

領域略称名：原子層
領域番号：2506

平成30年度科学研究費補助金「新学術領域研究
(研究領域提案型)」に係る事後評価報告書

「原子層科学」

(領域設定期間)

平成25年度～平成29年度

平成30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

1. 研究領域の目的及び概要	8
2. 研究領域の設定目的の達成度	10
3. 研究領域の研究推進時の問題点と当時の対応状況	13
4. 審査結果の所見及び中間評価の所見等で指摘を受けた事項への対応状況	14
5. 主な研究成果（発明及び特許を含む）	16
6. 研究成果の取りまとめ及び公表の状況（主な論文等一覧、ホームページ、公開発表等）	19
7. 研究組織（公募研究を含む。）と各研究項目の連携状況	24
8. 研究経費の使用状況（設備の有効活用、研究費の効果的使用を含む）	26
9. 当該学問分野及び関連学問分野への貢献度	30
10. 研究計画に参画した若手研究者の成長の状況	31
11. 総括班評価者による評価	32

研究組織 (総括：総括班, 計画：総括班以外の計画研究, 公募：公募研究)

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 総	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
Y00 支	15K21722 原子層物質の国際的提供 と共同研究の推進	平成 27 年度～ 平成 29 年度	齋藤 理一郎	東北大学・理学研究科・教授	11
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・未来材料・システム研究 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	大阪大学・理学研究科・教授	8
総括・支援・計画研究 計 6 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・准教授	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
A01 公	16H00895 単層ボロンシートの合成	平成 28 年度～ 平成 29 年度	近藤 剛弘	筑波大学・数物質系・准教授	1
A01 公	16H00901 ヘテロ MXene 積層構造の構築	平成 28 年度～ 平成 29 年度	大久保 將史	東京大学・大学院工学系研究科・准教授	1
A01 公	16H00909 ポルフィリンナノリボンの創製と物性評価	平成 28 年度～ 平成 29 年度	田中 隆行	京都大学大学院・理学研究科・助教	1
A01 公	16H00915 各種用途に適した酸化グラフェンおよびグラフェンの合成	平成 28 年度～ 平成 29 年度	仁科 勇太	岡山大学, 異分野融合先端研究コア, 准教授	7
A01 公	16H00917 原子薄膜デバイスに資する単結晶巨大グラフェンの創製と位置制御	平成 28 年度～ 平成 29 年度	吾郷 浩樹	九州大学・グローバルイノベーションセンター・教授	1
A01 公	16H00918 1 次元ヘテロエピタキシーによる面内複合原子層系の開拓	平成 28 年度～ 平成 29 年度	宮田 耕充	首都大学東京・理工学研究科・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・数理物質科学研究科・准教授	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
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・准教授	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	16H00896 折りたたみグラフェンを 利用した階段型磁場中の 二次元電子系の電気伝導 の研究	平成 28 年度～ 平成 29 年度	大塚 洋一	筑波大学・数理物質系・教授	1

A02 公	16H00897 原子層積層化により形成した超伝導システムの物性探索	平成 28 年度～ 平成 29 年度	神田 晶申	筑波大学・数理物質系・教授	1
A02 公	16H00899 窒化ホウ素を用いた高移動度グラフェン試料で発現される新しい量子伝導現象の観測	平成 28 年度～ 平成 29 年度	青木 伸之	千葉大学・大学院工学研究院・准教授	1
A02 公	16H00908 超高速分光による原子層物質の非平衡キャリアに関する研究	平成 28 年度～ 平成 29 年度	小山 剛史	名古屋大学・工学研究科・准教授	1
A02 公	16H00910 原子層人工ヘテロ構造における新規光物性と光学応用	平成 28 年度～ 平成 29 年度	松田 一成	京都大学・エネルギー理工学研究所・教授	1
A02 公	16H00911 偏光分解分光イメージングによる原子層局所形態・光物性相関の研究	平成 28 年度～ 平成 29 年度	宮内 雄平	京都大学・エネルギー理工学研究所・准教授	1
A02 公	16H00912 層状化合物における低振動数ラマンモードの測定	平成 28 年度～ 平成 29 年度	齊藤 結花	学習院大学・理学部・教授	1
A02 公	16H00913 層状物質の可変偏光・可変励起エネルギー光による高分解能角度分解光電子分光	平成 28 年度～ 平成 29 年度	田中 慎一郎	大阪大学・産業科学研究所・准教授	1
A02 公	16H00919 電界効果近接場分光による遷移金属カルコゲナイドの局所光物性解明と構造制御	平成 28 年度～ 平成 29 年度	柳 和宏	首都大学東京・理工学研究科・教授	1
A02 公	16H00923 高密度電界キャリアドーピングによる原子層物質の新機能探索	平成 28 年度～ 平成 29 年度	清水 直	国立研究開発法人理化学研究所・創発物性科学研究センター・研究員	1
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	26107513 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・准教授	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中心・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
A03 公	16H00894 原子層スタック型電界放射電子放出デバイス—放出機構解明と放出量増加への挑戦	平成 28 年度～ 平成 29 年度	小川 修一	東北大学・多元物質化学研究所・助教	1
A03 公	16H00905 HfS ₂ を用いた原子層厚ヘテロ接合による超低消費電力デバイス	平成 28 年度～ 平成 29 年度	宮本 恭幸	東京工業大学・工学院・教授	1
A03 公	16H00906 3 次元ナノ多孔質グラフェンのテラヘルツ応答と素子応用	平成 28 年度～ 平成 29 年度	河野 行雄	東京工業大学・科学技術創成研究院・准教授	7
A03 公	16H00921 複合原子膜積層系の液相形成と層間相互作用エンジニアリング	平成 28 年度～ 平成 29 年度	野内 亮	大阪府立大学・工学研究科・准教授	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
A04 公	16H00898 計算科学による原子層物 質のし物性デザインとデ バイス設計指針の提示	平成 28 年度～ 平成 29 年度	岡田 晋	筑波大学・数理物質科学研究科・教授	1
A04 公	16H00914 原子層炭素材料の化学吸 着・脱離制御の理論	平成 28 年度～ 平成 29 年度	草部 浩一	大阪大学・基礎工学研究科・准教授	1
A04 公	16H00916 「磁場を含んだ相対論的 強束縛近似法」による遷 移金属カルコゲナイド原 子層の設計	平成 28 年度～ 平成 29 年度	樋口 克彦	広島大学・先端物質化学研究所・准教 授	1
A04 公	16H00924 原子層における次元性と 対称性を用いた物質設計	平成 28 年度～ 平成 29 年度	是常 隆	東北大学・理学研究科・准教授	1
A04 公	16H00925 デバイス応用に向けた 2 次元材料の電子物性の理 論設計	平成 28 年度～ 平成 29 年度	宮本 良之	産業技術総合研究所・機能材料コンピ ュテーショナルデザイン研究センタ ー・チーム長	1
公募研究 計 54 件					

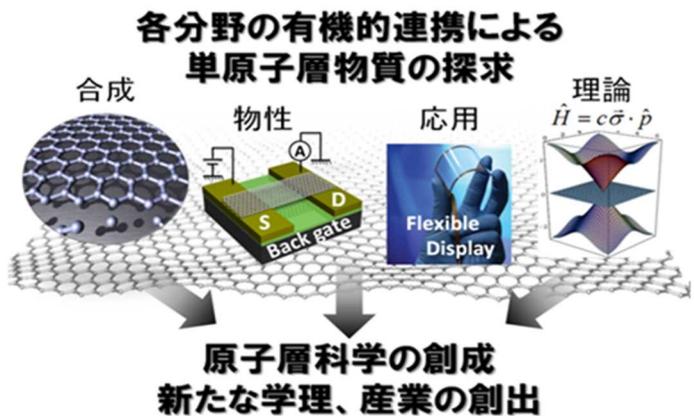
1. 研究領域の目的及び概要（2 ページ以内）

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 応募時に記述した研究目的（領域計画書より抜粋）

本学術領域研究「原子層科学」の目的は、グラフェン（グラファイトの1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、従来の半導体物質を凌駕する著しい性質をもつ。各国で大きなプロジェクトが始動するなど、原子層科学の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、本領域の創成を切望するものである。**研究目標**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**を行うことである。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**を目指すものである。



図：当時「原子層科学」の研究領域創成が急務だった。

1.2 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」であったか？

5年後に振り返ってみた、応募領域の着想に至った当時の経緯とねらいをまとめた。

1.2.1 (背景) 欧米でグラフェンの研究が、爆発的に推進した。これは、日本がカーボンナノチューブや半導体デバイスの世界でトップレベルの研究であることに対抗する政策であった。

1.2.2 (切迫感) 当時の日本は、セロハンテープで結晶を劈開して作る、ローテクのグラフェンの研究をあまり重要視していなかった。その結果、当時の世界の科学政策の潮流に乗り遅れた感じがあった。応募時の段階で、世界との大きなギャップに対して「このままでよいのか！」という切迫感が研究者にあった。

1.2.3 (グラフェンを超えて) また応募当時、グラフェンの研究は、ほぼ終わったと思われ（実際は違った）、世界では“Beyond graphene”（グラフェンを超えて）として半導体原子層物質や複合物質の探求が始められていた。しかし新物質原子層の研究レベルは、当時まだ低く、今日のような展開を予想できなかった。特に当時日本の半導体産業では、**半導体原子層物質や複合原子層物質が未来の半導体デバイスにつながる**という意識はなかった。『原子層科学』は、**応用まで見据えた、原子層物質全般の研究**という点で、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。

1.2.4 (境界領域) 原子層の研究者が、物理、化学、工学にわたって散在し、一同に議論する機会が無かった。『原子層科学』は、**分野を超えた境界領域の創成**という点で、我が国の学術水準の向上・強化を行う研究領域である。

1.3 応募時の研究の学術的背景と研究領域の強化戦略

領域を立ち上げた当時、どういう点を研究領域で強化することが必要か、について分析を行った。その結果、以下のような強みを利用し、共同研究を活性化し、本新学術領域の強化を図る戦略を考えた。

1.3.1 (h-BN 供給源) 当時セロハンテープの劈開で作られるグラフェンは、単結晶グラファイトから作られていた。その結果、劈開グラフェンは結晶性が良いために、容易に高い電気伝導特性を示した。その中で、室温でも量子効果を出すような、トップデータを出す米国、英国のグループは、グラフェンをのせる基板として、h-BN を使っていた。h-BN の劈開面は、原子レベルで理想的な平面であるため高い電子移動度（高い周波数でも電子が動作可能な条件）を得るからである。当時（そして今日も）、世界の h-BN の供給源は、NIMS の谷口・渡邊らが独占していた。この h-BN を領域内の研究者に供給することで、グラフェンだけでなくそのほかの原子層物質の基板として用いれば、原子層物質の特性のトップデータを得ることができ、領域の研究を推進することができる。

1.3.2 (日本独自の高い研究レベルを共有) h-BN のサンプル供給だけでなく、当時世界をリードする論文において、日本独自の研究が国際共同研究として注目されていたのが、電子顕微鏡技術である。究極に薄い2次元試料を観測する手段は、非常に限られる。炭素原子を原子レベルで構造を観測でき、同時に電子状態を測定できる電子顕微鏡技術は、産総研の飯島・末永・劉チームがほぼ独占していた。また高いエネルギー分解能を持つ角度分解光電子分光や、量子ナノデバイスを作り量子伝導を観測できる研究グループも日本に多かった。これらの研究グループに適切なサンプル供給をすることによって、領域内共同研究で研究を進めれば、世界をリードする研究をすることができる。

1.3.3 (若手研究者の採用) これらの世界でトップレベルの技術を持つ研究室は、大型予算を独自に獲得していたので、研究室あたりの予算規模が大きくない新学術領域に、新規参入するメリットがなかった。そこで、そのような大型予算獲得する研究室の若手研究者に領域にはいってもらい、各研究室の方針とは別に、独自に原子層物質開発に挑戦してもらうことにした。また、個性的な研究を行っている若手研究者も、公募研究で発掘し、サンプルを供給することで共同研究を進めることができる。

1.3.4 (サンプル供給体制の多様化と応用強化) 当時すでに、劈開試料による新しい量子現象の観測は行われていたが、応用として劈開試料を使うことは、大きさもコスト面からも不可能なことは明白であった。当時世界は、結晶性が低くても良いから大面積の原子層物質合成をめざし、CVD（化学気相蒸着）合成法や、ボトムアップ手法などが、試されていたが方針も用途も明確でなかった。そこで、量よりもいろいろな種類・品質の原子層を合成すること、また多様な試料をそれぞれの用途で応用すること、を意識してサンプル供給体制を作ることで、多くの組み合わせの共同研究が実現できる。

1.3.5 (学理の構築) 領域の目的に、様々な学問を融合した「学理の構築」と書くのであれば、学理を説明する、系統だった教科書のような成果の取りまとめを目指すことにした。研究者ごと、また年度ごとの成果をまとめるのではなく、成果を分類し、年度毎に教科書に内容を追加、修正していく形で、5年後の完成を目指す。内容の相互の参照や、索引をのせるだけでなく、共同研究単位ごとの成果、用語解説などを取り入れることで、若手だけでなくシニアも勉強することができる。

2. 研究領域の設定目的の達成度（3ページ以内）

研究期間内に何をどこまで明らかにしようとし、どの程度達成できたか、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の達成度合いについて、具体的に記述してください。必要に応じ、公募研究を含めた研究項目ごとの状況も記述してください。

2.1 研究期間内に何をどこまで明らかにしようとしたか？（領域計画書より抜粋）

研究領域の設定目的：本研究領域を4つの計画研究に分け、5年間の各計画研究の目的を以下のように設定した。また、総括班は計画研究間の共同研究を円滑に進めることを主な目的とした。

- (1) **A01 合成：**原子層複合系の新規合成手法（複数）を確立し、用途に合わせた原子層を作製する。特に大面積化、高品質化、複合原子層の合成法を実用レベルまで高める。
- (2) **A02 物性：**原子層構造の新規物性探索。特に、原子層の加工・制御法を確立し、本物質の特異な電子（質量が0の電子）状態をもたらす新規物性を探索・解明する。
- (3) **A03 応用：**原子層デバイスのプロセス技術を開発・展開する。六方晶窒化ホウ素原子層との複合原子層の作製技術を用いて積層構造の制御と高性能デバイスを実現する。
- (4) **A04 理論：**原子層系の接合構造・層端構造の理論設計、第一原理計算による電子状態評価を行い、新規物性の提案を行う。原子層物理における理論体系を構築する。

2.2 研究領域の対象・年次計画における達成度

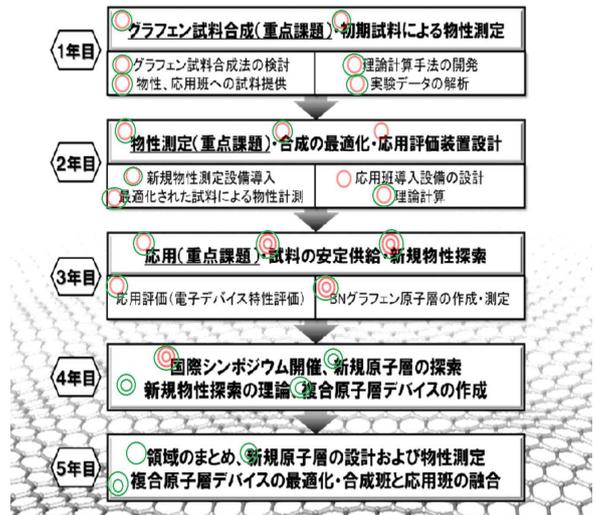
2.2.1 設定した研究対象（領域計画書より抜粋）：

各計画研究が設定した研究対象は、(1) グラフェンの試料合成法を確立、(2) 合成試料の物性評価と新物性を探索、(3) 合成試料によるデバイスを作製、(4) 原子層科学の理論的体系を構築、である。

2.2.2 領域の年度毎の設定目的と達成度：

申請時の年度毎の設定目的は、右図に示す通りである。図の赤丸は領域計画書の各年度の計画に対して、「中間報告時に」達成された項目を（○計画年次に達成、◎計画年次より以前に達成）を示す。このように中間審査の段階では、当初の大半が計画年次に達成した。また緑丸は、中間審査後に達成された項目である。緑丸は、ほとんど◎であり、計画年次より以前に達成した。さらに赤丸の上に緑丸がついているものは、中間発表までに達成しているが、さらに当初の設定目的以上の達成度を得たものである。

一方、中間審査時にすでに原子層物質に関する研究が多様な新規物質におよんでいる状況を考慮して、後半の研究計画として次のような追加方針をたてた。(1) すべての新規物質の探求はできないので、探求する物質を限定する。(2) オリジナリティの高い物質を合成する。(3) 共同研究による研究の加速を促し、複合原子層デバイスのプロトタイプを作る。(4) 非常に高品質な原子層物質を用いた精密物性測定を行う。(5) 新規物質に共通した、原子層の学理といえる普遍的な理論を構築する。(6) 原子層の応用に関しても、現在手にできるもので何ができるか、日本のオリジナリティを主張できるものを研究する。このような追加方針にしたがって、後半の公募研究の採択を行った。



図：領域計画書の年度目標。赤丸は中間審査時の達成度。緑丸は、後半の活動で達成された達成度（○計画年次に達成、◎計画年次より以前に達成）。赤丸+緑丸は当初の設定目的以上の達成した計画を示す。

2.3 各計画研究（公募研究）の具体的な設定目的と達成度、根拠となるハイライト。

計画研究の具体的な設定目的とその達成度を、(達成)目的の達成、(+ α)設定目的以上の達成、の形で示す。また達成度を示す根拠となるハイライトを（◎：理由）の形で示す。

2.3.1 合成班の設定目的と達成度（◎：共同研究論文総数499件のうち合成班主体241件（48%））

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。班内合成研究者間での徹底した討論を通し、高品質化・高機能化の推進を実現するとともに、予想を超えた多くの共同研究が達成された。

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

齊木は、グラフェン成長のその場実時間観察に成功し、グラフェン核形成の重要な知見を得た(達成)。

野田は、らせん状銅箔に大面積・短時間で、実用化に向けた良質グラフェン連続膜合成を実現した(達成)。

丸山は、アルコール CVD で mm サイズの高品質単結晶グラフェン、AB 積層 2 層グラフェンを合成した(達成)。

吾郷(公募)は、Cu(111)上に 10cm 平方の高品質（4000 cm^2/Vs 以上の移動度）グラフェンを合成した(+ α)。

北浦は、h-BN 上にエピタキシャルに WS_2 を成長し、先鋭な発光スペクトル(高品質の証拠)を観測した(+ α)。

(2) SiC 熱分解法によるウェーハサイズの大面積化（◎：基板からの分離方法（急冷法）の開発）

楠は、SiC 熱分解法によりセンチメートルサイズの低欠陥単結晶グラフェン成長を実現した(達成)。また、グラフェンの負の熱膨張係数に着目した急冷法を開発し、グラフェンの基板からの分離化に成功した(+ α)。

(3) 化学剥離法による酸化グラフェン（GO）の展開（◎：高機能化、◎：大量生産化）

齊木は、GO を h-BN 上でメタンプラズマ照射することで 4000 cm^2/Vs 以上の高移動度を得た(+ α)。

(4) 有機合成法によるグラフェンリボンの化学合成法（◎：有機化学のブレークスルー）

依光は、有機化学合成法により巨大平面分子の周辺修飾によりグラフェン様分子を創出した(達成)。また、グラフェン様分子の修飾原子により、近赤外領域の吸収が著しく増強（高機能化）した (+ α)。

2.3.2 物性班の設定目的と達成度（◎：バレーホール効果、原子層物質超伝導の観測）

各種原子層物質の量子伝導測定および原子像観察・光電子分光を行い、新奇な物性現象の探索と解明を行うのが設定目的である。当初の予想を超える新物質・新現象が現れ、当初の達成点をはるかに超える成果まで達成した。設定目的に含まれない光物性の分野も、公募研究によって、当初設定以上に達成した。

(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（◎：バレーホール効果の観測）

h-BN 結晶が安定供給されるようになり、高移動度のグラフェンを用いる精密物性実験が画期的に進展した。

町田は、高移動度グラフェン中を電子が散乱されず運動する軌道を走査ゲート顕微鏡法で可視化した(達成)。

山本は、2 層グラフェンを用いてバレーホール効果を観測した(達成)。グラフェンにおけるトポロジカル物性やバレートロンクスへの大きな波及効果となった(+ α)。

八木は、h-BN 上多層グラフェンの量子振動から層数による電子構造の微妙な差異を明確に観測した(達成)。

(2) 新しい原子層物質の探索と物性物理の開拓（◎：当初になかった新規原子層物質の物性開拓）

従来のグラフェンや TMD に加え、研究期間内に新奇原子層が登場し、それらに関する研究を達成した。

長田は、新奇原子層半導体である黒リンや原子層モット絶縁体である NiGa_2S_4 の電界効果を観測した(+ α)。

町田は、各種原子層のヘテロ構造の実験で超伝導接合や磁気トンネル接合の物理を展開した(+ α)。

(3) ミクロプローブ手法による物性発現機構の微視的同一と理解（◎：50K 級の原子層超伝導）

劉は、原子分解能を有する透過型電子顕微鏡を武器に、グラフェンの成長様式を解明した(達成)。

菅原は、高エネルギー分解能 (6 meV) のスピン分解光電子分光装置を開発し(達成)。特に電子濃度制御により少数層の FeSe 原子層が 50K 級の高温超伝導を示すことを示し、高温超伝導発現に関する知見を得た(+ α)。

2.3.3 応用班の設定目的と達成度 (◎：複層原子層デバイスの実現、オリジナリティの高い応用)

原子層デバイスを作りデバイスの動作原理を理解し応用に展開することが設定目的である。当初の達成点をはるかに超えた新規2次元結晶のデバイス化及び応用展開が達成された。また応用班は新規原子層物質の合成にも貢献し、他班の達成点を後押しした。公募研究による共同研究の広がりにより予想以上の成果を達成した。

(1) 原子層膜の複層化技術の確立 (◎：ゼロからの複層化技術の模索と実現)

長汐、塚越、上野、渡邊、谷口は、2次元結晶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ピンポイント・バブルフリー転写を確立した(達成)。講習会を通して複層化技術を広めた(+α)。

(2) 新規原子層材料の結晶成長からデバイス化 (◎：新原子層物質デバイス動作を実現)

上野は、各種新規原子層物質のバルク単結晶やCVD法による原子層を合成し、共同研究に貢献した(達成)。

塚越はFETの形成と動作特性測定を行った(達成)。またラマン分光では理論班の齋藤理と共同で解析し論文を発表するなど、新学術の枠組みを最大限利用した(+α)。

秋田(公募)は、光駆動、光検出のグラフェン機械振動子(NEMS)の非線形振動制御を実現した(+α)。

宮本、長汐、上野は、トンネル現象を用いた2次元トンネルFET動作の実証に成功した(+α)。

(3) 原子層膜間及び絶縁体/原子層間の相互作用の理解 (◎：デバイスの限界を見極めた)

長汐は、2層グラフェンデバイスにおいてオフ状態でも電流が流れる問題を解決した。具体的にはh-BNと2層グラフェンの複層化デバイスを作り、不純物準位密度を激減、オフ電流値を計測限界以下に低減した(+α)。

(4) 応用展開 (◎：有機LEDの革新的応用、グラフェンのTHz技術応用に一手)

長谷川は、グラフェン透明電極を有機LED(OLED)へ応用し、発光輝度の著しい向上に成功した(+α)。

河野(公募)は、ナノチューブ膜を用いた、折れ曲がる全方位テラヘルツセンサーの実証に成功した(+α)。

2.3.4 理論班の設定目的と達成度 (◎：国際共同研究を含む波及効果の大きい理論)

原子層物質の学理を構築すること、また未知の実験結果を理論的に説明することが設定目的である。六方晶窒化ホウ素(h-BN)、遷移金属カルコゲナイド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われ、新規共同研究が実現し、研究目標を達成した。さらに、国際共同研究による大きな波及効果があった。

(1) 複合原子層の物性理論の構築 (◎：世界から注目、国際共同研究へ展開)

越野は、複合原子層の電子状態を記述する理論を確立した(達成)。一連の理論はモアレ複合原子層の基本モデルになり、多くの理論、実験研究が追従するなど、大きな波及効果をもたらした(+α)。2013年以降相次いだ、磁場中の複合原子層でフラクタル効果の観測等、世界的から注目される国際共同研究に参画した(+α)。

安藤は、バレーホール効果に関する理論を構築し、物性班の発見において指導的な役割を果たした(達成)。

(2) 遷移金属カルコゲナイド原子膜におけるラマン分光論の確立 (◎：追従を許さないラマン分光の解析)

齋藤理は、原子層物質を評価するのに必ず使われるラマン分光の解析において、第一原理計算で共鳴ラマン分光を計算するプログラムを開発した(達成)。世界の追従を許さない理論的解析を行い、この分野で指導的な役割を果たした(+α)。また応用班や、国際共同研究で各種原子層のラマン分光の解析を数多く行った(達成)。

(3) 原子層物質における、各種物性の理論を展開 (◎：量子伝導、熱電効果でオリジナルが高い仕事)

若林は、2次元物質におけるトポロジカルな性質をフォトニック結晶に応用して、端を通る光を予言した(+α)。

齋藤晋、岡田(公募)らは、合成班、応用班との共同研究で、合成された新規原子層物質の電子状態を第一原理計算によって求め、理論的解析に大きく貢献した(達成)。また圧力依存性など、未知の物性実験への予想も多く行った(+α)。

初貝は、原子層トポロジカル物質のチャーン数を計算し、量子伝導における特異な現象を解明した。(達成)

齋藤理は、低次元物質における熱電性能の増強効果における一般論を見出し、1993年に提案された低次元閉じ込め効果に関して、25年ぶりにその量子的効果を解明した(+α)。

3. 研究領域の研究推進時の問題点と当時の対応状況（1 ページ以内）

研究推進時に問題が生じた場合には、その問題点とそれを解決するために講じた対応策等について具体的に記述してください。また、組織変更を行った場合は、変更による効果についても記述してください。

3.1 共同研究の確立と総括班の役割

本新学術領域研究は、「応募時にすでに研究成果があり発展する組織」ではなかった。また、計画研究のメンバーは分野（物理、化学、工学）が異なれば、**発足時にお互いに名前さえ知らないレベル**であった。それぞれの専門分野においては、高い知識がある一方で、**異なった分野はそれぞれの専門分野の大学学部レベルの知識以下**である。このような状況で、共同研究を作るのは、当初から予想されていたが非常に困難であった。

（対策1：**各種講習会の開催**）全体会議では、お互いが理解できない個々の成果を発表するより、フリーディスカッションを重視し、何が共通の知識として必要かを洗い出した。その結果、皆が勉強したいことを各種講習会の形で提案して開催した。老いも若きも初心に帰った講習会は、大変好評で、外部からの一般参加を含めて計11回開催された。好評な講習会は、5年間で2-4回開催された。(1)原子層を劈開によって作ること（原子層作製講習会、4回）、(2) グラフェンや原子層物質の基礎的な物理を勉強すること（グラフェン道場、新量子相レクチャー、各1回）、(3) 原子層物質の電子状態を第一原理計算で計算すること（第一原理計算講習会、2回）、(4) グラフェンの合成装置や評価法を実際に見学してサンプルを手に取り扱う方法を学ぶこと（サンプル展示会、合成班研究会、各1回）。(5) 複層原子層作製方法を学ぶこと（複層原子層講習会）、など若手を中心に提案があり、これらが原子層科学の中の人間関係の構築にも役にたった。

3.2 総括班牙算が30%カット

採択時に、総括班牙算が30%カットされたことが、領域の運営に大きな変更を余儀なくされた。5年間の領域の展開を考えて、有効に博士研究員を配置するために総括班で5名雇用することになっていたが、この人件費を減らすことができないので、総括班として領域を推進するための予算が非常に限られる結果になった。

（対策2：**各種節約と新しい方法**）新学術領域が立ち上がると、封筒の印刷やニュースレター、年度報告の印刷などにお金をかける場合が多いが、印刷物はすべて電子化したものにすることにした。印刷物は、見栄えは良いが(1)配布先が限られること、(2)見たあとは、ほとんどがそのまま廃棄されること、を考慮して pdf で配布することにした。pdf だと、(a)量やカラー印刷の制限がない、(b)誰でもダウンロードでき、(c)読んだあとも保存される。などの利点がある。さらに、インターネットを積極的に利用した。特に後半の2年間は、Facebook による研究成果の解説を毎週行うことにした。この解説も、分野を超えて、若い人に読んでもらうために、若手を中心に Facebook 編集委員会を構成し、2人のレフリーと領域代表の3人で、読みにくい記事を直す作業を発表1ヶ月前に行った。その結果、累計10万件のアクセスが内外からあった。また、国際会議の開催も総括班が主催者として開催する会議として行い、領域からはあまりお金を出さない形にした。領域代表や総括班が毎年開催される国際会議の主催者であったり、学術振興会の日本-インドなどの二国間の会議の代表者であったので、原子層科学の活動として国際シンポジウムを別予算で開催することができた。

4. 審査結果の所見及び中間評価の所見等で指摘を受けた事項への対応状況（2ページ以内）

審査結果の所見及び中間評価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。

4.1 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

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、素子応用展開を探る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との意見があった。</u>本研究領域では、<u>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><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することが極めて重要である。</u></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。それぞれの指摘に対して以下のような対応を行った。当時を振り返って、5年後の展開がどうなっているかを予見するのは困難であったが、常識的といえる、王道の戦略が、特に新学術領域後半の大きな展開に有効にはたらいた。

4.1.1 世界的な大きなプロジェクトに対し、本研究領域は新規性や到達点を示せるか？

（対応状況）応募時の分析で説明した戦略をもとに、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新規性を示すことにした。その後、国際共同研究基金が創設され、その基金を利用して各種の共同研究が実現できた。また、本新学術の到達点は、構築した「学理」を示すことにした。EU、中国、韓国、インドなどと国際会議を開催するなど、世界における本新学術領域の存在感は、十分達成した。この結果、世界的に大きなプロジェクトと比較して、原子層科学は予算以上の結果を出した。

4.1.2 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？

（対応状況）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や配置にすること、(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。これに対し応用班は、もっと原点に戻って、グラフェン素子が従来の半導体デバイスと比べ何が原理的に違うか、を実験的に明確にする戦略を選んだ。結果的にこの戦略が問題解決に対し近道であった。その結果、追従を許さない高性能の素子応用を実現した。

4.1.3 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？

（対応状況）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。また、合成班から、2014年2月19日、合成班のミニ講演会・見学会を開催した。また、「サンプル提供計画」（Webに公開）を作ってもらい、何を、いつから、どこから、どのように提供するか、を示した。この提供計画にしたがって、共同研究の提案がしやすくなった。その結果、新学術の後半に飛躍的に共同研究の成果が増えた。

4.2 中間評価の所見等で指摘を受けた事項への対応状況

中間評価では、(抜粋)「本研究領域内外に多くの試料を提供し、国際的に存在感を高めている点は特に評価される。また、本研究領域発足後から活発な共同研究が遂行され、総括班を中心に情報発信、学会会議開催、アウトリーチ活動も精力的になされていることも高く評価される。したがって、期待どおりに研究が進展していると認められる。」と基本的に高い評価を得た。その結果中間評価では「A」の評価を受けた。

一方、下記について指摘を受けた。それぞれの指摘に対し、総括班を中心に対応を議論した。

4.2.1 「研究領域発足当初は、研究対象がグラフェン中心であったが、様々な原子層物質に多様化していく中で、それらが各論になっている部分も散見される。今後は研究期間終了時を見据えて、これまでの成果の厳密な評価と活用を、総括班を中心に議論し、研究領域全体として原子層科学の新たな学理の構築が図られることを期待する。」

(対応) 学理の構築をどのような形で示すか、を総括班で議論し、最終報告書では、中間報告書のような「各研究者の顔写真と成果の報告」のような各論をやめることにした。その代り最終報告書として、専門書のように章立てをして、各章の編集委員によって問題を整理し、共同研究の成果としての知見を分担執筆する、という形にした。この作業を最終年度に初めて着手すると、章間の横の関係などが無いハンドブック形式になってしまうので、まず第4年度に大枠を作って基礎的なことと、それまでの成果を2016年度報告書(353頁)として作成した。さらに最終年度には、この内容に修正、追加して最終報告書(720頁)を専門書という形で完成して、2018年2月にWeb公開した。この最終報告書は、PDF形式で、文献や引用された式、さらに索引もクリックするだけで、そのページに飛ぶことができる。ダウンロードは誰でも可能で、かつ「原子層科学の学理」を一から勉強することができる。この成果をもって原子層科学の新たな学理の構築を具体的な形で示した。

4.2.2 「一方、ポスドク雇用の人件費を総括班で一括して手当しているが、その有効性を検証しつつ、総括班の活動に支障を来さぬよう慎重な運用が望まれる。」

(対応) 申請当初、計画研究の多くのメンバーがPDの採用の提案して、収集がつかなかった。そこで、柔軟に対応するために総括班にPDを属することにした。具体的にはPDを各計画研究代表者と領域代表者の計5名に配属し、研究の他に領域の運営も手伝ってもらった。また、共同研究をするときも、常に総括班に属するPDということで、代表者から独立して共同研究ができる意味でも有効であった。総括班全体の予算を30%カットされたときは、どうしようか困ったが、いろいろ節約して運営してみると支障はなかった。5年間を終わって、やはりポスドク雇用は総括班で行うのが適当であり、有効であると考えている。

総括班の活動では、お金を使わなくてもいろいろなことができ、しかもそのほうが、研究費を有効に利用しているという実感をもつことができる。例えば、新学術領域が国際シンポジウムを開催すべきであるというルールは、国際会議が毎月のように開かれる今日では、単にお金を使う機会ぐらいの意味しかないように感じられる。メンバーの多くが国際会議の主催者として活動するなか、組織委員会の活動を原子層科学が最低限サポートし、原子層科学が中心に開催するぐらいで十分目的を果たすことができる。一方、本新学術領域が発足してから、新学術領域に割り当てられた、国際共同研究加速基金は、新学術領域の国際共同研究を新規に進めるうえでまさに必要な予算であり、原子層科学の推進に大変有効であった。

5. 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]

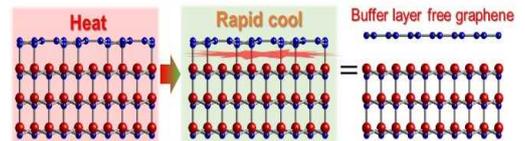
(3 ページ以内)

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。記述に当たっては、本研究課題により得られたものに厳に限ることとします。

5. 1 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. 急冷法 SiC 上自立グラフェン形成

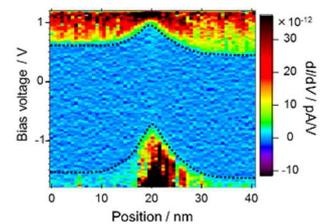
楠美智子 (A01)、J.Bao (中国) との国際共同研究 [Phys. Rev. Lett., **117**, 205501 (2016).] グラフェンと基板の熱膨張係数の違いを用いて、グラフェンを基板から分離する方法を開発した。各種グラフェン合成法が抱える、基板との強い相互作用の問題を解決し、大きな波及効果となった。(特願 2015-35117)



熱膨張の違いを利用し、急冷でグラフェンを基板から分離

・主要論文 2. 遷移金属ダイコルゲナイド (TMD) 面内ヘテロ接合界面

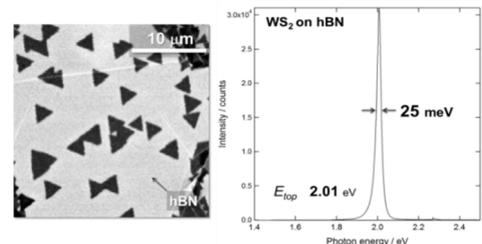
宮田耕充 (A01 公募)、渡邊賢司 (A03)、谷口尚 (A03 連携)、理科大、筑波大学との共同研究 [Sci. Rep., **6**, 31223 (2016).] 2つの遷移金属ダイコルゲナイド (TMD) を面内で接合した1次元の界面を合成した。STS で界面のポテンシャル障壁の観測した。面内原子層界面構造解明の学術的意義は大きい。



面内 TMD ヘテロ構造の界面電子状態

・主要論文 3. h-BN 上への TMD 直接成長

北浦良 (A01)、渡邊賢司 (A03)、NTT 物性基礎研との共同研究 [ACS Nano, **8**, 8273 (2014).] CVD 法により、h-BN を基板として、単層 WS₂ を直接成長させた。原材料の反応温度を最適化するために、3 連続電気炉を用いて、高い単結晶原子層 (三角形) が実現。非常にシャープな発光ピーク (25meV) は、高い結晶性を示している。



CVD 法による単結晶 WS₂/h-BN と高い結晶性を示す発光スペクトル

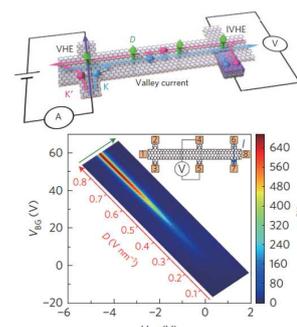
・その他の重要な成果：大面積・良質グラフェン合成技術の開発

齊木幸一朗 (A01) は、安価な酸化グラフェンを Cu の近傍に置きメタンプラズマ照射すると、著しい還元効果を示すことを発見した。これにより大量合成実現が可能になった [Nanotechnology, **29**, 245603 (2018)]。坂本良太 (A01 公募) は、液液界面合成法により、炭素-炭素共有結合生成を用いて単結晶グラフィジンを合成した [J. Am. Chem. Soc., **139**, 3145 (2017)]。依光英樹 (A01) 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様リボン分子を合成した。また、Yonsei 大学との国際共同研究により近赤外光吸収の増強を解明した [Chem. Sci., **8**, 189 (2017)].

5. 2 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. 2層グラフェンにおけるバレーホール効果の観測

山本倫久 (A02) と渡邊賢司・谷口尚 (A03) による共同研究 [Nat. Phys. **11**, 1032 (2015)]. 2層グラフェンに垂直電場を加えてギャップを開くと、K 点と K' 点のバレー (エネルギーバンドの底) で逆方向のバレー曲率 (電子の運動を記述する面の曲率) が発生するため、面内電場に直交する方向に、異なるバレーの電子が逆方向に動く「バレー流」が発生する。山本らはバレー流を逆バレーホール効果で電圧に変換して、バレーホール効果を観測した。本研究はグラ

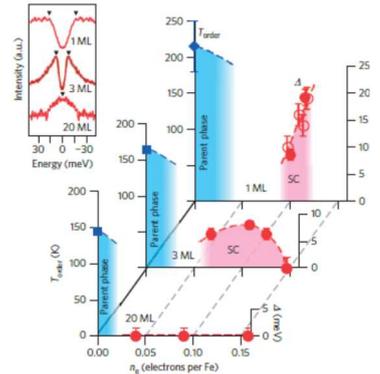


バレーホール効果の原理と非局所抵抗の測定結果

フェン系のトポロジカル伝導物性の端緒であると同時に、バレー自由度を情報担体として利用するバレートロンクス技術の基礎原理の実証であり、基礎・応用両面で大きな学術的意義を持つ。

・主要論文2. カリウム吸着による FeSe 原子層の高温超伝導の制御

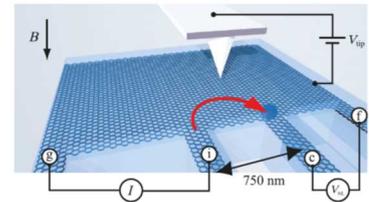
菅原克明 (A02) による基礎研究 [Nat. Mater. 14, 775 (2015)]. $T_c = 8\text{ K}$ の層状鉄系超伝導体 FeSe は SrTiO₃ 基板上的単原子層になると $T_c \sim 65\text{ K}$ の高温超伝導を示すが、系統的研究は進んでいなかった。菅原らは単層～少数層 FeSe 膜上にカリウム原子を吸着させることで電子濃度を系統的に制御する手法を考案し、角度分解光電子分光法で電子構造を確認しながら電子濃度・原子層数を変えて超伝導特性の測定を行い、系統的研究を成功させた。その結果、多層系でも高温超伝導 ($T_c < 48\text{ K}$) が現れること、臨界温度が層数減少と共に増大することを発見し、2次元高温超伝導機構に関する重要な知見を得た。



FeSe 超薄膜の超伝導相図

・主要論文3. グラフェンにおけるバリスティック電子軌道の実空間観測

町田友樹 (A02)、渡邊賢司・谷口尚 (A03) と英国ケンブリッジ大 M. R. Connolly の国際共同研究 [Appl. Phys. Lett. 107, 243102 (2015)]. 高移動度グラフェンでは、入射電子は垂直磁場下で散乱されずにバリスティック (弾道) 軌道上を運動し、軌道が検出電極に集中する (フォーカシング) と電極電位が変化する。電圧をかけたゲート探針を試料表面上で走査すれば、探針が電子軌道上に位置したとき軌道が乱されフォーカシング信号が変化する。町田らは走査プローブ顕微鏡技術を有する英国グループと協力して電子のフォーカシング軌道の可視化に初めて成功した。

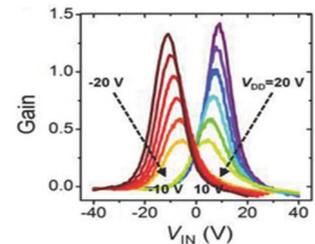
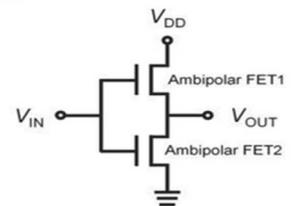


走査ゲート顕微鏡法の原理

5.3 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

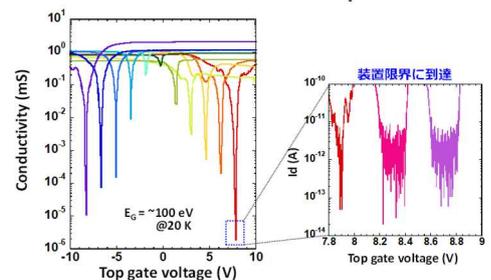
塚越一仁・上野啓司 (A03)、若林克法・齋藤理一郎 (A04) らによる共同研究 [Nano Lett., 156, 2720 (2016). Nano Lett., 15, 2067 (2015)., ACS Nano, 8, 3895 (2014). Phys. Rev. B, 91, 205415 (2015) (A04 と重複して掲載) . Nano Lett., 13, 3546 (2013). ACS Nano, 8, 12836 (2014).] 上野が成長させた MoTe₂ 結晶を塚越が単層化し未同定の振動モードを発見した。齋藤が理論的側面から解析し、未定振動モードの同定に成功した。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。さらに、MoS₂, WSe₂ の電子輸送特性に関しても、実験と理論の比較から、基板に存在する荷電不純物がデバイス動作の律速になっていることを見出した。この問題を解決し、最終的に、2次元半導体によるインバータ動作を世界に先駆け実証した。一連の論文は500を超える引用がある。



(上) インバータ回路の模式図、(下)動作の實現を示すグラフ。

・主要論文2. 2層グラフェンのh-BNとの複層化とギャップ形成

長汐晃輔・渡邊賢司・谷口尚 (A03) の共同研究 [ACS Appl. Mater. Interfaces, 10, 11732 (2018), 8, 27877 (2016), Sci. Rep., 5, 15789 (2015). 2D Mater., 2, 041002 (2015). ACS Nano, 9, 916 (2015)] high-k 酸化膜/2層グラフェン界面において、エネルギーギャップ内に $\sim 10^{13}\text{ cm}^{-2}$ もの界面準位が存在することを定量的に評価した。原子層絶縁体 h-BN は層がめくれるように絶縁破壊が進行すること、絶縁破壊電界に強い異方性が存在することなど h-BN 自身の物性を解明した。この知見を基に、h-BN とグラフェンの2次元ヘテロ FET 作成の複層化技術を確立した。この技術ではギャップ内準位の数を測定感度以下まで

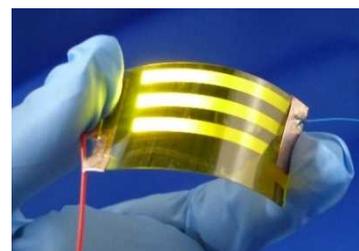


(左)伝導度のゲート電圧依存性。(右)伝導度が測定感度以下に低減。

低減し(前ページ図)、電流の on/off 比 (注: デバイスの電流が流れている on 状態と流れていない off 状態の電流比を on/off 比と呼ぶ。デバイスの性能を示す数値。) を現時点で最高値の 5×10^5 まで向上させた。今後の 2 次元ヘテロ界面デバイス応用に大きな波及効果がある。

・主要論文 3. グラフェン透明電極を利用したフレキシブル有機 EL 素子

長谷川雅考(A03)と企業のグラフェンの実用化共同研究 [Carbon, 82, 60 (2015). Jpn. J. Appl. Phys., 54, 095103 (2015). Carbon, 77, 823 (2014).] グラフェンを用いた有機 EL (エレクトロルミネッセンス、電界発光) 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、PEN 基板上グラフェン透明電極を用いた有機 EL の発光を実証した (右図)。最大で $8,000 \text{ cd/m}^2 @ 15 \text{ V}$ と輝度の格段の向上に成功した。更なる低抵抗化かつ大気中での長期安定化を、グラフェンへの紫外線照射と有機導電性インクの併用により達成した。本技術は企業へライセンス提供した。



グラフェン透明電極を用いたフレキシブル有機 EL 素子

5.4 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. モアレ複合原子層の物性理論

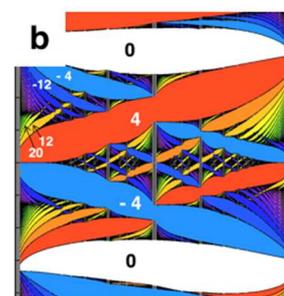
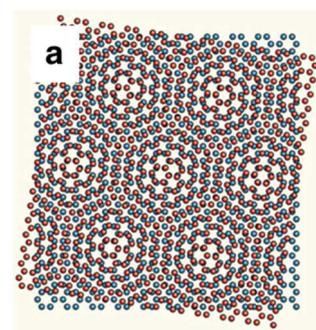
越野幹人 (A04)、ニューヨーク大学上海との共同研究 [Phys. Rev. B 96, 075311 (2017). New J. Phys. 17, 015014 (2015). Phys. Rev. B 90, 155406 (2014). Phys. Rev. B 87, 205404 (2013)] 異なる原子層を積層することで得られる、モアレ複合原子層 (右図(a)) の電子状態を解明した。近年グラフェン h-BN 系で、磁場下の電子状態が量子フラクタル (右図(b)) を示すことが発見され、また 2018 年には回転積層グラフェンでは 1.1K の超伝導が観測されるなど、モアレ複合原子層薄膜は当初の予想を超え世界中で爆発的に研究されるようになり、この理論の波及効果は非常に大きい。4 件の論文は計 200 件を超える引用がある。

・主要論文 2. 複合原子層における量子フラクタルの実現

越野幹人 (A04)、渡邊賢司 (A03)、谷口尚 (A03)、コロンビア大学、ハーバード大学、MIT、復旦大学、マックスプランク研究所 [Nano Lett. 17, 3576 (2017). Nano Lett. 16, 5053 (2016). Science 350, 1231 (2015)] グラフェンと h-BN のモアレ複合原子層に磁場を印加し、量子効果により生ずる電子状態のフラクタル (自己相似) スペクトルを国際共同研究で観測した。このスペクトルはホフスタッターの蝶と呼ばれ、1970 年代より理論的に予想されたが、40 年後に実験的に観測された。発足以前の 2013 年発表の論文 2 編とあわせて 1300 件を超える引用がある。実現には越野らによる理論と、渡邊・谷口による高品質 h-BN の供給が不可欠であった。

・主要論文 3. 遷移金属カルコゲナイド・黒リン原子層におけるラマン分光

齋藤理一郎 (A04)、塚越(A03)、上野(A03)、マサチューセッツ工科大との共同研究 [Nano Lett. 16, 2260 (2016). Phys. Rev. B 91, 205415 (2015). (A03 と重複して掲載), J. Amer. Chem. Soc. 137, 11892 (2015). Phys. Chem. Chem. Phys. 17, 14561 (2015).] 遷移金属カルコゲナイド原子層及び黒リン原子層のラマン分光を解析した。ラマン分光は物質の同定に広範に用いられる極めて強力な実験手法であり、この理論の確立により遷移金属カルコゲナイド系の物質評価法に確固たる基盤が与えられた。また応用班との共同でラマンスペクトルの同定、また大面積原子層の評価も行われた。4 件の論文は計 216 件の引用がある。



(a) モアレ複合原子層と (b) 量子フラクタルのイメージ

6. 研究成果の取りまとめ及び公表の状況（主な論文等一覧、ホームページ、公開発表等）（5 ページ以内）

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。記述に当たっては、本研究課題により得られたものに厳に限ることとします。

- 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。
- 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。
- 補助条件に定められたとおり、本研究課題に係り交付を受けて行った研究の成果であることを表示したもの（論文等の場合は謝辞に課題番号を含め記載したもの）について記載したものについては、冒頭に▲を付してください（前項と重複する場合は、「◎▲・・・」と記載してください。）。
- 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。

本研究課題全体の研究成果の公表の状況及び方法は、以下のとおりである。

6.1 領域のホームページ： (<http://flex.phys.tohoku.ac.jp/gensisou/>) ホームページの「研究成果」欄に、成果を分類して公表した。研究成果の内容は、発表論文（計 896 件 査読有 836 件、査読無 60 件）、著書・総説（67 件）、招待講演（総数 636 件、うち国際会議 409 件、国内会議 227 件）、社会貢献（66 件）、特許出願（17 件）で、発表年および計画研究（公募研究）ごとに分けられている。このページは 2023 年 3 月まで保存される。

6.2 中間報告書・最終報告書の作成： 2015 年 3 月に、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。また、2018 年 2 月に、最終報告書を教科書形式で(720 頁)まとめた。この結果はいずれも PDF として、上記ホームページからダウンロードできる。

6.3 主催シンポジウムなどの開催： 合計 15 件（うち国内開催 9 件、海外開催 6 件）

6.3.1 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）学会とともに共催した。主催者は NT15 の組織委員会であるが、組織委員会のトップ 3（篠原、齋藤、丸山）を含め組織委員の 2/3 が原子層科学のメンバーである。また原子層科学の研究者は全員 1 件以上発表した。組織の体制、発表の実態をみても、事実上の原子層科学主催の国際会議であるといえる。NT15 の参加者数は 765 名（うち日本から 440 名）であった。海外から 36 ヶ国 325 名の参加者があった。

6.3.2 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： 研究領域があった 5 年間、毎年アジア 3 か国（中国、韓国、日本）で持ち回りの原子層物質に関する A3 シンポジウムを開催した。領域代表の齋藤が議長（日本側主催者）として運営（日本での開催は 2 回、齋藤、吾郷（A01 公募）が主催者）した。また、総括班の若林は JSPS 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。いずれも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。

6.3.3 市民講座、講習会の実施： 市民講座として、2015 年 8 月 3 日に京都大学で市民講座を、また、2017 年 3 月 20 日に、名古屋大学でオープンレクチャーを実施した。その他、小中高、および一般向け出前授業として、合計 66 件開催されている。また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（別項）合計 11 回実施した。

6.3.4 その他、領域全体を説明する本の出版・TV 出演： 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。また合成班の斉木らが編著者となって、2017 年 3 月に「二次元物質の科学：グラフェンなどの分子シートが生み出す新世界」を化学同人に出版した。その他本の分担執筆、解説・総説記事が合計 65 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、また物性班の菅原も有望な若手として TV 出演した。

次ページ以下は計画研究・公募研究ごとの主な論文及び著書のリストである。

6.4 合成班（計画研究）計 186 件（査読有 172 件、査読無 14 件）

1. ▲S. Obata, M. Sato, K. Akada and K. Saiki, "High Degree Reduction and Restoration of Graphene Oxide on SiO₂ at low temperature via remote Cu-assisted Plasma Treatment", *Nanotech.* **29**, 245603 (10 pages) (2018). (査読有)
 2. ◎▲M. Okada, A. Kutana, Y. Kureishi, Y. Kobayashi, Y. Saito, T. Saito, K. Watanabe, T. Taniguchi, S. Gupta, Y. Miyata, B. I. Jacobson, H. Shinohara, and R. Kitaura, Direct and Indirect Interlayer Excitons in a van der Waals Heterostructure of hBN/WS₂/MoS₂/hBN, *ACS Nano*, **12**, 2498-2505 (2018). (査読有)
 3. ▲T. Taira, S. Obata, and K. Saiki, "Nucleation site in CVD graphene growth investigated by radiation-mode optical microscopy", *Appl. Phys. Express*, **10**, 55502 (4 pages) (2017). (4 pages) (査読有)
 4. ▲N. Fukui, W. Cha, D. Shimizu, J. Oh, *K. Furukawa, *H. Yorimitsu, *D. Kim, and *A. Osuka, "Highly planar diarylamine-fused porphyrins and their remarkably stable radical cations", *Chem. Sci.*, **8**, 189-199, (2017). (査読有)
 5. ▲Y. Nagai, A. Okawa, T. Minamide, K. Hasegawa, H. Sugime, and *S. Noda, "Ten-second epitaxy of Cu on repeatedly used sapphire for practical production of high-quality graphene" *ACS Omega*, **2**, 3354~3362 (2017). (査読有)
 6. ▲H. Shirae, K. Hasegawa, H. Sugime, E. Yi, R. M. Laine, and *S. Noda, "Catalyst nucleation and carbon nanotube growth from flame-synthesized Co-Al-O nanopowders at ten-second time scale" *Carbon*, **114**, 31~38 (2017). (査読有)
 7. ◎▲J. Bao, O. Yasui, W. Norimatsu, K. Matsuda and M. Kusunoki, "Sequential control of step-bunching during graphene growth on SiC (0001)", *Appl. Phys. Lett.* **109**, 081602 (2016). DOI: 10.1063/1.4961630
 8. ◎▲J. Bao, W. Norimatsu, H. Ito, and M. Kusunoki, "Synthesis of Freestanding Graphene on SiC by a Rapid-Cooling Technique", *Phys. Rev. Lett.* **117**, 205501 (2016).
 9. ▲X. Chen, R. Xiang, P. Zhao, H. An, T. Inoue, S. Chiashi, and *S. Maruyama, "Chemical vapor deposition growth of large single-crystal bernal-stacked bilayer graphene from ethanol" *Carbon* **107**, 852-856 (2016). (査読有)
 10. ▲K. Gao, N. Fukui, S. I. Jung, *H. Yorimitsu, *D. Kim, and *A. Osuka, "Pictet-Spengler Synthesis of Quinoline-Fused Porphyrins and Phenanthroline-Fused Diporphyrins", *Angew. Chem. Int. Ed.*, **55**, 13038-13042, (2016). (査読有)
 11. ▲X. Chen, P. Zhao, R. Xiang, S. Kim, J. H. Cha, S. Chiashi, and *S. Maruyama, "Chemical Vapor Deposition Growth of 5 mm Hexagonal Single-Crystal Graphene from Ethanol" *Carbon* **94**, 810-815 (2015). (査読有)
 12. ◎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 Hexagonal Boron Nitride, *ACS Nano* **8**, 8273-8277 (2014). (査読有)
- 国際雑誌論文の（査読有）総計 169 件。

書籍及び総説

1. ▲T. Terasawa and K. Saiki, "Graphene: Synthesis and Functionalization", Inorganic Nanosheets and Nanosheet-Based Materials, Springer, 2017, pp. 101-132. [ISBN 978-4-431-56494-2].
2. 丸山茂夫、「アルコール CVD」、エヌティーエス、カーボンナノチューブ・グラフェンの応用研究最前線、2016、pp.13-19.

6.5 合成班（公募研究）計 125 件（査読有 114 件、査読無 11 件）

1. ▲K. Ueta, M. Fukuda, G. Kim, S. Shimizu, *T. Tanaka, D. Kim and A. Osuka, "The First Silicon(IV) Corrole Complexes and Formation of μ -Oxo Dimer" *Chem. Eur. J.* **24**, 7637-7646 (2018) (査読有)
2. ▲N. Morimoto, H. Suzuki, Y. Takeuchi, S. Kawaguchi, M. Kunisu, C. W. Bielawski, Y. Nishina, "Real-Time, in Situ Monitoring of the Oxidation of Graphite: Lessons Learned", *Chem. Mater.* **29**, 2150-2156 (2017). (査読有)
3. ◎▲R. Matsuoka, *R. Sakamoto, K. Nagashio, *H. Nishihara (他3名) "Crystalline Graphdiyne Nanosheets Produced at a Gas/Liquid or Liquid/Liquid Interface", *J. Am. Chem. Soc.*, **139**, 3145-3152 (2017). (査読有)
4. ▲H. Nishino, S. Ito, J. Nakamura, H. Hosono, T. Kondo (他4名), "Formation Mechanism of Boron-Based Nanosheet through the Reaction of MgB₂ with Water", *J. Phys. Chem. C* **121**, 10587-10593 (2017). (査読有)
5. ◎▲C. Ogata, T. Taniguchi, Y. Matsumoto (他4名), "All-graphene oxide flexible solid-state supercapacitors with enhanced electrochemical performance", *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **9**, 26151-26160 (2017). (査読有)
6. ▲S. Kajiyama, L. Szabova, Y. Tateyama, M. Okubo, A. Yamada (他4名), "Enhanced Li-ion accessibility in MXene titanium carbide by steric chloride termination" *Adv. Energy Mater.* **7**, 1601873 (2017). (査読有)
7. ◎▲Y. Kobayashi, S. Yoshida, R. Sakurada, K. Takashima, T. Yamamoto, T. Saito, S. Konabe, T. Taniguchi, K. Watanabe, Y. Maniwa, O. Takeuchi, H. Shigekawa, Y. Miyata, "Modulation of electrical potential and conductivity in an atomic-layer semiconductor heterojunction", *Sci. Rep.*, **6**, 31223-1-8 (2016). (査読有)
8. ▲D. Ding, P. S. Fernandez, H. Hibino, H. Ago, "Spatially-controlled nucleation of single-crystal graphene on Cu assisted by stacked Ni", *ACS Nano*, **10**, 11196-11204 (2016) (査読有)

国際雑誌論文（査読有）の総計 114 件。

6.6 物性班 (計画研究) 計 77 件 (査読有 77 件、査読無 0 件)

1. ▲*T. Taen, K. Uchida, and T. Osada, "Thickness-dependent phase transition in graphite under high magnetic field", *Phys. Rev. B* **97**, 115122/1-7 (2018). (査読有)
2. ◎▲T. Hirahara, R. Ebisuoka, K. Watanabe, T. Taniguchi, and *R. Yagi, "Magnetoresistance measurements of tetralayer graphene device with single gate electrode", *J. Phys.: Conf. Ser.* **969**, 12150 (2018). (査読有)
3. ▲*T. Osada, "Chern Insulator Phase in a Lattice of an Organic Dirac Semimetal with Intracellular Potential and Magnetic Modulations", *J. Phys. Soc. Jpn.* **86**, 123702/1-5 (2017). (査読有)
4. ◎▲*Y. Yamasaki, R. Moriya, M. Arai, S. Masubuchi, S. Pyon, T. Tamegai, K. Ueno, and T. Machida "Exfoliation and van der Waals heterostructure assembly of intercalated ferromagnet $\text{Cr}_{1/3}\text{TaS}_2$ ", *2D Mater.* **4**, 041007/1-10 (2017). (査読有)
5. ◎▲*A. I. Chernov, P. V. Fedotov, H. E. Lim, Y. Miyata, Z. Liu, K. Sato, K. Suenaga, H. Shinohara, and E. D. Obraztsova, "Band gap modification and photoluminescence enhancement of graphene nanoribbon filled single walled carbon nanotubes", *Nanoscale*, **10**, 2936-2943 (2017). (査読有)
6. ▲*S. Kanayama, K. Nakayama, G. N. Phan, M. Kuno, K. Sugawara, T. Takahashi, and T. Sato, "Two-dimensional Dirac semimetal phase in non-doped one-monolayer FeSe film", *Phys. Rev. B* **96**, 220509(R)/1-5 (2017). (査読有)
7. ◎▲*A. Endo, J. Bao, W. Norimatsu, M. Kusunoki, S. Katsumoto and Y. Iye, "Two-carrier model on the magnetotransport of epitaxial graphene containing coexisting singlelayer and bilayer areas", *Philos. Mag.* **97**, 1755-1767 (2017). (査読有)
8. ▲*N. Yabuki, *R. Moriya, M. Arai, Y. Sata, S. Morikawa, S. Masubuchi, and T. Machida, "Supercurrent in van der Waals Josephson junction", *Nat. Commun.* **7**, 10616/1-5 (2016). (査読有)
9. ◎▲*F. Amet, C. T. Ke, I. V. Borzenets, Y-M. Wang, K. Watanabe, T. Taniguchi, R. S. Deacon, M. Yamamoto, Y. Bomze, S. Tarucha, *G. Finkelstein, "Supercurrent in the quantum Hall regime", *Science* **382**, 966-969 (2016). (査読有)
10. ◎▲*I. V. Borzenets, F. Amet, C. T. Ke, A. W. Draelos, M. T. Wei, A. Seredinski, K. Watanabe, T. Taniguchi, Y. Bomze, M. Yamamoto, S. Tarucha, and G. Finkelstein, "Ballistic Graphene Josephson Junctions from the Short to the Long Junction Regimes", *Phys. Rev. Lett.* **117**, 237002/1-5 (2016). (査読有)
11. ◎▲Y. Shimazaki, *M. Yamamoto, I. V. Borzenets, K. Watanabe, T. Taniguchi, and *S. Tarucha, "Generation and detection of pure valley current by electrically induced Berry curvature in bilayer graphene", *Nat. Phys.* **11**, 1032-1036 (2015). (査読有)
12. ◎▲Y. Miyata, *K. Nakayama, K. Sugawara, T. Sato, and T. Takahashi, "High-temperature superconductivity in potassium-coated multilayer FeSe thin films", *Nat. Mater.* **14**, 775-779 (2015). (査読有)
13. ◎▲S. Morikawa, Z. Dou, S.-W. Wang, C. G. Smith, K. Watanabe, T. Taniguchi, S. Masubuchi, *T. Machida, and M. R. Connolly, "Imaging ballistic carrier trajectories in graphene using scanning gate microscopy", *Appl. Phys. Lett.* **107**, 243102/1-4 (2015). (査読有)

国際雑誌論文 (査読有) の総計 75 件。

書籍及び総説

1. 山本倫久, Ivan V. Berzenets, 樽茶清悟, 「グラフェンのジョセフソン接合における超伝導流」, 日本物理学会誌 **72**, 774-782 (2017).
2. ▲長田俊人, 「原子層におけるトポロジー物理」, 表面科学 **37**, 535-540 (2016).

6.7 物性班 (公募研究) 計 64 件 (査読有 61 件、査読無 3 件)

1. ▲Y. Takane and A. Kanda, "Andreev reflection in a proximity junction of graphene: Influence of a naturally formed pn junction", *J. Phys.: Conf. Ser.* **969**, 012155 (2018). (査読有)
2. ◎▲Y. Ichinose, J. Eda, Y. Yomogida, Z. Liu, and *Kazuhiro Yanagi "Extraction of High-Purity Single-Chirality Single-Walled Carbon Nanotubes through Precise pH Control Using Carbon Dioxide Bubbling", *J. Phys. Chem. C* **121**, 13391-13395 (2017). (査読有)
3. ◎▲M. Matsumoto, S. Shimizu, R. Sotoike, M. Watanabe, Y. Iwasa, Y. Itoh, and T. Aida, "Exceptionally High Electric Double Layer Capacitances of Oligomeric Ionic Liquids", *J. Am. Chem. Soc.* **139**, 16072-16075 (2017). (査読有)
4. ◎▲C. R. da Cunha, M. Mineharu, M. Matsunaga, N. Matsumoto, C. Chuang, Y. Ochiai, G.-H. Kim, K. Watanabe, T. Taniguchi, D. K. Ferry, and N. Aoki, "Conductance fluctuations in high mobility monolayer graphene: Nonergodicity, lack of determinism and chaotic behavior", *Sci. Rep.* **6**, 33118/1-8 (2016). (査読有)
5. ◎▲T. Koyama, K. Mizutani, H. Ago, and H. Kishida, "Two-Step Excitation Triggered by One-Photon Absorption on Linear Dispersion in Monolayer Graphene", *J. Phys. Chem. C* **120**, 11225-11229 (2016). (査読有)
6. ◎▲D. Kozawa, A. Carvalho, I. Verzhbitskiy, F. Giustiniano, Y. Miyauchi, S. Mouri, A. H. Castro Neto, K. Matsuda, and G. Eda, "Evidence for fast interlayer energy transfer in $\text{MoSe}_2/\text{WS}_2$ heterostructures", *Nano Lett.* **16**, 4087-4093 (2016). (査読有)

国際雑誌論文 (査読有) の総計 60 件。

6.8 応用班 (計画研究) 計 103 件 (査読有 93 件、査読無 10 件)

1. ◎▲Y.-M. Chang, S.-H. Yang, C.-Y. Lin, C.-H. Chen, C.-H. Lien, W.-B. Jian, K. Ueno, Y.-W. Suen, K. Tsukagoshi, and *Y.-F. Lin, "Reversible and Precisely Controllable p/n-Type Doping of MoTe₂ Transistors through Electrothermal Doping", *Adv. Mater.*, **30**, 1706995 (2018). (査読有)
 2. ◎▲Y. Hattori, T. Taniguchi, K. Watanabe, and *K. Nagashio, "Determination of Carrier Polarity in Fowler-Nordheim Tunneling and Evidence of Fermi Level Pinning at the Hexagonal Boron Nitride/Metal Interface", *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **10**, 11732 (2018). (査読有)
 3. ◎▲I. Lovchinsky, J. D. Sanchez-Yamagishi, E. K. Urbach, S. Choi, S. Fang, T. I. Andersen, K. Watanabe, T. Taniguchi, A. Bylinskii, E. Kaxiras, P. Kim, *H. Park, *M. D. Lukin, "Magnetic resonance spectroscopy of an atomically thin material using a single-spin qubit", *Science*, **355**, 503 (2017). (査読有)
 4. ◎▲S. Sekizaki, M. Osada, and *K. Nagashio, "Molecularly-thin Anatase field-effect transistors fabricated through the solid state transformation of titania nanosheets", *Nanoscale*, **9**, 6471 (2017). (査読有)
 5. ▲*T. Yamada, H. Kato, Y. Okigawa, M. Ishihara, M. Hasegawa, "Electrical Properties of Bilayer Graphene Synthesized by Surface Wave Microwave Plasma Techniques at Low Temperature", *Nanotechnol.*, **28**, 025725 (2017). (査読有)
 6. ◎▲*Y. Hattori, T. Taniguchi, K. Watanabe, and *K. Nagashio, "Anisotropic breakdown strength of single crystal hexagonal Boron Nitride", *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **8**, 27877 (2016). (査読有)
 7. ◎▲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 WSe₂", *Nano Lett.* **15**, 2067-2073 (2015). (査読有)
 8. ▲*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)
 9. ◎▲*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)
 10. ◎▲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)
 11. ◎▲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)
 12. ▲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)
 13. ◎▲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)
- 国際雑誌論文 (査読有) の総計 92 件。

書籍及び総説

1. 長汐晃輔, 長谷川雅考, 塚越一仁, "カーボンナノチューブ・グラフェンの応用研究最前線", エヌ・ティー・エス, 東京, 2016.
2. 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].
3. 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.

6.9 応用班 (公募研究) 計 61 件 (査読有 51、査読無 10 件)

1. ▲"Versatile and Simple Approach to Generate Light Emission in Semiconductors Mediated by Electric Double Layers", J. Pu, T. Fujimoto, Y. Ohashi, S. Kimura, C.-H. Chen, L.-J. Li, T. Sakanoue, *T. Takenobu, *Advanced Materials*, **29**, 1606918 (2017). (査読有)
2. ▲D. Suzuki, S. Oda and *Y. Kawano, "A flexible and wearable terahertz scanner", *Nature Photonics*, **10**, 809-814 (2016). (査読有)
3. ▲Z. Q. Wang, S. C. Ning, T. Fujita, A. Hirata, *M. W. Chen, "Unveiling Three-Dimensional Stacking Sequences of 1T Phase MoS₂ Monolayers by Electron Diffraction", *ACS Nano*, **10**, 10308-10316 (2016). (査読有)
4. ◎▲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). (査読有)
5. ◎▲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). (査読有)
6. ◎▲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). (査読有)
7. ◎▲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). (査読有)

国際雑誌論文 (査読有) の総計 48 件。

書籍及び総説

1. Y. Ohno, "High-Mobility Thin-Film Transistors for Flexible Electronics Applications" in 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].

6.10 理論班 (計画研究) 計 195 件 (査読有 183 件、査読無 12 件)

1. ◎▲T. Nomura, T. Habe, R. Sakamoto, and *M. Koshino, "Three-dimensional graphdiyne as a topological nodal-line semimetal", *Phys. Rev. Mater.* **2**, 054204 (2018). (査読有)
2. ▲*F. Liu, K. Wakabayashi, "Novel Topological Phase with a Zero Berry Curvature", *Phys. Rev. Lett.* **118**, 076803 (2017). (査読有)
3. ▲*Nguyen N. T. Nam, M. Koshino, "Lattice relaxation and energy band modulation in twisted bilayer graphene", *Phys. Rev. B*, **96**, 075311 (2017). (査読有)
4. ◎▲*R. Saito, Y. Tatsumi, S. Huang, X. Ling, M. S. Dresselhaus, "Raman spectroscopy of transition metal dichalcogenides" *Journal of Physics: Condensed Matter* **28**, 353002 (2016). (査読有)
5. ▲*N. T. Hung, A. R. T. Nugraha, E. H. Hasdeo, M. S. Dresselhaus, R. Saito, "Quantum Effects in the Thermoelectric Power Factor of Low-Dimensional Semiconductors", *Phys. Rev. Lett.* **117**, 036602 (2016). (査読有)
6. ◎▲Y. Tanabe, Y. Ito, K. Sugawara, D. Hojo, M. Koshino, T. Fujita, T. Aida, X. D. Xu, K. K. Huynh, H. Shimotani, T. Adschiri, T. Takahashi, K. Tanigaki, H. Aoki, M. W. Chen, "Electric Properties of Dirac Fermions Captured into 3D Nanoporous Graphene Networks", *Adv. Mater.*, **28**, 10304 (2016). (査読有)
7. ◎▲*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)
8. ◎▲L. Wang, Y. Gao, B. Wen, Z. Han, T. Taniguchi, K. Watanabe, M. Koshino, J. Hone, and *C. R. Dean, "Evidence for a fractional fractal quantum Hall effect in graphene superlattices", *Science*, **350**, 1231-1234 (2015). (査読有)
9. ◎▲*H. L. Liu, H. Guo, T. Yang, Z. Zhang, Y. Kumamoto, C. C. Shen, Y. T. Hsu, R. Saito, S. Kawata, "Anomalous lattice vibrations of monolayer MoS₂ probed by ultraviolet Raman scattering", *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **17**, 14561-14568 (2015), (査読有)
10. ▲*H. Y. Deng, K. Wakabayashi, "Vacancy effects on electronic and transport properties of graphene nanoribbons" *Phys. Rev. B* **91**, 035425 (2015). (査読有)
11. ▲*P. Moon and M. Koshino, "Electronic properties of /hexagonal-boron-nitride moire superlattice", *Phys. Rev. B*, **90**, 155406 (2014). (査読有)
12. ▲*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)
13. ▲*P. Moon and M. Koshino, "Optical Absorption in Twisted Bilayer Graphene", *Phys. Rev. B*, **87**, 205404 (2013), (査読有)

国際雑誌論文 (査読有) の総計 182 件。

書籍及び総説

1. 青木秀夫,「グラフェンの物性理論—量子化学的観点から」 二次元物質の科学 グラフェンなどの分子シートが生み出す新世界, 2017, 日本化学会編 化学同人 p46-60.
2. 齋藤理一郎,「フラーレン・ナノチューブ・グラフェンの科学」, 物理科学最前線 5、163 頁, 共立出版 2015 年
3. H. Aoki and M. S. Dresselhaus (ed.), "Physics of Graphene" (Springer, 2014). [ISBN: 978-3-319-02632-9]
4. 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.

6.11 理論班 (公募研究) 計 85 件 (査読有 85 件、査読無 0 件)

1. ▲T. Kikuchi, T. Koretsune, R. Arita, and G. Tatara, "Dzyaloshinskii-Moriya Interaction as a Consequence of a Doppler Shift due to Spin-Orbit-Induced Intrinsic Spin Current", *Phys. Rev. Lett.*, **116**, 247201 (2016). (査読有)
2. ▲M. Maruyama and S. Okada, "Magnetic Properties of Quantum Dots Embedded in h-BN Sheet", *J. Phys. Chem. C*, **120**, 1293-1302 (2016). (査読有)
3. ◎▲N. Morishita, G. K. Sunnardianto, S. Miyao, K. Kusakabe, "Theoretical Analysis on Pseudo-Degenerate Zero-Energy Modes in Vacancy-Centered Hexagonal Armchair Nanographene", *J. Phys. Soc. Jpn.*, **85**, 084703 (2016). (査読有)
4. ▲T. Kariyado and Y. Hatsugai, "Manipulation of Dirac Cones in Mechanical Graphene", *Scientific Reports*, **5**, 18107 (2015). (査読有)
5. ▲S. Konabe, S. Okada, "Effect of Coulomb interactions on optical properties of monolayer transition-metal dichalcogenides", *Phys. Rev. B* **90** (15), 155304 (2014). (査読有)

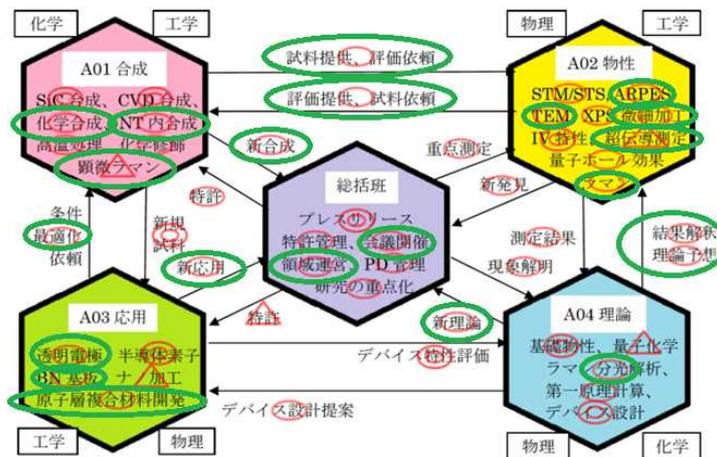
国際雑誌論文 (査読有) の総計 84 件。

7. 研究組織（公募研究を含む。）と各研究項目の連携状況（2 ページ以内）

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、総括班研究課題の活動状況も含め、どのように研究組織間の連携や計画研究と公募研究の調和を図ってきたか、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。

7.1 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、赤字の◎は中間評価時に予想以上の達成のあったものである。○予想通り、△展開中であつたもので、事後評価段階で十分改善されたものが緑の○印を重ねて書いてある。これらの評価は、独自に作成した最終報告書（日本語 720 頁）をもとに、項目ごとに総括班で評価を加えた。公募研究が独自に設定した研究項目もあるが、新たな研究項目は付け加えていない。図でわかるように、中間評価時でまだ展開中であつた計画もおおむね達成されている。特に後半顕著であつたのは、(1)合成班では、新規原子層物質の CVD 合成、また公募班も含めて有機合成によるボトムアップ合成によってオリジナルな原子層物質が合成された、(2)物性班では、領域内共同研究によって提供された試料を用いて、バレーホール効果などの量子効果、原子層物質の 50K を超える超伝導の発見、TEM による原子層物質の面内構造の研究が大きく展開した。後期に重点配分した物性班の公募研究の活躍によって光学的な研究にも大きな展開があつた。(3)応用班では、領域内共同研究によって提供された試料を用いて、複合原子層物質の作成、透明電極と有機 EL への応用など、デバイス開発に向けた展開が行われた。(4)理論班では、有機化学のボトムアップ合成された物質を理論解析、またデバイス応用された物質のラマン分光の理論解析、など原子層科学が発足していなければ行われなかつた共同研究の結果が得られた。さらに原子層物質の熱電効果や熱伝導など多方面の分野への展開もあつた。



図：発足時の研究項目と共同体制（赤字は中間評価時の評価：◎予想以上、○予想通り、△展開中。緑の○は、中間評価時以降に大きく改善したもの）緑は、後半に強化されて達成されたもの。

7.2 共同研究の分析

7.2.1 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、中間報告時では、**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 の研究者がかかわっているので、延人数にすると 300 以上の数になり、構成員が少なくとも中間報告時までには 2-3 件の共同研究を実施したことになる。しかし、この数字は共同研究を行った数であつて、成果として

論文として発表された数字ではなかった。今回の事後評価では、実を結んだ共同研究の数として、発表論文（査読有）の数で評価した。共同研究による発表論文の総数は、5年間で499件である。この数は、原子層科学として5年間に発表した査読有の論文の総数である836件の60%が共同研究による成果であることを意味する。共同研究の発表論文499件は、共同研究に関わった研究者に対して重複にカウントをしていないので、仮に1つの論文の中の共同研究の共著者の数が最低の2としても、各研究者の発表論文の内訳は、**(共同研究による成果) : (それ以外の成果) = 499 x 2 : (836-499) = 3 : 1**になる。このことは、各研究者の発表論文の約4分の3が共同研究による論文で、約4分の1が研究者のグループが単独で発表した論文であることを示している。すなわち、新学術領域研究として、共同研究を活性化するという目的が十分に達成したことを意味している。原子層科学が、一般の新学術領域研究の目指す運営のあり方として、理想的な展開になったと自負している。

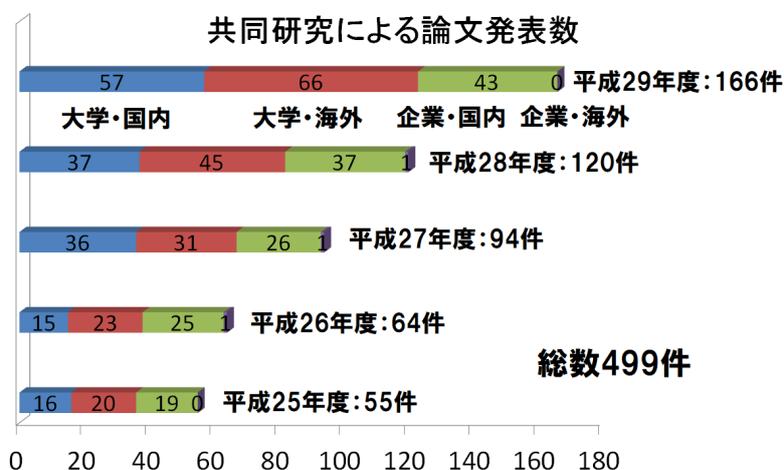
7.2.2 共同研究発表論文の年度の推移：

表のA欄が示すように、共同研究発表論文の数は、平成25年度から29年度で指数関数的に増加した。また、B欄の各年度の発表論文（査読有り）の総数も同様に増加したが、A欄ほどではない。またC欄に総論文数に占める共同研究による発表論文数の割合を示した。初年度を除いて、共同研究の比率が増加している。初年度の比率が大きいのは、発足当初からある h-BN 基板供給による国際共同研究によるものである（図参照）。

年度毎の共同研究の推移の主な理由は(1)合成班の試料提供が軌道にのり、平成27年度から領域内（図では大学・国内）の共同研究が増えた。(2) 国際共同研究支援基金の援助が追加で配分され、従来のh-BN 基板供給による国際共同研究「以外」の国際共同研究（大学・海外）が増加した。(3)領域の発展にともない、領域外との共同研究、特に企業などとの共同研究（企業・国内）も順調に増えたことなどがあげられる。

	平成25年度	平成26年度	平成27年度	平成28年度	平成29年度	合計
A:共同研究	55件	64件	94件	120件	166件	499件
B:総論文数	92件	141件	177件	190件	236件	836件
C: A/B	60%	45%	53%	63%	70%	60%

表：年度ごとの、A：共同研究による発表論文数（査読有）、B：総論文数（査読有）、C:総論文数に占める共同研究による発表論文数の割合（A/B）。



図：原子層科学全体の発表論文数における共同研究による発表論文数の年度毎の推移。
（注：少し見にくいですが、企業・海外の分類は、平成27年度、28年度に各1件ある。）

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

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記述してください（総括班における設備共用等への取組の状況を含む。）。

8.1 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。ニュース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上からダウンロードできるようにした。中間報告書は1ヶ月で400回のダウンロード数を達成した。中間報告書以降、Webサーバーでダウンロード統計を取り始め、720ページの最終報告書は3ヶ月で669回ダウンロードされた。このように誰もがダウンロードできるPDFファイルは、印刷物よりもはるかに影響力が大きい。また本新学術領域は、Facebookなど比較的若い人が利用するSNS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（Facebookの記事は累計10万回以上参照された）。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。

8.2 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層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、 $5 \times 5 \text{ mm}^2$ 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。



8.3 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 NiGa_2S_4 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、平成25年度に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。



8.4 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、平成26年度に導入・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。



8.5 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。



8.6 研究費の使用状況

(1) 主要な物品明細 (計画研究において購入した主要な物品 (設備・備品等。実績報告書の「主要な物品明細書」欄に記載したもの。) について、金額の大きい順に、枠内に収まる範囲で記載してください。)

年度	品名	仕様・性能等	数量	単価 (円)	金額 (円)	設置(使用)研究機関	
25	ターゲット作製装置	高感度スピン検出器用・特注	1式	19,635,000	19,635,000	東北大学	
	超高真空高温加熱装置	サーモ理工・SRI800D	1式	9,933,504	9,933,504	名古屋大学	
	高分解能プローブ顕微鏡システム	日立ハイテクサイエンス・Nanocute OP	1式	9,399,988	9,399,988	名古屋大学	
	電子エネルギー分析器	英国 PSP・RESOLV-SCD	1式	8,646,750	8,646,750	東京大学	
	デジタルマイクロスコープ	ハイロックス社製・KH7700	1式	3,496,500	3,496,500	東京大学	
	通電加熱チャンバー	SiC 通電加熱セラフェン作製用・特注	1式	1,764,000	1,764,000	東北大学	
	高純度水素ガス発生装置	エアータック社・NM-Plus-100	1式	1,559,250	1,559,250	東京大学	
	イオンクリーナー	EC-52000IC	1	1,365,000	1,365,000	産業技術総合研究所	
	工業顕微鏡	ニコン LV150N 特注仕様	1式	1,255,800	1,255,800	広島大学	
	26	ウェル構造型高磁場超伝導磁石	米国クライオマグネティクス社製・15テスラ	1	15,012,000	15,012,000	東京大学
高分解能2軸傾斜加熱・印加ホルダー		2軸傾斜機構・加熱機構・コントローラ	1	11,990,160	11,990,160	産業技術総合研究所	
顕微レーザーラマン分光装置		堀場製作所製・XploRA-plus型	1式	9,892,800	9,892,800	東京大学	
ORCA-Flash4.0 デジタルカメラ		C11440-22CU 浜ホトニクス(樹製)	1式	1,846,800	1,846,800	東北大学	
27		デジタルマイクロスコープ	ハイロックス製・グローブボックス組込用	1式	4,499,280	4,499,280	東京大学
	JEM2010F(URP) 試料加熱装置	試料加熱ホルダーおよびヒーターコントロールユニット	1式	3,045,600	3,045,600	産業技術総合研究所	
	赤外線導入加熱装置	GVL398型・高速昇温型 1600℃	1式	2,995,920	2,995,920	東京大学	
	任意波形発生器	AT-AWG-GS2500型	1	1,932,228	1,932,228	東京大学	
	超高真空3元エバポレーター	アールデック社製・1kV	1	1,852,740	1,852,740	東京大学	
	28	高感度冷却 CCD 検出器	株式会社ローパー	1	3,500,000	3,500,000	名古屋大学
		透過・反射正立光学顕微鏡システム	Zeiss AxioImager 社製・A2m型・偏光機能付	1式	3,294,000	3,294,000	産業技術総合研究所
時間相関単一光子モジュール		株式会社東京インストルメンツ	1	2,329,884	2,329,884	名古屋大学	
デジタルマイクロスコープ		ハイロックス社製・KH7700(中古)	1	993,600	993,600	東京大学	
高真空排気装置		DIAVAC DS-A412Z型・120L/s	1式	930,960	930,960	東京大学	
プラズマクリーナー		Harrick Plasma PDC-32G型・18W	1	894,875	894,875	東京大学	
ワークステーション		TS3D-E514(24)L-129a/ DP	1	955,800	955,800	大阪大学	
真空排気装置		NEXTorr D200-5型・200L/s	1式	756,000	756,000	東北大学	
29		正立型顕微鏡システム	落射・透過(OlympusBX53M・倍率100倍)	1式	1,338,444	1,338,444	東京大学
	微小電流-電圧変換アンプ	DL 1211/J-R	1	799,372	799,372	東京大学	
	ソフトウエア	HREM 社 GPA 64bit		777,600	777,600	産業技術総合研究	

(2) 計画研究における支出のうち、旅費、人件費・謝金、その他の主要なものについて、年度ごと、費目別に、金額の大きい順に使途、金額、研究上必要な理由等を具体的に記述してください。

【平成25年度】

・旅費

1. M. Bhanuchandra 氏を京都に招聘（ハイデラバード・インド⇄京都の交通費、宿泊費）743,144 円、合成班
2. 国際共同実験(国立強磁場研究所)を実施(東京⇄タラハシー・米国の交通費、宿泊費) 458,510 円、物性班
3. 半導体物理学国際会議に参加(東京⇄テキサス・米国の交通費、宿泊費) 457,783 円、理論班
4. 文氏を韓国から仙台に招聘（ソウル・韓国⇄仙台の交通費、宿泊費）437,269 円、総括班
5. アメリカ物理学会に参加(広島⇄サンアントニオ・米国の交通費、宿泊費) 379,060 円、物性班
6. 国際会議 IEDM に参加(東京⇄ワシントン DC・米国の交通費、宿泊費) 273,500 円、応用班

・人件費・謝金

1. 博士研究員 2 名（半年間）、研究補助員 1 名、(週 2 回、半年間)の雇用 5,062,758 円、総括班
2. 博士研究員 2 名、(1 名×1 ヶ月、1 名×2 ヶ月) の雇用、746,144 円、合成班

・その他

1. 走査電子顕微鏡修理費 812,112 円、物性班
2. イエローカーテン設置作業 438,867 円、応用班
3. 日立走査電子顕微鏡 点検整備作業費 307,545 円、合成班
4. 計算機利用料金 225,500 円、理論班
5. RHEED 電源修理費 189,000 円、物性班

【平成26年度】

・旅費

1. 国際会議 NP02014 に参加（東京⇄ヨエンスー・フィンランドの交通費、宿泊費）821,759 円、合成班
2. 国際会議 ICSM2014 に参加(東京⇄アンタルヤ・トルコの交通費、宿泊費) 384,330 円、物性班
3. アメリカ物理学会に参加（東京⇄テキサス・米国の交通費、宿泊費)353,920 円、応用班
4. 国際会議 Graphene&2D materials に参加(東京⇄ロサンゼルス・米国の交通費、宿泊費)304,000 円、応用班
5. 国際会議 NT14 に参加(東京⇄ロサンゼルス・米国の交通費、宿泊費) 294,061 円、理論班

・人件費・謝金

1. 博士研究員 5 名（1 年間）、研究補助員 1 名、(週 2 回)の雇用 24,650,521 円、総括班
2. 博士研究員 1 名の雇用（1 年間）4,097,773 円、合成班
3. 博士研究員の雇用(H. 26. 8. 1-H27. 1. 31) 2,187,004 円、理論班
4. 研究補助員 1 名の雇用（1 年間）1,221,892 円

・その他

1. 液体ヘリウム使用料に関わる費用 671,200 円、物性班
2. 走査電子顕微鏡修理費 346,356 円、物性班
3. ターボ分子ポンプ修理 286,902 円、応用班
4. 計算機利用料金 246,000 円、理論班
5. 講習会に用いるグラファイト単結晶試料を購入 150,965 円、総括班

【平成27年度】

・旅費

1. M. S. Dresselhaus 教授を仙台に招聘(ボストン・米国⇄仙台の交通費、宿泊費) 710,548 円、理論班
2. 国際会議 ISCOM2015 に参加(東京⇄ミュンヘン・ドイツの交通費、宿泊費) 441,290 円、物性班
3. アメリカ物理学会に参加(広島⇄ボルチモア・米国の交通費、宿泊費) 415,700 円、物性班
4. L. Zhou 博士を仙台に招聘(ボストン・米国⇄仙台、交通費、宿泊費) 271,379 円、理論班
5. TCECM2015 国際会議に参加(つくば⇄台湾、交通費、宿泊費) 133,270 円、応用班

・人件費・謝金

1. 博士研究員 5 名（1 年間）、研究補助員 1 名、(週 2 回、1 年間)の雇用 24,331,036 円、総括班
2. 博士研究員 1 名の雇用（1 年間）、4,117,732 円、合成班
3. 特任研究員(原子層作製技術補佐) 1 名の雇用 2,537,874 円、物性班
4. 博士研究員 1 名の雇用(半年)、2,022,048 円、理論班

・その他

1. JSM-6510 型走査電子顕微鏡 修理 565,920 円、合成班
2. ナノテクノロジー・プラットホーム利用料金 (SEM・TEMなどの利用) 487,890 円、合成班
3. 計算機利用料金 294,000 円、理論班
4. MECA2000 トランスファーロード修理費 266,760 円、物性班
5. 印刷費 A3 国際会議概要集印刷費 224,640 円、総括班
6. 液体ヘリウム使用料に関わる費用 210,240 円、物性班

【平成28年度】

・旅費

1. 国際会議 GDR-1 GNT に参加 (東京⇄ラ・ロシェル・フランスの交通費、宿泊費) 772,055 円、合成班
2. S. G. Louie 教授を東京に招聘(サンフランシスコ・米国⇄東京の交通費、宿泊費) 737,620 円、理論班
3. 国際会議 CCNT16、NT16 に参加(東京⇄ウィーン・オーストリアの交通費、宿泊費) 517,580 円、理論班
4. 国際会議 NT16 に参加(名古屋⇄ウィーン・オーストリアの交通費、宿泊費) 467,652 円、物性班
5. 国際会議 GM2016 に参加(東京⇄パエスタム・イタリアの交通費、宿泊費) 482,336 円、応用班

・人件費・謝金

1. 博士研究員 5名(1年間)、研究補助員 1名、(週2回、1年間)の雇用 24,312,191 円、総括班
2. 博士研究員 1名の雇用(1年間) 4,017,933、理論班
3. 博士研究員 1名の雇用(7.5ヶ月) 1,493,673 円、合成班
4. 博士研究員 1名(2.4ヶ月分) 1,056,724 円、理論班

・その他

1. 実験室スペース借用・電気料金 2,066,835 円、物性班
2. 電子線描画装置搬入・輸送・搬出費 1,078,400 円、物性班
3. 実験室スペース借用料金、825,000 円 合成班
4. 計算機利用料金 522,000 円、理論班

【平成29年度】

・旅費

1. 国際会議 ISNM に参加 (東京⇄エスポー・フィンランドの交通費、宿泊費) 874,200 円、合成班
2. 国際会議 LT-28 に参加(広島⇄ヨーテボリ・スウェーデンの交通費、宿泊費) 395,200 円、物性班
3. 国際会議 ICFNN-2017 に参加(大阪⇄カトマンズ・ネパールの交通費、宿泊費) 376,960 円、理論班
4. 国際会議 NT17 に参加(仙台⇄ベロオリゾンテ・ブラジルの交通費、宿泊費) 376,960 円、理論班
5. 国際会議 EP2DS-22 に参加 (東京⇄ステートカレッジ・米国の交通費、宿泊費) 332,458 円、物性班

・人件費・謝金

1. 博士研究員 5名、研究補助員 1名、(週2回、1年間)の雇用 22,973,423 円、総括班
2. 博士研究員 1名の雇用(1年間)、3,265,250 円、合成班
3. 博士研究員 1名(2.4ヶ月分) 1,056,724 円、理論班

・その他

1. グローブボックスシステム点検・部品交換 1,499,904 円、合成班
2. 計算機利用料金 500,000 円、理論班
3. 論文(JPSJ 誌)オープンアクセス適用料金 162,000 円、物性班

(3) 最終年度(平成29年度)の研究費の繰越しを行った計画研究がある場合は、その内容を記述してください。

該当なし。

9. 当該学問分野及び関連学問分野への貢献度（1 ページ以内）

研究領域の研究成果が、当該学問分野や関連分野に与えたインパクトや波及効果などについて記述してください。

9.1 原子層科学分野を、既存の分野（物理、化学、工学）を超えて議論する空間を作った。

原子層科学の領域は、既存の分野を超えた共同研究が実現し、しかも共通の言葉で議論ができるようになった。さらに、講習会など通じて共通の理解を得たので、試料の改善点などを正確に把握できるようになった。

9.2 関連分野に与えたインパクトや波及効果

2次元物質を用いた技術の進歩は、半導体工学、トポロジカル物質、スピントロニクス、バイオテクノロジー、電池材料、熱電材料などへの応用が検討されるようになった。すでに原子層科学のメンバーが、関連する新学術領域の公募や計画研究に参入し、原子層物質を用いた応用展開をしていることから明らかである。

世界のグラフェン研究組織からも日本での活動が注目され、2国間や複数の国とのワークショップを開こうという提案がされたり、こちらから提案して受け入れられたりした。このことは、日本の研究活動が一定の評価とインパクトを与えたことを示している。また、日本の工業界においても、グラフェンを研究しようという動きが広がった。企業が共同で、グラフェンコンソーシアム（代表：応用班 長谷川）を立ち上げ、研究者を招待講演に招いたりして、企業が開発のための企画提案も始まった。また、酸化グラフェンに関しても研究会が立ち上がり、主に応用に向けて活動を行っている。JSTも2次元物質に関するCRESTプロジェクトを始めた。これは、当該学問分野のとくに応用に向けた重要性を認識したものであり、大きな波及効果といえる。

9.3 新しい学問の創出による波及効果

原子層科学による、原子層物質の合成は、新しい学問の創出を生み出した。2次元の物理という学問は、表面や界面の科学として別の意味で既にあったが、2次元物質を単独で合成したり、2次元物質を積み重ねたりして新しい物質を作るという学問は存在しなかった。この学問の創出を、「学理の構築」という形で示すために、教科書形式の最終報告書(720

頁)を作成した。この学問の創出による波及効果は、

(1)新規2次元物質の探索、(2) 2次元物質を用い

た物性探索、(3) 2次元物質を用いた半導体工学、などさまざまな点において、以下のような波及効果がある。

例えば(1)については、層状物質から2次元物質を作るという従来の考え方から、層状物質以外からも2次元物質を作る方法について展開がある。(2)については、高温超伝導体への転移温度の探索は3次元物質では終了したと考えられていたが、同じ物質でも2次元物質にすると、転移温度が大きく変わることがわかり、2次元超伝導物質の探索という大きな課題が発生した。またそのほか、バレー自由度、擬スピン自由度などの2次元物質とともに出現した新しい物理の概念を用いた物性研究が展開している。(3)の応用で一番重要と考えられているものが低消費電力、高集積度の半導体デバイスを2次元物質で設計するということが、現実のものとなったことである。このように原子層科学の創出による学問上の波及効果は著しい。

目次

第1章 グラフェン・酸化グラフェンの合成技術	1
1.1 序論	1
1.2 CVD合成法	4
1.2.1 大規模グラフェン合成技術	4
1.2.2 エピタキシャル成長技術	8
1.2.3 高圧気相成長技術	11
1.2.4 大面積化・異質化技術	15
1.2.5 エピタキシャル成長の最新技術	19
1.2.6 グラフェンのパターニング技術	24
1.3 酸化グラフェン(SiC)の合成	26
1.3.1 SiC基底上でのグラフェン合成	29
1.3.2 SiC基底上でのグラフェン合成	32
1.3.3 エピタキシャルグラフェンの形成と半導体デバイス	36
1.3.4 SiC基底上でのグラフェン合成	38
1.3.5 イオン注入によるSiC基底電導性制御	40
1.4 基底上直成合成技術	41
1.4.1 基底上直成合成技術	41
1.4.2 エピタキシャル成長技術	44
1.4.3 エピタキシャル成長技術	47
1.4.4 酸化グラフェン	49

viii 目次

1.5.1 酸化グラフェンの合成	50
1.5.2 酸化グラフェンの製造	54
1.5.3 酸化グラフェンからのグラフェン合成	57
第1章の引用文献	60
第2章 複合原子層の合成	67
2.1 序論	67
2.2 各種原子層の合成	68
2.2.1 液体法による五層黒鉛の合成	69
2.2.2 液体法による黒鉛の合成	70
2.2.3 液体法による黒鉛の合成	72
2.2.4 黒鉛 高純度黒鉛の合成	74
2.2.5 TMDCの合成	76
2.2.6 黒鉛原子層のCVD成長	79
2.2.7 TMDC原子層のCVD・MBE成長	86
2.2.8 液体法を用いたTMDC薄膜の合成	89
2.3 複合原子層	93
2.3.1 液体法による複合原子層	94
2.3.2 液体法による複合原子層	99
2.3.3 液体法による複合原子層	102
2.3.4 液体法による複合原子層	105
2.3.5 Mn ₂ C ₂ N ₂ の合成	108
第2章の引用文献	111
第3章 新規物質の探索	117
3.1 序論	117
3.2 有機分子によるグラフェン/黒鉛の基底上での合成	120
3.2.1 有機分子によるグラフェン/黒鉛の基底上での合成	120

教科書形式の最終報告書(720 頁)の目次
赤枠をクリックするとそのページに飛ぶ。

10. 研究計画に参画した若手研究者の成長の状況（1 ページ以内）

研究領域内での若手研究者育成の取組及び参画した若手研究者（※）の研究終了後の動向等を記述してください。

※研究代表者・研究分担者・連携研究者・研究協力者として参画した若手研究者を指します。

10.1 各種講習会による若手育成

分野を超えて、共通の知識や技術を学ぶ機会として、各種講習会を開いた。その一部は、総括班の旅費を使って負担が無いようにした。大学院生や助教だけでなく教授も多く参加した。また、お互いの研究発表ショートプレゼンテーションや、懇親会でのコミュニケーションによって、新たな共同研究が生まれるなど、単に知識や技術の習得でなく、総合的な研究者の育成につながった。特に第一原理計算講習会は、実験の研究者が、新規2次元物質の電子状態の計算を自発的に行い論文に発表したり、今度は若手が主体となって独自に講習会を開いたり大きな波及効果になった。

10.2 若手研究者の研究終了後の動向

2次元物質としての原子層科学の発展に伴い、多くの大学がこの分野の若い人材を求め、新規研究室を立ち上げる、または充実させる傾向にあった。その結果、原子層科学の研究協力者を含め5年間で、教授への昇任（8件、一部39歳以上）、講師または准教授への昇任（14件）があった。研究所で研究員からユニットリーダー（1件）、助教から研究所主任研究員（2件）さらに、研究協力者である博士学生あるいは研究員が学術振興会のPD（6件）や助教（7件）として採用されるなど、研究者を一分野から多数輩出（その他の研究職を含め83件（常勤57件、非常勤26件、39歳以下に限定）したのは驚異的である。このような躍進は、原子層科学全体の世界における注目度にも関係しているが、一方で講習会や共同研究などを通じて若手育成を積極的に図ってきた成果である、と自負している。

若手の活躍を示す例として主な受賞を列举する。日本学術振興会賞（1件）、文部科学大臣表彰若手科学者賞（5件）、日本化学会進歩賞（1件）、日本物理学会若手奨励賞（2件）など国内の卓越した賞、また Sir Martin Wood Prize、Mukaiyama Award、Gottfried Wagener Prize（計3件）といった若手国際賞、さらに井上研究奨励賞（4件）、国際会議におけるポスター賞（21件）、国内会議におけるポスター賞と講演賞（66件）、論文賞（8件）、大学内の賞（22件）などの学生や博士研究員の受賞など、総計133件ある。ちなみに40歳以上の受賞件数は計26件（合計159件）あり、受賞対象の違いがあるものの、若手の活躍が著しいことを示している。



(上)最も多く開催された（4回）原子層作製講習会。原子層を初めて扱う大学院生から教授までが熱心に受講した。(下)原子層道場では、2日間原子層科学の理論を勉強した。演習問題で苦しむ教授もいた。



第一原理計算講習会。この講習会でエネルギーバンド計算を実験グループが、自分で計算するようになった。時代の流れを感じさせる講習会であった。

11. 総括班評価者による評価（2 ページ以内）

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。

11.1 榎 敏明（東京工業大学大学院理工学研究科・教授（発足時）、現在同名誉教授）

我国は1990年代に始まるカーボンナノチューブの研究で世界の炭素材料研究のリーダーシップを取り、炭素科学において長年世界をリードしてきた。しかしながら、2004年に始まる、一原子層からなるグラフェンの研究が物質科学の大きな世界的潮流となる中で、また、グラフェン研究の当初、日本からの独創的発信があったにもかかわらず、日本はその世界的潮流からは後塵を拝してきた。このような状況の中で、本来、日本が持っている炭素材料、無機材料の広域な物質科学の高いポテンシャルを基礎に、新たに、「原子層科学」という概念の確立を課題として、本新学術研究のプロジェクトをスタートした。

この研究プロジェクトでは、一枚の原子層からなる物質の学理と応用に関心のある、バックグラウンドの異なる研究者が、それぞれの得意な領域での研究展開を行うと同時に、異分野交流を積極的に推進するプロジェクトの研究環境の中で、積極的な研究交流・共同研究を進め、更に、海外の研究グループと積極的な研究交流も含めて、5年間の組織的なプロジェクト研究を行った。この5年間の研究成果は、物質合成、物性、デバイス、理論、それぞれの課題について、計画班、公募班の研究者により、多くの論文、著書として出版された。なかでも、急冷法 SiC 上自立グラフェン形成、h-BN 上への TMDC 直接成長、TMDC ヘテロ接合界面での閉じ込めポテンシャル観測、2層グラフェンにおけるバレーホール効果の観測、カリウム吸着による FeSe 原子層の高温超伝導の制御、グラフェンにおけるバリスティック電子軌道の実空間観測、新規 2次元半導体のインバータ動作、2層グラフェンの h-BN との複層化とギャップ形成、グラフェン透明電極を利用したフレキシブル有機 EL 素子、原子層モアレ複合膜の物性理論、複合原子薄膜系における量子フラクタルの実現、遷移金属カルコゲナイド原子膜におけるラマン分光の理論等は、重要な研究成果として、高く評価をすることが出来る。

このような研究活動の中で、プロジェクト発足当時、目標としていた研究課題を達成すると共に、化学、物理、材料科学が一体となった新分野「原子層科学」を学理として確立し、その応用技術への展開が行われた。更に、重要なことは、異分野の研究者の積極的交流を通して、「原子層科学」の研究コミュニティが形成され、グラフェンと 2次元物質科学の世界のコミュニティの中で、日本からの大きな研究発信力が生まれたことである。本研究プロジェクトの開始直前の世界の潮流に乗り遅れた日本の状況は、本プロジェクトの研究展開によって克服され、発信力のある日本の研究活動が 2次元物質の研究分野を積極的にリードする状況が生まれている。

11.2 家 泰弘（東京大学物性研究所・教授（発足時）、現在 日本学術振興会理事）

新学術領域研究「原子層科学」がその研究期間を終えたこの時点で振り返ると、5年前にこの新学術領域が発足したことは真に時宜を得たものであり、この分野における我が国の研究水準の向上と国際的競争力の強化に多大の貢献をなしたものと感深くする。

領域発足の準備段階において、世界の研究動向の分析に基づき、当時、世界のトップランナーに比べて若干遅れをとっていた感もある我が国の研究レベルの巻き返しが図られた。そのためには共同研究を活性化することが重要との認識に立ち、具体的な研究体制づくりに関して、領域代表の強いリーダーシップのもと、総括班

メンバーを中心として、強力な取組みがなされた。

原子層科学探求の基礎となるべき試料合成について言えば、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成法の開発、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で研究を進める体制が構築された。「原子層作製講習会」、「グラフェン道場」、「BN 単結晶の配布」は本領域ならではのユニークな共同研究強化策であり、有効に機能した。また、「新量子相レクチャー・シリーズ」による理論的基礎の学習などは、若手研究者・大学院生にとって極めて有益な研鑽の場であった。

5年間の研究期間のうちに優れた研究成果が数多く出されており、それらを国際的に発信することも積極的に行われた。その結果、領域発足前と比べて、この研究グループの先導によって当該分野における我が国の研究者たちの存在感が格段に高まったと思われる。ボトムアップのグループ研究を支援する科研費新学術領域研究の長所が十分に活かされたものであり、新学術領域の運営のあり方として手本となり得るものと高く評価できる。

11. 3 樽茶 清悟 (東京大学大学院工学系研究科・教授)

グラフェンを中心とする原子層物質、その複合物質の研究は、この 10 年世界各地で急速に発展し、興味深い話題を提供し続けている。我が国にも、当該研究の下地はあったものの、物質開発、物性探究やデバイス応用といった世界の潮流に乗り遅れた感があった。本領域は、世界に対抗すべく、合成、物性、デバイス、理論の連携による研究の重点化、加えて内外の共同研究の推進、若手研究者の育成などを狙いとして進められた。これらの狙いに沿って、充実した計画の導入と推進の努力がなされ、数々の優れた研究成果、若手層の成長、幅広い共同研究の増大という形になって表れている。

各班において数多くの成果があげられているが、その中で、急冷法による自立グラフェン形成、hBN 上の TMDC 直接成長 (合成班)、2 層グラフェンのバレーホール効果の実証、FeSe 原子層の高温超伝導性の観測 (物性班)、TMDC などの原子層デバイス開発、種々の新奇応用 (デバイス班)、原子層複合膜の理論構築、TMDC 膜のラマン分光論の確立 (理論班) などは特筆すべきものといえる。今後の大きい発展が期待される。

若手層育成のユニークな策として、各種講習会を企画し、とくに原子層作製、第一原理計算などは、若手層のスキルアップと具体的な共同研究のトリガーとしても大きい役割を果たしている。各班の連携を重視する本領域ならではの企画であるが、他の領域研究でも大いに参考になると考えられる。

共同研究に関しては、計画研究、公募研究の共同研究の数が多く、大きい成果が上げられている。総括班と計画班がその推進に尽力している結果といえる。また、国際共同研究の数も十分であり、このことは本領域の研究活動が世界的に認知され、世界のコミュニティにおいて、我が国の貢献度が上がってきたことの現れといえる。

以上のことから、本領域の研究活動の果たした役割は大きく、また今後の新しい研究展開の方向性を提供しており、ますますの発展が期待される。