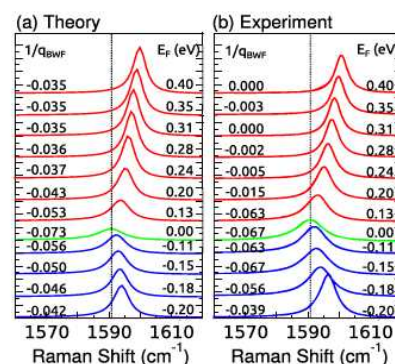
・主要論文1. 原子薄膜複合系におけるフラクタルの実現

越野幹人 (A04)、渡邊賢司 (A03)、韓国高等研究院、コロンビア大学との共同研究 [C. Dean, *et al.*, *Nature*, **497**, 598 (2013)]
理論・実験グループの共同で、グラフェンと六方晶窒化ホウ素 (h-BN) の薄膜を重ねた系に磁場を印加することで、量子力学の効果によってフラクタル (自己相似) なスペクトルが生じることを世界で初めて確かめた (右図)。これはホフスタッターの蝶と呼ばれ 1970 年代より理論的に知られていたが、近年急速に発展した原子薄膜の技術によってこれが初めて実現された。実現には越野 (A04) らによる理論計算と、渡邊 (A03) による高品質 h-BN サンプルが不可欠であった。



・主要論文2. グラフェンラマン・ファノ効果の解明

齋藤理一郎 (A04)、マサチューセッツ工科大、韓国西江大学との共同研究 [E.H. Hasdeo *et al.*, *Phys. Rev. B*, **90**, 235410 (2014)]
電荷をドーピングしたグラファイトでは G バンドと呼ばれるラマンスペクトルが非対称になることは 1970 年代から知られていたが、起源は明らかにされていなかった。今回の定量的な計算で、電子と正孔を一度に2組生成するプロセスが最も重要であることを見出し、理論が実験結果をほぼ正確に再現することに初めて成功した。これにより 40 年に及ぶ論争に決着がついた。



その他の重要な成果：グラフェンから新しい原子層新物質への展開：

新しい原子層物質の研究が急速に発展しており、領域内外との実験研究との共同研究も活発に行われた。遷移金属カルコゲナイド系の一つである *MoTe2* のラマン分光で、今まで同定できていなかったスペクトルを二重共鳴ラマン分光の理論を用いて同定することに成功した[齋藤理一郎(A04)、塚越、上野(A03), *Phys. Rev. B*, **91**, 205415 (2015)]。応用に向けた原子層ナノ構造の研究では、グラフェンシートを点で接続する量子ポイントコンタクトにおける電気伝導特性を予想した。[若林(A04)、*Phys. Rev. B*, **89**, 045423 (2014)] また炭素およびホウ素からなる原子層系にリチウムを層間に挿入することにより、超伝導の発現が期待される系の設計研究を行った[齋藤晋(A04)、*Phys. Rev. B*, **88**, 235407 (2013)]。また遷移金属カルコゲナイド系における原子ステップ界面において、電子の屈折方向がスピンの大きさに大きく依存するスピン依存伝導現象が見出され、スピントロニクスへ応用の可能性が示された。[羽部哲朗(本領域の博士研究員)、越野(A04), *Phys. Rev. B*, **91**, 201407(R) (2015)] またシリコン原子膜であるシリセンの特徴的な電子構造についてトポロジカルな観点からの新しい解釈が示された。[初貝、青木(A04)、*New J. Phys.*, **17** 025009 (2015)]

5. 研究成果の公表の状況（主な論文等一覧、ホームページ、公開發表等）（5 ページ程度）

本研究課題（公募研究を含む）により得られた研究成果の公表の状況（主な論文、書籍、ホームページ、主催シンポジウム等の状況）について具体的に記述してください。論文の場合、新しいものから順に発表年次をさかのぼり、研究項目ごとに計画研究・公募研究の順に記載し、研究代表者には二重下線、研究分担者には一重下線、連携研究者には点線の下線を付し、corresponding author には左に*印を付してください。また、一般向けのアウトリーチ活動を行った場合はその内容についても記述してください。また、別添の「(2) 発表論文」の融合研究論文として整理した論文については、冒頭に◎を付してください。

本研究課題の研究成果の公表の状況及び方法は、発表論文、書籍、総説以外は以下のとおりである。

- 1 領域のホームページ (<http://flex.phys.tohoku.ac.jp/gensisou/>) の「研究成果」欄に公表されている。研究成果の内容は、発表論文、著書・総説、招待講演、社会貢献、特許出願で、発表年および計画研究ごとに分けられている。
- 2 中間報告書の作成： 2015 年 3 月には、中間報告書として日本語(280 頁)、英語(170 頁)をそれぞれ作成し、研究者ごとの研究成果をまとめた。この結果は PDF として、上記ホームページからダウンロードできる。すでに 400 件近いダウンロードが行われている。中間報告書を領域独自に作成し、公開した目的は、我々の現状を説明し、領域内外の共同研究を促進するためである。
- 3 主催シンポジウムなどの状況：
 - 3.1 国際シンポジウム NT15 の共催：2015 年 6 月 28 日から 7 月 3 日まで、名古屋大学で NT15（ナノチューブや原子層物質に関する国際会議）をフラーレン・ナノチューブ・グラフェン（FNTG）学会とともに共催する。主催は NT15 の組織委員会であるが、組織委員会の 2/3 が原子層科学のメンバーであり、原子層科学の研究者は全員発表することになっている。FNTG 学会の幹事会も半数が原子層科学のメンバーである。本領域は当初予定の 4 年度目の開催を待たずシンポジウムを開催することになる。NT15 の参加者数は前回 NT14（米国、ロサンジェルス）の 2.5 倍の 600 名を超えており、この分野の最も大きな会議となる。
 - 3.2 A3 シンポジウムの主催、その他総括班が主催者となった会議：1 年度と 2 年度目に、アジア 3 か国（中国、韓国、日本）で持ち回りの原子層に関する A3 シンポジウムを、領域代表の齋藤が議長（日本側主催者）として運営（2 回）した。また、総括班の若林はインド日本シンポジウムを、総括班の依光は台湾日本国際シンポジウムを主催者として開催した。原子層メンバーがすべてではないが、参加者の半数以上が原子層科学のメンバーで構成されている。
 - 3.3 市民講座、講習会の実施：原子層科学の成果を領域内外にわかりやすく説明するため、一般公開の講習会を各種 5 回（別項）実施し、2015 年 8 月 3 日には、京都大学で市民講座を物理学会、日本化学会、物理教育学会、の協賛、また各支部の共催により開催する予定である。
- 4 その他、領域全体を説明する本の出版： 領域代表の齋藤は、2015 年 1 月に「フラーレン・ナノチューブ・グラフェンの科学」という単著の本（高校生から一般の研究者まで広い読者層を想定）を共立出版から出版し、原子層科学の魅力を伝えた。また理論班の青木と MIT の Dresselhaus は、”Physics of Graphene”という本を編集し、Springer から 2013 年に出版した。また評価者の榎と理論班の安藤は、”Physics and Chemistry of Graphene –Graphene to Nano Graphene”という本を編集し、Pan Stanford 社から出版した。その他本の分担執筆、解説・総説記事が合計 25 件ある。合成班の篠原は 2015 年 6 月 28 日放送の NHK 教育のサイエンスゼロに出演する予定である。
次ページ以下は計画研究ごとの主な論文及び著書のリストである。

5.1 合成班 (計画研究)

1. T. Terasawa and *K. Saiki, "Radiation Mode Optical Microscopy on the Growth of Graphene" *Nat. Commun.*, **6**, 6834 (2015). (査読有)
2. Y. Masuda, *W. Norimatsu, and M. Kusunoki, "Formation of a nitride interface in epitaxial graphene on SiC (0001)", *Phys. Rev. B*, **91**, 075421-1~6 (2015). (査読有)
3. ©H. Shirae, D.Y. Kim, K. Hasegawa, T. Takenobu, Y. Ohno, and *S. Noda, "Overcoming the quality-quantity tradeoff in dispersion and printing of carbon nanotubes by a repetitive dispersion-extraction process" *Carbon*, **91**, 20–29 (2015). (査読有)
4. M. Kosaka, S. Takano, K. Hasegawa, and *S. Noda, "Direct synthesis of few- and multi-layer graphene films on dielectric substrates by "etching-precipitation" method", *Carbon*, **82**, 254–263 (2015). (査読有)
5. ©S. Kim, P. Zhao, S. Aikawa, E. Einarsson, S. Chiashi, *S. Maruyama, "Highly Stable and Tunable n-Type Graphene Field-Effect Transistors with Polyvinyl Alcohol Films" *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **7**, 9702-9708 (2015). (査読有)
6. ©*P. Zhao, S. Kim, X. Chen, E. Einarsson, M. Wang, Y. Song, H. Wang, S. Chiashi, R. Xiang, *S. Maruyama, "Equilibrium Chemical Vapor Deposition Growth of Bernal-Stacked Bilayer Graphene" *ACS Nano*, **8**, 11631-11638 (2014). (査読有)
7. N. Fukui, *H. Yorimitsu, and *A. Osuka, "meso, β -Oligohaloporphyrins as Useful Synthetic Intermediates of Diphenylamine-Fused Porphyrin and meso-meso β - β Doubly Butadiyne-Bridged Diporphyrin" *Angew. Chem. Int. Ed.*, **54**, 6311–6314 (2015). (査読有)
8. ©M. Okada, T. Sawazaki, K. Watanabe, T. Taniguchi, H. Hibino, *H. Shinohara, and *R. Kitaura, "Direct Chemical Vapor Deposition Growth of WS₂ Atomic Layers on hBN", *ACS Nano*, **8**, 8273-8277, 2014. (査読有)
9. ©S. Zhao, T. Kitagawa, Y. Miyauchi, K. Matsuda, *H. Shinohara, and *R. Kitaura, "Rayleigh scattering studies on inter-layer interactions in structure-defined individual double-wall carbon nanotubes", *Nano Research*, **7**, 1548-1555, 2014. (査読有)
10. K. Kotsuki, S. Obata, and *K. Saiki, "Electric-Field-Assisted Position and Orientation Control of Organic Single Crystals", *Langmuir*, **30**, 14286 (2014). (査読有)
11. ©N. Fukui, *H. Yorimitsu, J. M. Lim, *D. Kim, and *A. Osuka, "Synthesis of 7,8-Dehydropurpurin Dimers and Their Conversion to Conformationally Constrained β -to- β Vinylene-Bridged Porphyrin Dimers", *Angew. Chem. Int. Ed.*, **53**, 4395-4398 (2014). (査読有)
12. M. Morita, *W. Norimatsu, H-J. Qian, S. Irlle, and M. Kusunoki, "Atom-by-atom simulations of graphene growth by decomposition of SiC (0001): Impact of the substrate steps", *Appl. Phys. Lett.*, **103**, 141602-1-4 (2013). (査読有)

書籍及び総説

1. *W. Norimatsu and M. Kusunoki, "Structural features of epitaxial graphene on SiC {0001} surfaces (Invited Review)". *Phys. D: Appl. Phys.*, **47**, 094017-1~16 (2014). (査読有)
2. *W. Norimatsu and M. Kusunoki, "Growth of graphene from SiC {0001} and its mechanisms" (Invited Review), *Semicond. Sci. Tech.*, **29**, 064009-1~11 (2014). 2014 Highlighted article. (査読有)

5.2 合成班 (公募研究)

1. ©*R. Sakamoto, K. Hoshiko, Q. Liu, T. Yagi, T. Nagayama, S. Kusaka, M. Tsuchiya, Y. Kitagawa, W.-Y. Wong, H. Nishihara, "A photofunctional bottom-up bis(dipyrrinato)zinc(II) complex nanosheet", *Nature Commun*, **6**, 6713 (2015). (査読有)
2. ©Y. Kobayashi, S. Sasaki, S. Mori, H. Hibino, Z. Liu, K. Watanabe, T. Taniguchi, K. Suenaga, Y. Maniwa, Y. Miyata, "Growth and Optical Properties of High-Quality Monolayer WS₂ on Graphite", *ACS Nano*, **9**, 4056-4063 (2015). (査読有)
3. S. Ito, *S. Hiroto, S. Lee, M. Son, I. Hisaki, T. Yoshida, *D. Kim, *N. Kobayashi, and *H. Shinokubo, "Synthesis of Highly Twisted and Fully π -Conjugated Porphyrinic Oligomers" *J. Am. Chem. Soc.*, **137**, 142-145 (2015). (査読有)
4. ©Saito, H. Tsuji, I. Shimoyama, K. Shimizu, *Y. Nishina, "Highly durable carbon-supported Pt catalysts prepared by hydrosilane-assisted nanoparticle deposition and surface functionalization", *Chem Commun*, **51**, 5883-5886 (2015). (査読有)
5. *T. Kato and T. Kaneko, "Optical detection of a highly localized impurity state in monolayer tungsten disulfide", *ACS Nano*, **8**, 12777-12785 (2014). (査読有)
6. ©*M. Panich, V. Yu. Osipov and K. Takai, "Diamagnetism of carbon onions probed by NMR of adsorbed water", *New Carbon Mater.*, **29**, 392-397 (2014). (査読有)

書籍及び総説

1. *仁科勇太, 森本直樹, 酸化グラフェンの合成方法とサイズ・酸化度の制御, グラフェン・コンポジット 第1編 第1章, S&T出版, 2014年07月15日発刊.

6.1 物性班 (計画研究)

1. *T. Osada, "Surface Transport in the $\nu=0$ Quantum Hall Ferromagnetic State in the Organic Dirac Fermion System", *J. Phys. Soc. Jpn.* **84**, 053704/1-4 (2015). (査読有)
2. *T. Osada, "Edge State and Intrinsic Hole Doping in Bilayer Phosphorene", *J. Phys. Soc. Jpn.* **84**, 013703/1-4 (2015). (査読有)
3. S. Morikawa, S. Masubuchi, R. Moriya, K. Watanabe, T. Taniguchi, and *T. Machida, "Edge-channel interferometer at the graphene quantum Hall pn junction", *Appl. Phys. Lett.* **106**, 183101-1-4 (2015). (査読有)
4. Y. Miyata, *K. Nakayama, K. Sugawara, T. Sato, and T. Takahashi, "High-temperature superconductivity in potassium-coated multilayer FeSe thin films", *Nat. Matter.*, published online. (査読有)
5. E. Noguchi, K. Sugawara, R. Yaokawa, T. Hitosugi, H. Nakano, and *T. Takahashi, "Direct observation of Dirac cone in multilayer silicene intercalation compound CaSi_2 ", *Advanced Materials* **27**, 856-860 (2015). (査読有)
6. ©T. Yamaguchi, *R. Moriya, Y. Inoue, S. Morikawa, S. Masubuchi, K. Watanabe, T. Taniguchi, and *T. Machida, "Tunneling transport in a few monolayer-thick WS_2 /graphene heterojunction", *Appl. Phys. Lett.* **105**, 223109-1-4 (2014). (査読有)
7. *R. Moriya, T. Yamaguchi, Y. Inoue, S. Morikawa, Y. Sata, S. Masubuchi, and *T. Machida, "Large current modulation in exfoliated-graphene/ MoS_2 /metal vertical heterostructures", *Appl. Phys. Lett.* **105**, 083119-1-4 (2014). (査読有)
8. H. Shioya, S. Russo, M. F. Craciun, M. Yamamoto and S. Tarucha, "Straining graphene using thin film shrinkage methods", *Nano Lett.* **14**, 1158 (2014). (査読有)
9. *Z. Liu, Y. C. Lin, C. C. Lu, C. H. Yeh, P. W. Chiu, S. Iijima, K. Suenaga, "In situ observation of step-edge in-plane growth of graphene in a STEM", *Nat. Comm.*, **5**: 4055 (2014). (査読有)
10. *J. Kleeman, K. Sugawara, T. Sato, and T. Takahashi, "Anisotropic electron-phonon coupling in Rb-intercalated bilayer graphene", *J. Phys. Soc. Jpn.* **83**, 124715 (2014). (査読有)
11. Toru Takahashi, *K. Sugawara, E. Noguchi, T. Sato, and T. Takahashi, "Band-gap tuning of monolayer graphene by oxygen adsorption", *Carbon* **73**, 141-145 (2014). (査読有)
12. C. C. Lu, Y. C. Lin, *Z. Liu, C. H. Yeh, K. Suenaga, P. W. Chiu, "Twisting Bilayer Graphene Superlattices", *ACS Nano* **7**, 2587-2594 (2013). (査読有)
13. J. H. Warner, *Z. Liu, K. He, A. W. Robertson, K. Suenaga, "Sensitivity of Graphene Edge States to Surface Adatom Interactions", *Nano Lett.* **13**, 4820-4826 (2013). (査読有)

6.2 物性班 (公募研究)

1. *N. Nagamura, R. Hobara, T. Uetake, T. Hirahara, M. Ogawa, T. Okuda, K. He, P. Moras, P. M. Sheverdyaeva, C. Carbone, K. Kobayashi, I. Matsuda, and S. Hasegawa, "Anisotropic Electronic Conduction in Metal Nanofilms Grown on a One-Dimensional Surface Superstructure", *Phys. Rev. B* **89**, 125415 (2014).
2. K. Murakami, T. Dong, Y. Kajiwara, T. Hiyama, T. Takahashi, E. Takai, G. Ohashi, K. Shiraki, and *J. Fujita, "Synthesis of graphene nanoribbons from amyloid templates by gallium solid-phase graphitization using gallium vapor catalyst", *Appl. Phys. Lett.* **104**, 243101 (2014).
3. *T. Koyama, T. Tsunekawa, T. Saito, K. Asaka, Y. Saito, H. Kishida, and A. Nakamura, "Synthesis and Photophysics of Quaterylene Molecules in Single-Walled Carbon Nanotubes: Excitation Energy Transfer between a Nanoscale Cylinder and Encapsulated Molecules", *J. Phys. Chem. C* **118**, 21671-21681 (2014). (査読有)
4. ©S. Mouri, Y. Miyauchi, M. Toh, W. Zhao, G. Eda, and *K. Matsuda, "Nonlinear photoluminescence in atomically thin layered WSe_2 arising from diffusion-assisted exciton-exciton annihilation", *Phys. Rev. B* **90**, 155449-1-5 (2014). (査読有)
5. ©K. Hatakeyama, H. Tateishi, T. Taniguchi, M. Koinuma, T. Kida, S. Hayami, H. Yokoi, *Y. Matsumoto, "Tunable Graphene Oxide Proton/Electron Mixed Conductor that Functions at Room Temperature", *Chem. Mater.* **26**, 5598-5604 (2014). (査読有)
6. K. Katakura, H. Tomori, Y. Ootuka, and *A. Kanda, "Surface morphology of multilayer graphene synthesized directly on silicon dioxide", *Phys. Status Solidi C* **10** (2013) 1628-1631. (査読有)
7. *I. Katayama, K. Sato, S. Koga, J. Takeda, S. Hishita, H. Fukidome, M. Suemitsu and M. Kitajima, "Coherent Nanoscale Optical -Phonon Wavepacket in Graphene Layers", *Phys. Rev. B* **88**, 245406-1-5 (2013). (査読有)

7.1 応用班 (計画研究)

1. ©N. Takahashi, T. Taniguchi, K. Watanabe, and *K. Nagashio, "Atomic layer deposition of Y_2O_3 on h -BN for a gate stack in graphene FETs", *Nanotechnology*, **26**, 175708-1-6, (2015). (査読有)
2. ©M. Yamamoto, S. Dutta, S. Aikawa, S. Nakaharai, K. Wakabayashi, M. S. Fuhrer, K. Ueno, *K. Tsukagoshi, "Self-limiting layer-by-layer oxidation of atomically thin WSe_2 ", *Nano Lett.* **15**, 2067-2073 (2015). (査読有)

3. *Y. Okigawa, R. Kato, M. Ishihara, T. Yamada, *M. Hasegawa, "Electrical properties and domain sizes of graphene films synthesized by microwave plasma treatment under a low carbon concentration", *Carbon*, **82**, 60-66 (2015). (査読有)
4. © Y. Hattori, T. Taniguchi, K. Watanabe and *K. Nagashio, "Layer-by-Layer Dielectric Breakdown of Hexagonal Boron Nitride", *ACS nano*, **9**, 916-921 (2015). (査読有)
5. S.-L. Li, K. Komatsu, S. Nakaharai, Y.-F. Lin, M. Yamamoto, X. Duan, and *K. Tsukagoshi, "Thickness Scaling Effect on Interfacial Barrier and Electrical Contact to Two-Dimensional MoS₂ Layers", *ACS Nano*, **8**, 12836-12842 (2014). (査読有)
6. © Y.-F. Lin, Y. Xu, S.-T. Wang, S.-L. Li, M. Yamamoto, A. Aparecido-Ferreira, W. Li, H. Sun, S. Nakaharai, W.-B. Jian, K. Ueno, and *K. Tsukagoshi, "Ambipolar MoTe₂ Transistors and Their Applications in Logic Circuits", *Adv. Mater.*, **26**, 3263-3269 (2014). (査読有)
7. © M. Yamamoto, S. T. Wang, M. Ni, Y.-F. Lin, S.-L. Li, S. Aikawa, W.-B. Jian, K. Ueno, K. Wakabayashi, and *K. Tsukagoshi, "Strong Enhancement of Raman Scattering from a Bulk-Inactive Vibrational Mode in Few-Layer MoTe₂", *ACS Nano*, **8**, 3895-3903 (2014). (査読有)
8. R. Kato, K. Tsugawa, Y. Okigawa, T. Yamada, M. Ishihara, *M. Hasegawa, "Bilayer graphene synthesis by plasma treatment of copper foils without using a carbon-containing gas", *Carbon*, **77**, 823-828 (2014). (査読有)
9. M.-Y. Chan, K. Komatsu, S.-L. Li, Y. Xu, P. Darmawan, H. Koramochi, S. Nakaharai, K. Watanabe, T. Taniguchi, and *K. Tsukagoshi, "Suppression of thermally activated carrier transport in atomically thin MoS₂ on crystalline hexagonal Boron Nitride substrates", *Nanoscale*, **5**, 9572-9576 (2013). (査読有)
10. H. S. Song, S. L. Li, L. Gao, Y. Xu, K. Ueno, J. Tang, Y. B. Cheng, and *K. Tsukagoshi, "High-performance top-gated monolayer SnS₂ FETs and their integrated logic circuits", *Nanoscale*, **5**, 9666 (2013). (査読有)
11. R. Ifuku, *K. Nagashio, T. Nishimura, and A. Toriumi, "The density of states of graphene underneath a metal electrode and its correlation with the contact resistivity", *Appl. Phys. Lett.*, **103**, 033514-1-5 (2013). (査読有)
12. *T. Yamada, M. Ishihara, M. Hasegawa, "Low Temperature Graphene Synthesis from Poly(methyl methacrylate) Using Microwave Plasma Treatment", *Appl. Phys. Express*, **6**, 115102-1-3 (2013). (査読有)
13. *Y. Okigawa, K. Tsugawa, T. Yamada, M. Ishihara, *M. Hasegawa, "Electrical characterization of graphene films synthesized by low-temperature microwave plasma chemical vapor deposition", *Appl. Phys. Lett.*, **103**, 153106-1-4 (2013). (査読有)

書籍及び総説

1. K. Nagashio, A. Toriumi, "Graphene/metal contact" in *Frontiers of graphene and carbon nanotubes -Devices and applications-*, Springer, 2015, pp.53-78. [ISBN: 978-4-431-55371-7].
2. ©上野啓司, 塚越一仁, "原子層エレクトロニクスに向けたカルコゲナイド系層状物質の基礎物性と薄膜形成手法", 応用物理, Vol.83, No.4, 274-278, 2014.
3. 上野啓司, "グラフェン透明電極の溶液塗布による作製と応用", グラフェン・コンポジット 第2編第4章, S&T出版, 2014年07月15日発刊.

7.2 応用班 (公募研究)

1. *R. Nouchi and K. Tanigaki, "Competitive interfacial charge transfer to graphene from the electrode contacts and surface adsorbates", *Appl. Phys. Lett.*, **106**, 083107-1-5 (2015).
2. D. Voiry, A. Goswami, R. Kappera, C. de Carvalho, C. e Silva, D. Kaplan, T. Fujita, M. W. Chen, T. Asefa, and *M. Chhowalla, "Covalent functionalization of monolayered transition metal dichalcogenides by phase engineering", *Nature Chemistry*, **7**, 45-49 (2015).
3. Y.-H. Chang, W. Zhang, Y. Zhu, Y. Han, J. Pu, J.-K. Chang, W.-T. Hsu, J.-K. Huang, C.-L. Hsu, M.-H. Chiu, T. Takenobu, H. Li, C.-I. Wu, W.-H. Chang, A. T. S. Wee, and *L.-J. Li, "Monolayer MoSe₂ Grown by Chemical Vapor Deposition for Fast Photodetection", *ACS Nano*, **8**, 8582-8590 (2014).
4. Y. Sano, *I. Kawayama, M. Tabata, K. A. Salek, H. Murakami, M. Wang, R. Vajtai, P. M. Ajayan, J. Kono, and M. Tonouchi, "Imaging molecular adsorption and desorption dynamics on graphene using terahertz emission spectroscopy", *Sci. Rep.*, **4**, 6046-1-4 (2014).
5. X. He, N. Fujimura, J. M. Lloyd, K. J. Erickson, A. A. Talin, Q. Zhang, W. Gao, Q. Jiang, Y. Kawano, R. H. Hauge, *F. Leonard and *J. Kono. "Carbon Nanotube Terahertz Detector", *Nano Lett.*, **14**, 3953-3958 (2014).
6. © N. Fukaya, D. Y. Kim, S. Kishimoto, S. Noda, and *Y. Ohno, "One-Step Sub-10 um Patterning of Carbon-Nanotube Thin Films for Transparent Conductor Applications", *ACS Nano*, **8**, 3285-3293 (2014).

書籍及び総説

1. Y. Ohno, "High-Mobility Thin-Film Transistors for Flexible Electronics Applications" in *Frontiers of graphene and carbon nanotubes-Devices and applications-*, Springer, 2015, pp. 269-283. [ISBN: 978-4-431-55371-7].
2. Y. Kawano, "Terahertz Technology based on Nanoelectronic Devices" in *High-Speed Devices and Circuits with THz Applications*, pp. 1-26, CRC Press, 2014. [ISBN: 9781466590113].

8.1 理論班 (計画研究)

1. *T. Habe and M. Koshino, "Spin-dependent refraction at the atomic step of transition-metal dichalcogenides", *Phys. Rev. B*, **91**, 201407-1-5(R) (2015). (査読有)
2. A. L. Grushina, D. K. Ki, M. Koshino, A. A. L. Nicolet, C. Faugeras, E. Mccann, M. Potemski and A. F. Morpurgo, "Insulating state in tetra layers reveals an even-odd interaction effect in multilayer graphene", *Nature Comm.* **6**, 6419-1-7 (2015)

3. ©*H. Guo, T. Yang, M. Yamamoto, L. Zhou, R. Ishikawa, K. Ueno, K. Tsukagoshi, Z.Zhang, M.S. Dresselhaus, R. Saito, "Double resonance Raman modes in monolayer and few-layer MoTe₂", *Phys. Rev. B*, **91**, 205415-1-8 (2015). (査読有)
4. *Y. Sakai, S. Saito, and M.L. Cohen, "Electronic properties of B-C-N ternary kagome lattices", *Phys. Rev. B*, **91**, 165434-1-6 (2015). (査読有)
5. *E. H. Hasdeo, A. R. T. Nugraha, M. S. Dresselhaus, R. Saito, "Breit-Wigner-Fano line shapes in Raman spectra of graphene", *Phys. Rev. B* **90** 245140-1-8 (2014). (査読有)
6. *J. F. Rodriguez-Nieva, E. B. Barros, R. Saito, and M. S. Dresselhaus, "Disorder-induced double resonant Raman process in graphene", *Phys. Rev. B* **90**, 235410-1-9, (2014). (査読有)
7. *Y. Hatsugai and H. Aoki, "Polarization as a topological quantum number in graphene", *Phys. Rev. B* **90**, 045206-1-6 (2014). (査読有)
8. *Y. Sakai, S. Saito, and M.L. Cohen, "Lattice matching and electronic structure of finite-layer graphene/h-BN thin films", *Phys. Rev. B* **89** 115424-1-6 (2014). (査読有)
9. *H.-Y. Deng, K. Wakabayashi, C.-H.Lam, "Formation Mechanism of Bound States in Graphene Point Contacts", *Phys. Rev. B* **89**, 045423-1-9 (2014). (査読有)
10. B. Hunt, J. D. Sanchez-Yamagishi, A. F. Young, K. Watanabe, T. Taniguchi, P. Moon, Mikito Koshino, *P. Jarillo-Herrero, R. C. Ashoori, "Massive Dirac fermions and Hofstadter butterfly in a van der Waals heterostructure", *Science* **340**, 1427-1430 (2013). (査読有)
11. C. R. Dean, L. Wang, P. Maher, C. Forsythe, F. Ghahari, Y. Gao, J. Katoch, M. Ishigami, P. Moon, M. Koshino, T. Taniguchi, K. Watanabe, K. L. Shepard, J. Hone, and *P. Kim, "Hofstadter's butterfly in moire superlattices: A fractal quantum Hall effect", *Nature* **497**, 598-602 (2013). (査読有)
12. *Y. Hamamoto, T. Kawarabayashi, H. Aoki and Y. Hatsugai, "Spin-resolved chiral condensate as a spin-unpolarized $\nu=0$ quantum Hall state in graphene", *Phys. Rev. B* **88**, 195141-1-6 (2013). (査読有)
13. *P. A. Maksym and H. Aoki: "Magnetic field controlled vacuum charge in graphene quantum dots with a mass gap", *Phys. Rev. B* **88**, 081406(R)-1-5 (2013). (査読有)

書籍及び総説

1. H. Aoki and M. S. Dresselhaus (ed.), "Physics of Graphene" (Springer,2014). [ISBN: 978-3-319-02632-9]
2. M. Koshino and T. Ando "Electronic Properties of Monolayer and Multilayer Graphene", in H. Aoki and M. S. Dresselhaus (ed.): Physics of Graphene (Springer, 2014), Ch.6, pp. 173-211.
3. Y. Hatsugai and H. Aoki, "Graphene --- topological properties, chiral symmetry and their manipulation", in H. Aoki and M. S. Dresselhaus (ed.): Physics of Graphene (Springer, 2014), Ch.7, pp. 213-250.

8.2 理論班 (公募研究)

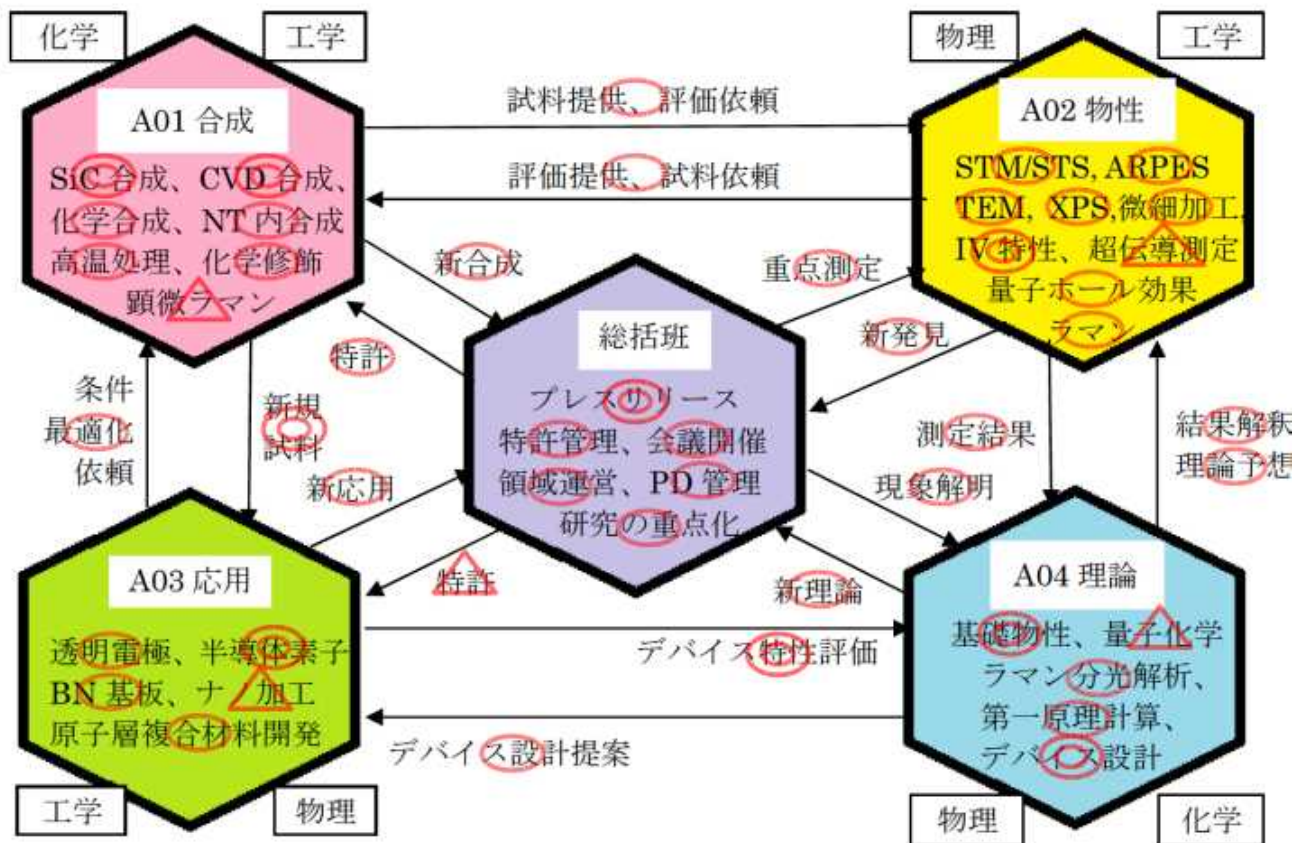
1. T. Nakanishi, T. Ando, "Effective-mass theory of collapsed carbon nanotubes", *Phys. Rev. B*, **91**, 155420-1-16 (2015). (査読有)
2. M. Maruyama and S. Okada, "Two-dimensional sp² carbon networks of fused pentagons", *Jpn. J. Appl. Phys.* **53**, 06JD02-1-4 (2014). (査読有)
3. K. Yoneda, H. Matsui, K. Fukuda, S. Takamuku, R. Kishi, *M. Nakano, "Open-shell characters and second hyperpolarizabilities for hexagonal graphene nanoflakes including boron nitride domains", *Chem. Phys. Lett.* **595-596**, 220-225 (2014). (査読有)
4. Maxim Ziatdinov, Shintaro Fujii, Koichi Kusakabe, Manabu Kiguchi, Takehiko Mori, Toshiaki Enoki, "Direct imaging of monovacancy-hydrogen complexes in a single graphitic layer", *Phys. Rev. B* **89**, 155405-1-15 (2014). (査読有)

6. 研究組織（公募研究を含む）と各研究項目の連携状況（2ページ程度）

領域内の計画研究及び公募研究を含んだ研究組織と領域において設定している各研究項目との関係を記述し、研究組織間の連携状況について組織図や図表などを用いて具体的かつ明確に記述してください。

6. 1：計画研究及び公募研究を含んだ研究組織における関係と現状に対する評価：

下図が発足時に提案した研究組織図である。総括班と公募研究を含む4つの計画班の合計5つの班から成り、各班で設定された研究項目を六角形の中に示した。また班と班を結ぶ矢印によって、研究組織間の連携状況に係る項目を示した。この図の中に、独自に作成した中間報告書（日本語 280 頁）をもとに、項目ごとに総括班で評価を加えた。◎：予想以上の成果がある、もしくは、予想より早い展開がある、○：計画通りに進行している、△：これから計画が始まる、もしくは予想より少ない結果になっている。公募研究が独自に設定した研究項目もあるが、公募研究がスタートしてまだ1年であること、また多くは計画研究と共同で動いているので、新たな研究項目は付け加えていない。図でわかるように、計画はおおむね順調に進んでいるが、△がついた項目もある。これは、年次進行に伴う項目や、新たに購入した装置のテストなど時間がかかるものと個別に分析している。いずれも、最終年度時には十分に達成できると考えられる。



図：発足時の研究項目と共同体制（赤字は評価：◎予想以上、○予想通り、△展開中）。

6. 2：共同研究の分析

6. 2. 1：共同研究の総数：新学術領域研究においては、当初より共同研究の推進によるシナジー効果を総括班の戦略として進めてきた関係で、**総数 158 件**という驚異的な共同研究が達成された。この件数は、1件当たり2ないし3の研究者がかかっているので、延人数にすると300以上の数になり、構成員

が少なくとも2-3件の共同研究を実施したことになる。しかし、この数字が独り歩きしないように、原子層科学における特殊な状況を説明する必要がある。特殊な状況であっても、共同研究が広く行われたことは間違いない。

6. 2. 2 : 共同研究の内訳 : 総数 158 件

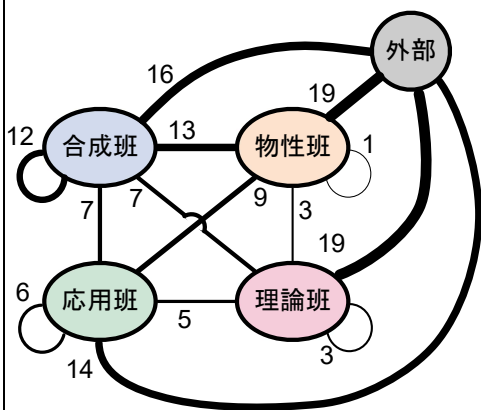
- 領域発足後に始まった共同研究 119 件 (うち領域会議をきっかけとするもの 20 件)
- 領域発足以前からの共同研究 39 件

総数 154 件のうち、領域発足以前からの共同研究がそのまま発展したものが 38 件で、残り 116 件が領域発足後に始まった共同研究である。このうち領域会議における議論がきっかけとなったものが 19 件である。このように、領域開始後に新たに共同研究が始まったケースが発足以前の 4 倍あるのは、原子層科学が共同研究を非常に重視した結果であるといえる。

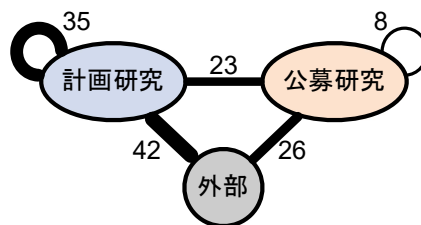
- 総数 154 件のうち国際共同研究 101 件 (うち 75 件が渡邊賢司による h-BN 結晶の海外提供)

この共同研究全体 154 件のうち国際共同研究が 101 件あるのも、原子層科学の大きな特徴であるといえる。この 4 分の 3 にあたる 75 件が、渡邊賢司 (応用班計画研究、NIMS) と海外の研究機関との h-BN 結晶提供に関する共同研究である。何故 h-BN 結晶が重要かという点、h-BN は原子面として完璧に平坦かつ不活性であるので、h-BN を基板とし、その上に原子層物質を載せることで、そのほかの SiO₂ や銅などの基板よりはるかに良い結果が得られるからである。例えばグラフェンの電子移動度は、h-BN 基板のほうが SiO₂ 基板より値が 10 倍以上大きく、得られる結果が顕著に違う。高圧合成で得られた大きな h-BN 結晶は、世界でまだ渡邊 (と共同研究者の谷口) だけが作製可能であり、しかも希望する研究者に無条件に近い形で供給されている。そのため、原子層科学で Nature, Science などの雑誌に発表される原子層物質の論文は、ほぼ標準試料として h-BN 基板が使われていて、渡邊・谷口が共著者となっている。

- 領域内の共同研究のネットワーク 83 件



(左図) 班間の共同研究。ループは班内の共同研究。外部は、外国及び領域外を指す。



(右図) 計画研究と公募研究間の共同研究。

図に、渡邊と海外の共同研究契約 75 件を除いた 83 件の、計画研究間および外部とのネットワークを示した (1つの共同研究で3つ以上の班にまたがるものがあるので各図で合計が 83 件以上ある。) また、右図は計画研究と公募研究および外部との共同研究の件数である。この図からわかることは、(1) 4 つの班とも外部との共同研究が多い。これは単純に外部の組織の数が非常に多いことによる。(2) 3 つの実験班は、班の構成員と同数程度の共同研究を班の内外部と推進している。(3) ほぼすべての公募研究は、1 つ以上の共同研究を実行している。(これは公募研究の条件として、計画研究との共同研究の可能性を出してもらったことによる。)(4) 公募研究間、また物性班以外の 3 つの班内における共同研究も活発に行われている。(5) 国際共同研究 101 件全体で、下記の 19 か国との共同研究がおこなわれている。h-BN 結晶提供 75 件を除いても、国際共同研究が 26 件ある。ドイツ、台湾、アメリカ、中国、韓国、シンガポール、スイス、イギリス、フランス、イタリア、スペイン、オランダ、オーストリア、オーストラリア、カナダ、ロシア、サウジアラビア、ベルギー、イスラエル

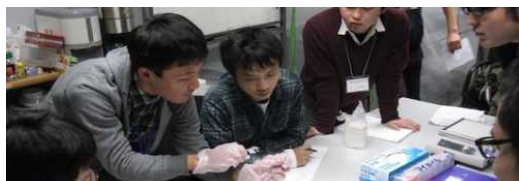
7. 若手研究者の育成に係る取組状況（1 ページ程度）

領域内の若手研究者の育成に係る取組状況について記述してください。

原子層科学では若手研究者育成に係る取組として、実験や理論に関する各種講習会を開催している。これらは、物理、化学、工学に広い分野にわたる領域研究者間の知識交換にも非常に役に立っている。各種講習会は一般にも公開して領域外からの参加をいただいております、社会貢献の一部にもなっている。（下記カッコ内は講習会主催者）

1. 原子層作製講習会：2013.12.4-5 東京大学（町田）、

2014.11.7 東京大学（町田）：単結晶グラファイトからグラフェンをスコッチテープで剥離し、リソグラフィーで電極を付けデバイスを作るという講習会である。実験室レベルでの原子層デバイスの作製では、このスコッチテープ法が現在も主流である。多くの若い研究者が実際に体験でき、大変好評であった。好評につき2回目も開催した。



グラフェンの剥離し電極を付ける

2. 第一原理電子構造計算講習会：2014.2.27-28 東京工業大学（齋藤晋）

：本講習会は、Quantum Espresso という第一原理エネルギーバンド計算プログラムを使って原子層物質のエネルギーバンドを計算する講習会である。実験の研究者もバンド計算ができるようになった。



スクリーンに計算結果を表示して完成写真

3. グラフェンミニ講演会：2014.2.19 名古屋大学（楠）

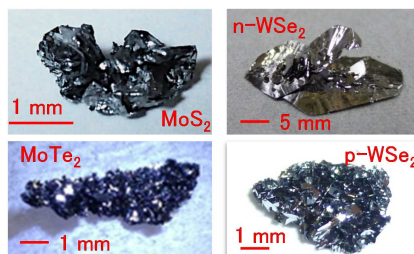
：この講演会では、CVD 法など各種原子層合成法の講習会を行った。ミニ講演会とサンプル展示交流会、研究室見学会も行い、外部の企業や研究所からの多くの参加があったことから、大きな社会貢献となった。



サンプル展示交流会の様子

4. カルコゲナイド結晶成長講習会：2014.8.7 東京大学（上野）

：研究の進展が著しいカルコゲナイド系層状物質の結晶成長に関して、基本から学ぶ講習会である。試料購入から蒸気圧の高い試料を石英アンブルに真空封入する方法等に関して、動画を交えた説明があった。



バルク層状結晶（講演資料より）。

5. 新量子相レクチャーシリーズ：2015.1.27-28 東京大学・物性研（長田）

：原子層全体会議に合わせて、新学術領域外で活躍の岩佐先生、江澤先生をお招きし、実験・理論の原子層関連の最新の成果を発表いただいた。領域内外から多数の参加者があり、活発な質疑応答がなされた。



レクチャーの様子。若手だけでなく多くの参加者があった。

6. グラフェン道場：2015.2.16-19 東北大（越野）

この講習会は、2日間にわたり冬の学校形式で行い、原子層科学の物理理論でわかりにくいところを集中講義し、演習も行った。特に、留学生向けに英語のクラスも併設した。懇親会では参加者に自分の研究テーマの紹介などもしてもらい、若手研究者間の交流も行われた。



講義だけでなく、演習も行った。

8. 研究費の使用状況（設備の有効活用、研究費の効果的使用を含む）（1ページ程度）

領域研究を行う上で設備等（研究領域内で共有する設備・装置の購入・開発・運用・実験資料・資材の提供など）の活用状況や研究費の効果的使用について総括班研究課題の活動状況と併せて記述してください。

1. 総括班の研究費：総括班では、新学術領域のWebサーバーを購入し、広報活動、文書サーバー、領域内連絡などに非常に効率的に利用している。大きな実験設備はすべて計画研究で購入している。博士研究員の雇用に関しては、多くの要望があることを踏まえて、総括班で博士研究員を一括して雇用し適切に配置することで、効果的な研究費使用を試みた。一方で、総括班の予算が削減されて配分された場合に、人件費を削減することはできない、といった問題点が発生した。ニューズレターや独自に発行した中間報告書（日本語280頁、英語170頁）はすべてPDF形式にして提供し、Web上からDownloadできるようにした。昨今のインターネットが普及した状況下では、400程度のダウンロード数は1ヶ月で達成できた。Webサーバーではダウンロード統計を取っていて、最もダウンロードされた文書は、2ヶ月で1000回以上ダウンロードされるなど、印刷物よりもはるかに影響力が高い。また本新学術領域は、FacebookやGoogle Formなど比較的若い人が利用する無料の手段を使って情報公開を行っており、一般市民の目に留まることが多い。以下、計画研究で購入した主な大型設備について運用状況を説明する。

2. 合成班の研究費の使用状況：初年度（25年度）に合成班に重点配分された予算により、グラフェンをはじめとする原子膜合成研究が可能になり、他の計画研究に試料を提供することで、有効な運用ができた。高品質グラフェン成長のため、H25年度に高真空赤外線加熱炉（写真）を導入した。この炉の導入の結果、5×5 mm²サイズの単結晶グラフェン試料を領域内に広く提供できるようになった。（楠）



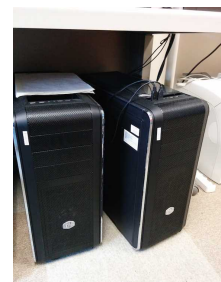
3. 物性班の研究費の使用状況：平成26年度に研究費の重点配分を受けて、大型設備の導入・整備を行った。まずグラフェンの磁場中の物性を明らかにするために、現有装置を上回る強磁場を発生する15T超伝導磁石（写真）を平成26年度に東大生産研に共用設備として導入した。これにより従来観測困難であった量子ホール現象の実験が可能となった。またフォスフォレンやモット絶縁体NiGa₂S₄などの評価を行う必要性から、顕微ラマン分光装置を平成26年度に東大物性研に導入した。角度分解光電子分光(ARPES)については、原子層物質におけるスピン軌道相互作用の評価のために、VLEED装備のスピン分解ARPES装置を構成し、エネルギー分解能6 meVを達成した。



4. 応用班の研究費の使用状況：応用班は、平成27年度に研究費の重点配分としているが、成長系及び測定系に関しては、研究期間の早い時期に導入・整備を行った。様々な原子層物質の結晶成長を行うため、バルク単結晶成長用電気炉（写真）及びCVD薄膜成長用電気炉を導入した。バルク単結晶成長用電気炉は3ゾーン型、各ゾーン最高1200°C加熱が可能であり、2式導入したことにより、複数のカルコゲナイド系層状物質単結晶成長を同時に行うことが可能となった。これまでに10種類以上の層状化合物単結晶成長に成功し試料提供を行った。



5. 理論班の研究費の使用状況：平成26年度に原子層薄膜、原子層複合系の電子構造の計算及び構造計算を目的として数値計算サーバー（CPU: Intel Xeon E5-2680v3 (2.5G/TB3.3GHz, 12core×2) 2台を購入し東北大学に配備した（写真）。平成26年度よりグラフェン、遷移金属カルコゲナイドを始めとする原子層薄膜の電子構造計算、及び磁場中のスペクトル及び電気伝導の計算が行われていて、計算結果は実験との共同研究の解析に利用されている。



9. 総括班評価者による評価（2ページ程度）

総括班評価者による評価体制や研究領域に対する評価コメントを記述してください。

【本新学術領域の設置趣旨と目標】

2010年ノーベル物理学賞の対象となったガイムとノヴォセロフによるグラフェン（単原子層グラファイト）の創成とそこで実現されるディラック電子など興味深い物理の展開を契機として、数原子層以下の「原子層」系の開発研究がさまざまな物質を対象として世界的に急激な発展を示している。本領域はわが国のこの分野の実験・理論研究者を結集して、原子層科学の格段の発展を期するものである。海外におけるこの新興分野の近年の活動を見る時、時機を逸せず本領域が2013年に立ち上がったことは我が国の物性科学にとっても幸いであった。

原子層の研究は基礎的科学として、また応用研究・実用化研究として大きな注目を集め、EU、韓国、アメリカ、中国、シンガポール等では国家的プロジェクトが推進している。特に、EUのGraphene Flagship 10億ユーロ（約1,200億円）や英国、韓国、シンガポールの100億円を超える大きな研究プロジェクトが現在動いていて、物理、化学、材料科学、電子工学等、多様な分野から多くの研究者が参加した研究が爆発的な勢いで進められている。2010年ごろから原子層科学に関する研究は、炭素原子からなるグラフェン以外の各種原子層物質の開拓にまで発展し、新たな原子層物質の研究分野が創製されてきている。このような世界の趨勢の中で、原子層物質の研究に関しては、日本は相対的にアクティビティが低く、世界各国の研究現状からは遅れをとっている。このような現状は、日本が炭素ナノチューブ等のナノ炭素の科学研究で世界をリードしてきた今までの関連分野の状況とは対照的であり、EU他からも、日本の研究の活性化への期待が寄せられていた。この中で、原子層物質の日本での包括的プロジェクトとして本新学術領域「原子層科学」は2013年にスタートした。日本では、原子層物質の関連分野では従来より裾野の広い基礎研究が物理、化学、材料科学等の分野で行われてきており、このような高い日本の学術研究のポテンシャルの上に立った本プロジェクトは、今まで遅れをとっていた研究を急速に前進させるとともに、原子層科学の分野で日本がリーダーシップをとる重要なスタートと評価されるものである。

【総括班評価者による評価体制】

総括班評価者は、本領域の研究成果発表会や各計画班の研究会等に可能な限り出席し、研究の進捗状況を把握するとともに、総括班会議において領域運営や成果発信の在り方に関して助言を行っている。領域運営に係る総括班メンバー間のメールのやりとりは評価担当者にも同報されており、リアルタイムでの状況把握に役立っている。

【研究成果・領域運営等に関する評価コメント】

本領域は、理論、化学合成、物理測定、応用展開、など多様なバックグラウンドの研究者を結集している。本プロジェクトの成否は、それらが上手く噛み合い有効な協力体制を築く

ことにかかっている。本プロジェクトでは(1)原子層の合成法の探索（化学、工学）、(2)原子層固有の物性の探求（物理、工学）、(3)原子層デバイスへの応用（工学、物理）、(4)原子層電子状態の理論の構築（物理、化学）の4つの分野を設定し、この4つの分野を有機的に連携させることにより、原子層物質の設計と物性探索を包括的に進めている。このような研究組織は、現状において我が国の関連研究者の持つポテンシャルを最大限に引き出し得るものと認められる。担当する計画班、公募班の研究者のアクティビティも高く、国際的に評価されている。年2回開催される全体会議は既に4回を数え、積極的に分野間交流を促す会議のプログラム編成により、異分野間共同研究の萌芽が生まれ、そこからの興味ある成果も出つつある。その中でも特筆すべきものとして以下が挙げられる。(1)SiC 熱分解法によるミリメートルスケールの低欠陥単結晶グラフェン成長を実現とそれを用いた量子ホール測定や量子容量測定、(2)窒化ホウ素、遷移金属カルコゲナイド、シリセン、フォスフォリン等の新しい原子層物質の実験と理論による連携した研究等。優れた研究成果も出つつあり、Ca ドープによるグラフェンの電子状態を制御と電荷密度波形成、K ドープによる複数層 FeSe 原子層での 50K 超伝導の観測、グラフェンナノリボンからナノチューブの合成、赤外線フォノン誘起による層状物質の層間距離の縮小を第一原理計算で予測、シリセンの基盤電子構造解明、高い電気伝導性を持った3次元グラフェンの開発等が挙げられる。プロジェクトスタートから2年という時点での研究活動成果として、高く評価されるものである。

本領域ではまた、国内外との研究者やコミュニティとの対外的な交流の積極的に行い、裾野の広い研究の展開をしている。日本物理学会でのシンポジウム、日中韓でのシンポジウム(A3)、Indo-Japan Workshop、ナノチューブの国際会議(NT15)、NSF-Japan Workshop、EU-Japan Workshop（予定）等の開催を行っている。グローバルな研究展開を進めているものと高く評価され、この分野における我が国の存在感を高めているものと認められる。

領域内外の共同研究に関して、例えば原子層科学探求の基礎となるべき試料合成については、基礎物性の探求には剥離法による高品質単結晶片の処理法の開発、応用を見据えた研究には CVD や表面熱分解法による大面積試料の作製法の開発、が鍵となるが、本領域ではそれぞれの専門家が物理測定の研究者と協力して相互乗り入れて研究を進める体制が構築されている。領域発足から中間点までの活動では、個々の計画研究や公募研究の活動もさることながら、互いに異なる学識や技術を持つ領域メンバー間の相互理解と協力基盤の構築に努めたことが評価される。「原子層作製講習会」、「グラフェン道場」、「新量子相レクチャーシリーズ」などの活動は、領域内での技術ノウハウの共有や理論的基礎の学習など、若手研究者・大学院生にとって極めて有益な研鑽の場を提供している試みであり、他の新学術領域の手本となり得るものと評価できる。領域代表者のリーダーシップのもと、特に総括班メンバー間で頻繁にコミュニケーションがとられており、領域の運営は極めて良好である。

現在、プロジェクトは3年目となる。本領域の活動は総じて順調と認められるが、一方、海外では大規模な研究推進の動きも見られることから、本領域には我が国のこの分野の研究をいっそう牽引することが求められる。折返し地点から後半戦を迎える状況にあるが、プロジェクト内外での一層の交流、協力体制の強化を進めるとともに、得られつつある重要な研究成果を踏まえ、国際的な発信を更に積極的に進めることが期待される。

10. 今後の研究領域の推進方策（2ページ程度）

今後どのように領域研究を推進していく予定であるか、研究領域の推進方策について記述してください。また、領域研究を推進する上での問題点がある場合は、その問題点と今後の対応策についても記述してください。また、目標達成に向け、不足していると考えているスキルを有する研究者の公募研究での重点的な補充や国内外の研究者との連携による組織の強化についても記述してください。

原子層科学の発足後、新原子層物質の台頭により研究対象が一気に広がった。このため新学術領域研究も新原子層物質の合成を強化するなどの体制を作ってきた。今後の領域の推進方策として、以下の4点を進める。

1. 国際共同研究の推進：

(背景) 原子層科学を取り巻く研究は国際的であり、諸外国も共同研究によってプロジェクトの効率化を図るため、日本との共同研究の可能性を探る動きがすでに始まっている。2015年3月には米国NSF財団の調査団が来日し、また2015年10月にはEUのグラフェンフラグシップのメンバーが来日して東京で会議を行い（予定）、今後の共同研究推進を模索している。また、アジア各国（中国（A3）、韓国（A3）、台湾、香港、シンガポール）との交流も継続して行い、その中で新学術領域研究の推進に役立つ展開を考えている。

(問題点) h-BNの試料提供が広がるなか、ランニングコストを本新学術領域研究でサポートしていない。（渡邊は連携研究者として、研究分担者（塚越）に配分された予算を使って、h-BNの高品質化を研究している。）現在の共同研究の実績とそぐわない。また国際共同研究が個別に行われていて、領域全体にメリットがあるような体制になっていない。さらに、国際共同研究を積極的に進めるような研究予算がないので、個別の研究予算の中で試料のやり取りや理論の提供などを強いられ、共同研究の繋がりが強くないという問題点がある。

(推進方策) 現在進行中の国際共同研究の中から原子層科学全体の推進に必要なテーマを選び、総括班でサポートする体制をとる。またグラフェンフラグシップやA3シンポジウムを合わせ、4年度に新たに国際シンポジウムを開催し、より効率的な研究体制を考えていく。また平成27年度独立行政法人日本学術振興会年度計画にある、新しい国際共同研究加速基金などの予算に今後応募し、サポート体制の強化をはかる。

2. 新原子層物質合成、物性探索の強化策：

(背景) 発足時は、主にグラフェンの物性やデバイス作製を中心に考えており、新しい原子層物質への着手は、第3年度次にスタートする予定であった。しかしカルコゲナイド層状物質原子層の新規物性測定や、その他の新規原子層物質、特に半導体原子層、絶縁体原子層の合成や理論などについての研究が、この2年で世界的かつ矢継ぎ早に発生した。

(問題点) 研究項目以上の新しいテーマに取り組む必要がある一方で、研究組織が有限であり、すべ



原子層科学の推進方策の概念図

てに手を出していくのは難しい現状がある。

(推進方策) 第3年度次の研究公募においては、新規原子層物質に関して計画研究と共同研究可能なテーマを募り、弱い部分を強化していく必要がある。また、国内外の共同研究を通じて試料の提供を受け、物性測定や理論的な解析をするなど、試料合成なしの研究ルートの開拓も行う必要がある。

3. 複合原子層物質の設計：

(背景) 様々な新原子層物質が合成されると、それを積み重ねた複合原子層物質の設計と合成が必要になってきた。複合原子層物質の設計は、発足当時は主に理論で行われ、実際に合成に着手するのは第4年度次以降になると考えていた。しかし第2年度にはすでに英国のグループによって複合原子層が合成され、発光ダイオードを原子層物質で作るなど非常に早い展開で研究が進んでいる。この英国グループの複合原子層の積層は、機械的剥離法で行ったものと考えられ、金属、半導体、絶縁体の原子層積層を実現しており、急速に複合原子層の時代が到来していると言える。

(問題点) 原子層科学の領域では、複合原子層の理論的な設計も実験的な合成もされておらず、完全に出遅れた結果になっている。また世界の現状も、複合原子層を構成する個々の原子層も依然として合成に取り組んでいるところであり、高い結晶性を得た成果というわけではない。

(推進方策) 研究の進行展開が速い状況ではあるが、実用的な複合化手法が確立したわけでもなく、また理論的なサポートがあるわけでもない。ここは落ち着いて、領域内の共同研究によって、理論、実験の両面から複合原子層の設計とデバイス特性評価を行っていけばよいと考えている。次の公募研究では、複層原子層合成に挑戦するテーマを募る予定である。

4. 領域における若手育成、社会貢献：

(背景) 新学術領域研究を推進していくうえで大学院生による研究が非常に重要である。従来は、研究室で教育がなされ研究が進められてきたが、共同研究が活発に行われると大学院生は指導教員の専門ではない分野の知識も必要になってくる。それを直接指導する助教クラスの若手研究者も、異分野の共同研究を進めなければならない。また、企業でグラフェンなどの応用研究に着手することも増えてきたが、企業研究と原子層科学との接点がそれほど多くない。

(問題点) 異なる分野の知識を知る機会が少ない。共同研究が期待されたレベルでは進まない。若手が必要としているものが何であるかを十分に把握できない。異なる分野間のコミュニケーションがうまくできない、などの問題点がある。企業研究は具体的な目標を持っているが、秘密も多く交流が一方的になるきらいがある。

(推進方策) 従来進めてきた講習会を継続するにあたって、総括班主体でなく若手研究者主体になるような働きかけが必要である。年に2～3回、集中的な講習会、交流会を若手主催で開くことをサポートする必要がある。繰り返し開催することで、コミュニケーションの障壁を下げることを目標とする。また、短期間他の研究室で修業をするような制度も今後検討していきたい。企業や一般市民向けの公開講座も2015年度に開催予定であるが、単なる一方的な発信ではなく、社会の認識度や企業が望む課題の調査など、より深いレベルでの交流を進めていく。