

平成25年度 (2013年度) 新学術領域研究 (研究領域提案型) 領域計画書

平成 24 年10月22日
0版

審査希望区分	人文・社会系 理工系 数物系科学 化学 工学 生物系	整理番号	理工034
	仮領域番号		KB5W4
応募領域名	原子層科学		
英訳名	Science of Atomic Layer Systems		
領域代表者氏名	(フリガナ)	サイトウ リイチロウ	
	(漢字等)	齋藤 理一郎	
所属研究機関	東北大学		
部 局	理学(系)研究科(研究院)	職	教授
応募領域の研究概要	<p>本申請の目的は、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る。研究目標は、(1)原子層の合成法の探索、(2)原子層固有の物性の探求、(3)原子層デバイスへの応用、(4)原子層電子状態の理論の構築、の4つの分野を有機的に連携させ、六方晶窒化ホウ素(h-BN)原子層などその他の原子層物質の探求を行うことである。本申請で原子層科学を創成し、新たな学理と産業の創出を目指す。</p>		
(1) 関連研究分野(細目)	細目番号	4304	(2) 関連研究分野(細目)
	分野	総合理工	
	分科	ナノ・マイクロ科学	
	細目	ナノ材料工学	
研究の対象	細目番号	4302	(2) 関連研究分野(細目)
	分野	総合理工	
	分科	ナノ・マイクロ科学	
	細目	ナノ構造物理	
研究の対象	(1)多様な研究者による新たな視点や手法による共同研究等の推進により、当該研究領域の新たな展開を目指すもの。		
	(2)異なる学問分野の研究者が連携して行う共同研究等の推進により、当該研究領域の発展を目指すもの。		
	(3)既存の学問分野の枠に収まらない新興・融合領域の創成を目指すもの。		
	(4)当該領域の研究の発展が他の研究領域の研究の発展に大きな波及効果をもたらすもの。		
	(5)学術の国際的趨勢等の観点から見て重要であるが、我が国において立ち遅れており、当該領域の進展に格段の配慮を必要とするもの。		

研究組織

番号	研究区分	研究課題名	研究期間	代表者氏名	所属研究機関 部署 職	構成 員数
001	総括班	原子層科学の推進	平成25年度～平成29年度	00178518 齋藤 理一郎	東北大学 理学（系）研究科（研究院） 教授	12 人
002	研究項目A01 計画研究	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	10134818 楠 美智子	名古屋大学 エコトピア科学研究所 教授	8 人
003	研究項目A02 計画研究	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	00192526 長田 俊人	東京大学 物性研究所 准教授	7 人
004	研究項目A03 計画研究	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	20373441 長汐 晃輔	東京大学 工学（系）研究科（研究院） 准教授	6 人
005	研究項目A04 計画研究	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	60361797 越野 幹人	東北大学 理学（系）研究科（研究院） 准教授	8 人

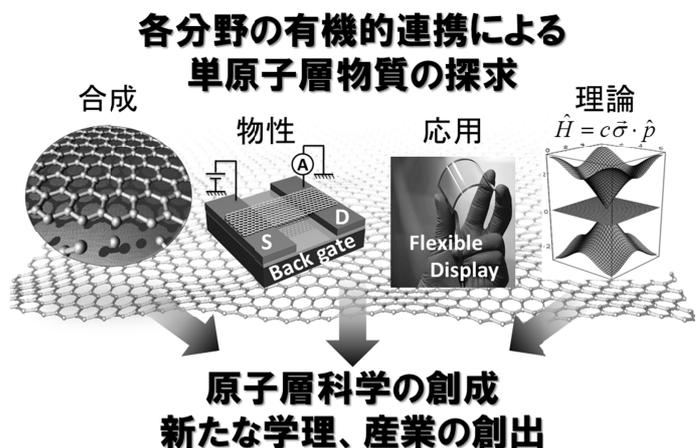
1 領域の目的等

(1) 目的

(1-1) 新たな研究領域の創成 「原子層科学」

本申請の目的は、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。

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、六方晶窒化ホウ素(h-BN)原子層などを含め、**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。



(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本格応用**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物性をもち、基礎・応用研究において世界中で熾烈な競争がある。日本が競争力を確保するには、**国内の研究者の連携による研究領域の構築や今後の方向決定が必要である**と考え、本申請に至った。

応募領域の着想に至った経緯：グラフェン研究は、2004年に現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。したがって、問題が単にグラフェンに限らず他の層状物質を含み、**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及するなど、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

目的(つづき)

野の発展は期待できない。分野を超えて、お互いの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。

(1-3) 研究期間内に何をどこまで明らかにしようとするか？

研究目標、達成目標：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標を以下のように設定した。具体的な推進計画と連携の方法は、次ページ以降で説明する。

- (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)状態が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。

(1-4) 公募要領の「対象」に該当する点：

本研究領域は、公募要領の「対象」とする点の多くに該当する。

- (1) 本研究領域は、物理学、化学、工学などの既存の学問分野の枠を超えた融合領域の創成を目指すものである。異分野間の研究の連携が強く望まれている分野である。
- (2) 本研究領域のメンバーは、各分野を代表する研究者から構成されている。このような精通した研究者間の共同研究を通じて、新たな大きな発展が期待できる。
- (3) グラフェンを中心とした基礎研究が、新規原子層物質を含む原子層科学に大きく展開することが期待できる。その帰結として新たな産業を生み社会に還元が可能である。
- (4) 諸外国、EUなどがグラフェン研究に対し、以下に示すように巨大プロジェクトを立ち上げ、日本は孤立した立場に置かれている。領域の進展に格段の配慮が必要である。

(1-5) この提案が、内外の研究と比較して、ほかにはないどのような特徴があるのか？

昨年の審査結果の所見に上記の質問があったので、本研究の大きな特徴を列挙する。

- (1) 世界が低温(500-1000度)合成をめざす中、楠らは2,000度を超える高温合成技術を持つ。大面積合成装置の開発で、世界最小レベルの格子欠陥の少ない試料を作製できる。
- (2) 低温・強磁場測定など、長田らは物性実験を系統的に行う研究装置・グループをすでに保有する。海外も同様な装置を保有するが、まだ横の連携や基礎研究体制が弱い。
- (3) 応用グループの渡邊・塚越らは、世界に先駆けBN原子層合成技術及び複層化を持つ。複合原子層を合成する研究では、日本と英国が世界を大きくリードする立場にある。
- (4) 理論グループの越野・安藤、また若林らは、グラフェン理論研究で実験結果より前に理論を構築し、引用件数も高いなど、日本の理論の成果は世界に注目されている。

上記の特徴を生かすためには、研究の横の連携が強く望まれている。

(2) 応募領域に関連する国内・国外の研究動向等

グラファイト、炭素繊維、フラーレン、ナノチューブ、グラフェンの研究動向は、大きな歴史の上にある。これを概観し、現在の課題と世界のプロジェクト進行状況を示す。

(2-1) グラファイト・炭素繊維の研究動向 (1980年代まで)

グラファイト(黒鉛)は、炭素の最も安定した物質として天然に存在し、化学的に安定かつ電気を良く流す物質として、電池の電極などに使われてきた。また黒鉛は物質中最も高融点(4200)の物質であり、軽量化強度材料・電導性複合材料・熱伝導材料として産業に広く利用されている。物性物理学では、1947年ウオーレスが黒鉛の電子状態の計算によってその特異な電子状態が予想した。材料科学では1961年進藤はPAN(ポリアクリルニトリル)から炭素繊維を合成し産業に発展した。1974年遠藤は鉄触媒下で気相化学合成炭素繊維を合成、炭素繊維の高性能リチウム2次電池への基礎となった。

(2-2) フラーレン、ナノチューブの発見 (1985年以降、下線部は本研究メンバー。)

1985年クロトーらは、 C_{60} 分子(フラーレン)を発見。1990年クラッチマーは、抵抗加熱法によりフラーレン大量合成に成功、分子性固体を合成した。1991年斎藤(晋)は C_{60} 固体が半導体であることを示す。1992年谷垣は C_{60} 固体にアルカリ金属をドーブし、30Kを超える超伝導を発見。1992年にはスモーレイや篠原はフラーレンに金属を内包、またホーキンスや赤坂は化学修飾し、新しい有機分子化学に発展する。1991年飯島は、多層ナノチューブ(NT)を発見。1992年齋藤(理)らは『単層NTは立体構造(n,m)に依存し、金属にも半導体にもなる』ことを示す。1993年飯島、ベチューンは単層NTを合成。2002年丸山は、エタノール気相化学合成法(CVD)で単層NTを合成。2004年畠はスーパーグローブ法を開発、CVDでの大量合成の基礎となる。現在量産化に発展する。2005年野田は、コンビナトリアル法を用いてCVDでNT直径の制御や合成制御に成功。2003年にクルプケは、密度勾配遠心分離法で金属と半導体NT分離。2010年片浦らは、セファクリルゲルを用いて13種類の立体構造の分離に成功した。Web of Scienceによる2011年度グラフェン、NTの論文は、それぞれ5,673件、14,436件ある。

(2-3) 国内外でのグラフェンの研究動向と現在の課題 (2004年度以降)

2004年ノボセロフは、グラファイトをスコッチテープで劈開し、グラファイトの原子層(数層)を作製、また室温で $10,000\text{cm}^2/\text{Vs}$ という移動度を観測。2005年ノボセロフ、キムは半整数量子ホール効果を観測。2008年キムは、空中に架橋した1原子層のグラフェンの移動度を測定、室温で $200,000\text{cm}^2/\text{Vs}$ という驚異的な移動度を報告(のちに低温で $1,000,000\text{cm}^2/\text{Vs}$ までなり、2009年キム、アンドレイらの分数量子ホール効果発見に繋がる。)。超高速半導体素子としての応用が一気に注目した。また2層、3層のグラフェンが1層の場合と全く異なった輸送特性を示し、2008年越野は奇数(偶数)原子層の電子は有効質量のないディラック粒子(質量のあるフェルミ粒子)であることを説明。一連の発見の前に1999年安藤は後方散乱が消失する特殊な現象を、また1996年藤田・若林はリボンと呼ばれるグラフェンの帯状物質が特異な電子状態を持つことを予言していた。2011年原子層を回転し積層する「ねじった2層グラフェン」で、ねじる角度によって電子

応募領域に関連する国内・国外の研究動向等（つづき）

速度が変動することを発見。原子層での新たな手法に注目が集まった。しかし、(1)多くの実験で黒鉛単結晶を劈開した試料を用いるので、応用には直接使えない。また(2)半導体素子に応用するために2層グラフェンでエネルギーギャップを作ると移動度が小さくなる矛盾した問題がある。この他(3)分数量子ホール状態の解明（未解決）、(4)細線化をすると端の効果が大きくなる問題など、理論・実験ともに、困難である課題が山積する。

(2-5) グラフェン研究のアジア、ヨーロッパ、国内外での動き

韓国では、2010年成均館大での30インチのグラフェンCVD合成成功を受け、2011年国家プロジェクト（5年間、300億円）が開始。スマートフォンなどのタッチパネルの透明導電膜応用が焦点。2011年ヨーロッパ（EU）では、グラフェンフラグシップ（GF）と呼ばれるEU全体のプロジェクト（10年間、約1000億円）が開始。イギリスはGFと別に300億円、シンガポールでは20億円（2011年5年間）。米国では、コロンビア大学、MIT他が、2011年10億円規模の予算を獲得。インド・ブラジルでも、経済成長によって予算が投下、数億円規模の長期プロジェクトが進行中である。日本では、NEDOが技術研究組合単層CNT融合新材料研究開発機構(TASC)グラフェン事業部に14億円（2011年度）。しかし日本には、グラフェン研究に関する基礎研究の横断的プロジェクトはなく、世界の流れから孤立。スマートフォンの需要が高い中、タッチパネルに必要なインジウム（主な産地、中国）の高騰など社会的要請も高いにも関わらず、競争から取り残されている。

（3）準備状況等

(1) 進行中の新学術・特定領域研究との関係

本研究領域の立ち上げは4年前から構想があったが、昨年度まで申請を待っていた。その理由は、「ナノチューブエレクトロニクス」の特定領域研究（平成23年度終了）がすでに動いていたことがあり、メンバーの一部重複があったためである。昨年に、本課題で新学術領域研究に申請したが不採択（理由は(1)他にない特徴の記述の不足、(2)公募研究の採用枠が不十分）。本年度、全体の予算を縮小、公募枠を20%に増やし再申請に至っている。

(2) ナノカーボン研究会（財団法人・新世代研究所）、日韓およびA3国際会議

財団法人・新世代研究所において、本申請の代表者である齋藤はナノカーボン研究会を主宰（2008-2014）。年3回研究会を開催し、グラフェンの研究動向の情報を収集した。また、本物質群の日韓（2004-2009）、日中韓（2010-2012）の国際会議を毎年主催している。

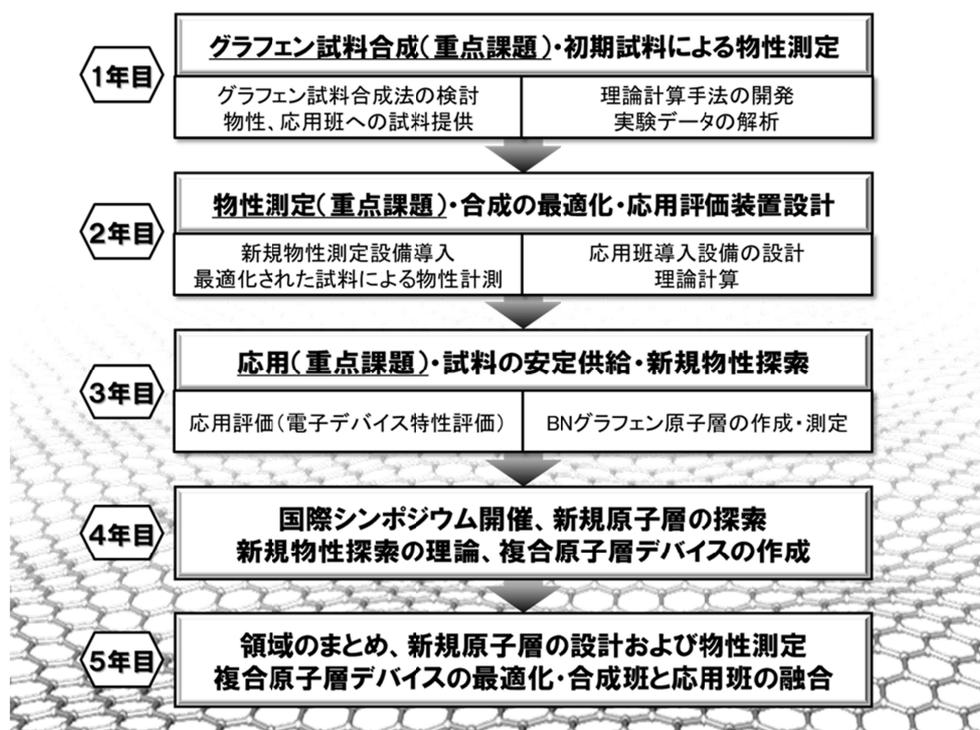
(3) 学会活動、国際会議

グラフェンの研究は、日本物理学会、応用物理学会、炭素材料学会などで早くから注目され、シンポジウムが多数開かれている。特にフラーレン・ナノチューブ学会は、グラフェンの重要性を認識し、名称をフラーレン・ナノチューブ・グラフェン学会に変更。しかし、所属学会の異なる分野間で集まる機会がほとんどなく、また世界の動向に対し「これで良いのか」という危機感を持つ声も多く、特に応用と基礎の接点を望む横の連携として、新学術領域研究を立ち上げる必要性が今回のメンバーを中心にあがっていた。

2 領域推進の計画・方法

(1) 領域推進の計画の概要

基本的な研究戦略：基本的な研究項目は、(1)グラフェンの試料合成法確立、(2)合成試料の物性評価と新物性探索、(3)合成試料によるデバイス作製、(4)原子層科学の理論的体系を構築、の4点である。計画の時間的流れと連携を下記概念図で示す。



領域推進計画の概念図

平成 25 年度：平成 25 年度は、(1)本研究に用いる試料を合成する装置を導入、初期合成を行う。とくに合成においては、SiC を高温熱処理する方法、酸化グラフェンを還元する方法、CVD (化学気相合成) 法、ナノチューブの内側の空間で有機分子を重合する方法、有機合成的にビルドアップ合成する方法によってグラフェン(リボン)を作製。それぞれの合成試料の評価を行う。(2)既存の試料や初期試料の物性測定ならびに物性測定装置やデバイス作製装置の設計を行う。(3)複合原子層の理論的設計を行い提案する。

平成 26 年度以降：平成 26 年度は、物性に重点をおき、適した物性測定環境を整備する。物性測定結果を理論に問う。合成は、大面積化、低欠陥試料の条件を探す。BN 原子層も合成する。平成 27 年度は、応用に重点をおき、物性測定された試料でデバイスを作る環境を実現する。理論は、試料評価の解析、物性測定の解析、新規物性の提案を行うなど、1年目から他の班と連携して進める。平成 28 年度・平成 29 年度は、領域の目標の達成を目指す。グラフェンが中心の原子層に BN 原子層を重ねるなど、複合デバイスの製作や、プロセス技術の確立、新物性の発見および理論的探究、などを実現する。

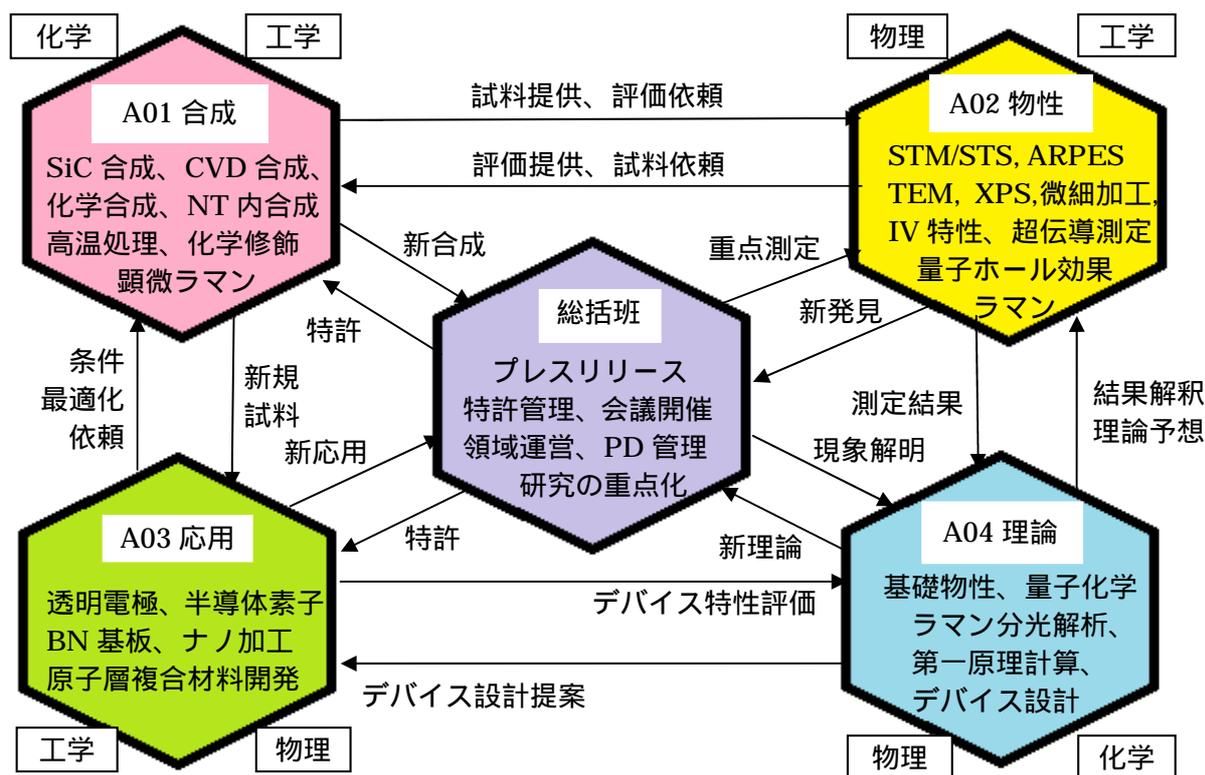
基本的な4つの研究計画 A01:合成、A02:物性、A03:応用、A04:理論(名称は略称)に対応し、大きな計画研究を4つ構成する。計画研究でカバーできない、新手法、新原子層の出現に柔軟に対応できるように、公募研究を総予算の20%に設定する。

領域推進の計画の概要（つづき）

研究目標、達成目標：この研究領域を4つの大きな計画研究に分け、計画研究間の連絡を密にとり目標を達成する。以下に計画研究の具体的な達成目標を設定した。

- (1) **合成：**グラフェン（GR）の高温合成手法を確立。大面積（10cm（CVD法）ウェハサイズ（SiC法））、低欠陥の良質試料作製。2層GR、GRリボンの化学合成。
- (2) **物性：**新規輸送特性の探索。複合原子層の新規物性の探索。光および磁気に対する応答・物性の探索。GR高次構造におけるスピン物性・超伝導の探索。
- (3) **応用：**良質透明電極の作製、h-BN複合原子膜の作製と物性班と協力して試料評価、大面積実用デバイスの作製。高速デバイス（1THz遮断周波数）の実現。
- (4) **理論：**試料輸送特性の評価と設計、擬スピン（電子状態を記述する量）に依存する物性の開拓、複合原子層の設計と評価。磁気特性の予想と評価。
- (5) **総括班：**公募研究の採択。博士研究員の採用。重点項目のサポート。各班の有機的連携強化。国際会議開催、国際共同研究の推進。新規原子層の柔軟で迅速な対応。

研究計画の必要性・有機的連携を図るための具体的方法：この領域が動くには、合成した原子層試料が必要であり、A01合成班は必須である。合成した試料をA02で物性評価し、A04の理論的な裏付けとともにフィードバックし、標準試料を確立することが必要である。最終的に応用に向けたデバイスをA03で作製・評価し、世界の動きに対抗することが必要である。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。総括班は、連携強化のためスケジュールを調整する。



有機的連携の概念図：領域内の班と連携の関係（対角線上の連携は、計画研究で記述）

(2) 各計画研究(総括班を除く)の研究組織及び研究内容の概要

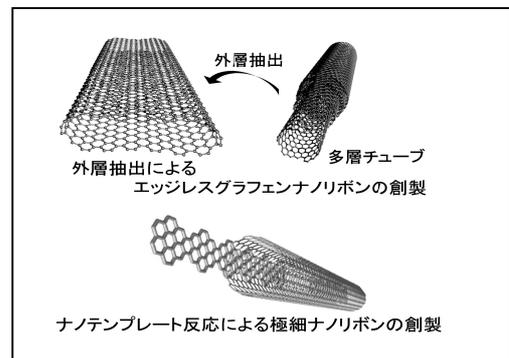
計画研究 A01: 「グラフェン関連原子層の新規合成法および大面積合成法の開発」

研究組織: 8名

研究代表者: 楠 美智子 (名古屋大学エコトピア科学研究所・教授・材料科学・研究総括)
 研究分担者: 斉木 幸一郎 (東京大学新領域創成科学研究科・教授・表面科学・化学剥離原子層)
 研究分担者: 野田 優 (早稲田大学理工学術院・教授・化学工学・CVD 合成)
 研究分担者: 北浦 良 (名古屋大学大学院理学研究科・准教授・物質科学・分子接合体合成)
 研究分担者: 依光 英樹 (京都大学大学院理学研究科・准教授・有機化学・原子層分子有機合成)
 研究分担者: 丸山 茂夫 (東京大学大学院工学系研究科・教授・機械工学・化学合成法開発)
 連携研究者: 篠原 久典 (名古屋大学大学院理学研究科・教授・物理化学・ナノリボン制御法)
 連携研究者: 大野 雄高 (名古屋大学大学院工学研究科・准教授・電子工学・試料特性評価)

研究内容: SiC 加熱によるウェハーサイズ・グラフェン合成 (楠)。化学修飾グラフェンの合成法とその還元法 (斉木)。CVD による高品位グラフェンの実用的合成法の開発 (野田)、高品質・単結晶グラフェンの CVD 合成 (丸山)、新規手法によるグラフェンナノリボンの創成 (北浦、右図)。多環芳香族分子の前駆体を設計しグラフェン合成 (依光)。

領域内の役割: 精密合成したグラフェンを物性班、応用班に提供 (A02, A03)。輸送・超伝導特性、電子状態等の評価 (A02, A04)・デバイスの試作 (A03)。

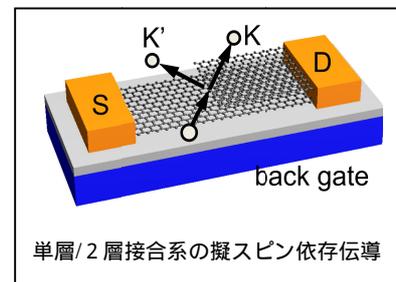


計画研究 A02: 「原子層の量子物性測定と新規物性探索」

研究組織: 7名

研究代表者: 長田 俊人 (東京大学物性研究所・准教授・物性物理・伝導測定と研究統括)
 研究分担者: 町田 友樹 (東京大学生産技術研究所・准教授・物性実験・伝導測定)
 研究分担者: 山本 倫久 (東京大学大学院工学系研究科・助教・物性実験・伝導測定)
 研究分担者: 八木 隆多 (広島大学先端物質科学研究科・准教授・物性物理・伝導測定)
 研究分担者: 劉 崢 (産業技術総合研究所・主任研究員・材料物性・原子像 TEM 観察)
 研究分担者: 菅原 克明 (東北大学原子分子材料科学高等研究機構・助教・光電子固体物性・ARPES 測定)
 連携研究者: 遠藤 彰 (東京大学物性研究所・助教・物性物理・伝導測定)

研究内容: 原子層グラフェンのディラック電子系が示す新奇電子状態や量子物性を、伝導測定を主軸に探索すると共に、実空間 TEM 観察と波数空間 ARPES 測定を併用してその解明を行う:
 (1)量子ホール伝導 (長田)、メゾスコピック伝導 (町田・八木・遠藤)、擬スピン依存伝導 (長田)、超伝導近接効果 (山本) 等の量子伝導現象の解明。(2)グラフェン/h-BN 素子やそのナノ構造の作製と物性 (町田・山本)。(3)端および欠陥の原子レベル観察 (劉)。(4)スピン分解 ARPES による電子状態測定 (菅原)。



領域内の役割: 合成班(A01)の試料評価、応用班(A03)への応用可能な物性の提案、理論班(A04)への未解明問題の提示を行う。

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」

研究組織：6名

研究代表者：長汐 晃輔（東京大学大学院工学系研究科・准教授・半導体工学・研究総括）

研究分担者：塚越 一仁（物質・材料研究機構・主任研究者・ナノ物性・輸送特性評価）

研究分担者：長谷川 雅考（産業技術総合研究所・研究チーム長・ナノ物性・透明導電膜）

研究分担者：上野 啓司（埼玉大学大学院理工学研究科・准教授・表面物性・MoS₂原子層）

連携研究者：渡邊 賢司（物質・材料研究機構・主幹研究員・結晶工学・BN原子層）

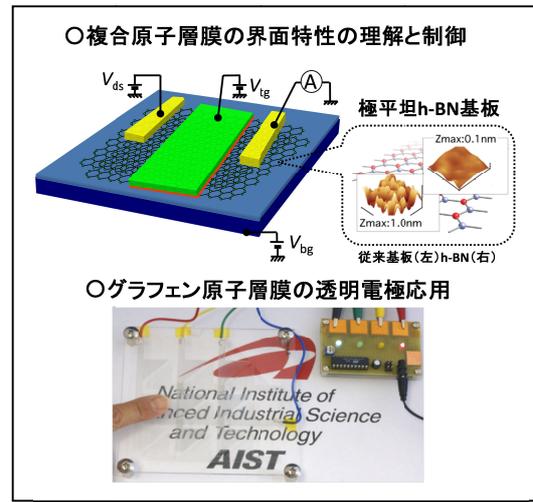
連携研究者：山田 貴壽（産業技術総合研究所・研究員・材料工学・透明導電膜）

研究内容：

物性と応用をつなぐ“応用物性”として原子層を複合化した場合の界面特性の理解と制御が最重要課題という認識の下、(1) 二次元絶縁性基板 (h-BN) 上グラフェントランジスタ特性を決める伝導要因解明(塚越)、(2) グラフェン/金属電極のコンタクト抵抗の低減(長谷川)、(3) 原子層 MoS₂ の輸送特性評価(上野)、(4) グラフェン上極薄膜絶縁体形成及び量子容量による状態密度評価(長汐)の研究を進める。

以上の界面特性の研究を基礎に、パッシブデバイスの中で最も普及が期待されるグラフェン原子層膜の透明電極応用(長谷川)に集中して研究を進める。

領域内の役割：合成試料のデバイス特性評価(A01)、六方晶窒化ホウ素原子膜の提供(A02)、デバイス特性情報の提供(A02, A04)。



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」

研究組織：8名

研究代表者：越野 幹人（東北大学大学院理学研究科・准教授・物性理論・研究総括）

研究分担者：齋藤 理一郎（東北大学大学院理学研究科・教授・物性理論・光物性、ラマン分光）

研究分担者：青木 秀夫（東京大学大学院工学系研究科・教授・物性理論・多体理論）

研究分担者：若林 克法（物質・材料研究機構・独立研究者・電子デバイスの輸送特性）

研究分担者：齋藤 晋（東京工業大学大学院理工学研究科・教授・物性理論・新物質設計）

連携研究者：安藤 恒也（東京工業大学理工学研究科・特命教授・物性理論・輸送理論）

連携研究者：初貝 安弘（筑波大数理物質科学研究科・教授・物性理論・トポロジカル多体効果）

連携研究者：島 信幸（兵庫県立大物質理学研究科・准教授・物性理論・超周期グラフェン理論）

研究内容：

グラフェンをはじめとする原子層系の1層からなる物質をテーマに、電子物性を記述する理論体系の構築と新規物性の理論からの提案を行う。(1) 原子層膜の電子状態、電気伝導特性を記述する基礎有効理論の確立(越野、安藤)(2) 原子層膜系の光物性：ラマン分光の理論、電子格子相互作用の研究(齋藤理)(3) 原子層膜系における量子ナノ構造の研究と新しい物性機能の創生(若林)(4) 多体問題としての原子層膜：電子間相互作用とトポロジカル多体状態、超伝導、強磁性の探究(青木)(5) 第一原理的手法による電子物性解明と新物質設計：構造修飾されたグラフェン、未知の原子層膜の存在可能性(齋藤晋)。

領域内の役割：量子輸送現象の解析(A02)、電子状態の解析(A02)、ラマン分光解析(A01, A02)、ナノ構造の解析(A03)、グラフェン電子デバイスの設計の理論的サポート(A03)、新規物性、新規デバイスの提案(A02, A03)。

(3) 公募研究の役割

公募研究は、2年目、4年目に2回、それぞれ各計画研究から6件（各回合計24件）単年度予算66,000千円（4年間総額264,000千円、全体の20%）を計上する。各計画研究の進行状況・必要性に応じて、採用件数は変動する場合がある。

(1) 新規手法の採用・研究戦略の強化

研究領域の分野は広く、複数の学会にまたがり相互の交流が少ない。グラフェンで別のプロジェクト（別の目的）が申請することを認識している。しかし本申請の研究の方向を変更して組織を統一するより、公募研究の間口を十分大きくとり広域の研究分野からの応募を可能にし、別の目的を持つ研究者との連携に配慮するのが適当であると判断した。領域全体の方針の変更にはならないが、領域の研究戦略の強化につながる。

(2) 関連研究者・若手研究者の採用

今回の領域の計画研究グループを選考するにあたって、今年度の重複規定の緩和があるにもかかわらず、研究計画（エフォート）上無理ということで辞退する重要な研究者がいた。この研究者に対しても、たとえば、4年目の公募研究に応募する形で、他の公募と同等の評価基準で、研究に参加することを期待している。実績のある研究者なので即戦力になる。また、研究期間の5年間に急速に注目される若手研究者を積極的に採用し、領域全体の活力を得るとともに、若い世代への研究の引き継ぎを図りたい。

(4) 研究支援活動の必要性

総括班において、博士研究員および領域運営をサポートするパートの事務員の人件費・謝金を計上し、領域の研究を支援する。また、一つの計画研究の組織が比較的大きいので、共用する設備・装置の購入は計画研究が主体的に行うが、総括班がその運用をサポートする。また一部の計画研究では、特にデータ整理などの謝金が必要である。

多くの実績のある実験系研究室では、新規装置よりむしろ研究を推進する博士研究者を予算希望する場合がある。しかし、該当する計画研究で必ずしも適した博士研究員が見つかるとは限らない。日本の社会で、先を考えずに博士研究員のポストを増やしていくのも領域代表者として良いとは考えていない。そこで領域の研究の特色を出すために、博士研究者の人件費を総括班で取り扱う方針をたてた。各計画研究内で5年間にわたる採用の計画を認めないで、研究の進展や必要性を評価し、総括班が博士研究員の公募を行い、適任の博士研究員を真に必要な計画研究に必要な期間だけ採用し、領域の研究支援活動に柔軟に寄与したいと考えている。

また領域全体および総括班の科研費の事務を補佐するパートの事務員を雇用し、研究会の開催、総括班の予算処理、国際シンポジウムの開催、領域のWeb管理などを支援いただきたいと考えている。また領域の研究活動を支えるため、特許やプレスリリースなどの業務を総括班で管理し、サポートする。領域の連携を高め、研究活動に専念できる利点がある。

3 領域マネジメント

(1) 総括班の役割、研究組織及び活動内容

(3-1) 総括班の役割

総括班の役割は、本領域を構成する4つの計画研究（合成、物性、応用、理論）相互のスケジュール調整と、公募研究の採用など領域全体の運営を行うことである。また、領域と外部との接点を作り、情報発信、説明責任を担う。総括班の構成は領域代表と各計画研究の代表者4名及び各計画研究の分担者の代表4名、評価委員3名、合計12名から構成する。総括班を構成するメンバーは、いろいろな地域、分野、世代から分散して選んだ。公募研究を重視し、総予算の20%を公募研究にあてた。また総括班は、計画研究相互の連携をサポートする。研究支援活動でも述べたが、博士研究員は基本的に総括班に属することとし、必要に応じて各計画研究に参画するような柔軟な体制を作る。これによって、計画研究ごとに博士研究員を確保する無駄を避ける。

(3-2) 総括班の構成員と役割

齋藤理一郎	固体物理学	研究代表者	領域全体の運営を総括班会議の合議のもと行う。領域主催の国際会議を開催する。公募研究の採択・博士研究員の公募のとりまとめを行う。
楠 美智子	結晶工学	研究分担者	合成班・材料科学の代表として、物性や応用班への試料提供の窓口としてとりまとめを行う。市民講演会など社会貢献担当。
依光 英樹	有機化学	研究分担者	合成における有機化学的手法、および化学薬品に関する専門知識の提供。
長汐 晃輔	半導体工学	研究分担者	応用班の代表として、合成試料の需要・供給スケジュールを決める。また領域の広報担当として、プレスリリースなどを担当する。
長田 俊人	物性物理	研究分担者	物性班の代表。若手研究者の研究環境改善担当。共通機器管理を担当する。
塚越 一仁	デバイス工学	研究分担者	デバイス装置設計・管理を担当。また領域の特許担当として、特許等の取得をサポートする。
上野 啓司	材料化学	研究分担者	領域の事務的处理をサポートする。計画研究間のスケジュール調整。
越野 幹人	物性理論	研究分担者	理論班の代表。物性実験の結果の解釈などに関する窓口となる。事務担当者として、領域全体の事務を担当する。
若林 克法	物性理論	研究分担者	理論班の計画研究の運営をサポートする。領域のWebページの管理を、領域の博士研究員とともにやる。
榎 敏明	物理化学	連携研究者	評価委員（化学の立場から）
家 泰弘	低温物理学	連携研究者	評価委員（物理の立場から）
樽茶 清悟	半導体工学	連携研究者	評価委員（物理・工学の立場から）

(2) 領域代表者の領域推進に当たってのビジョン及びマネジメント実績

(2-1) 領域代表者の領域推進の基本的な考え方

本領域の特徴と組織：グラフェンは注目を集める要素を多くもち、大きなプロジェクトを推進する国が多いが、ほとんどが応用開発研究である。本領域は、同じ視点で競争することは考えていない。カーボンは容易な材料ではなく、長い歴史の示す通り忍耐強い基礎研究が必要だからである。「グラフェンだから予算がおりる」というような安易な考えは毛頭ない。腰を据えた基礎研究を長年の信頼・協力関係で実現したいと願っている。

領域は人と人をつなげる機会：今回の領域設定でグラフェン研究者の分野が広いことは、大問題であった。意見を統一し統合領域として提案するような議論も試みたが、予算規模も目標設定も困難であった。我々の合意は、別の提案も尊重し、本申請の目的を超えて連携できる空間を作っていこうという点である。その意味で本領域が採用されたとしても、公募研究で他の提案が生きる形を目指し、現状を大きく改善したいと考えている。

プレゼンテーション重視：異なる分野の人がお互い影響しあうには、聞き手を意識したプレゼンが重要である。また聞き手も他の分野を理解し、適切に評価することが重要である。公募ではビジョンを重視して採用したい。また社会へのアピールを重視する。

若手育成と世代の交代を意識：代表がナノチューブの研究を始めたのは33歳の時であった。あれから22年がたち、ナノカーボン研究のシニアなメンバーは60代に達し、次の世代が准教授として活躍し始めた。世代の交代を意識し、若手が国際的にも活躍できるような場を提供したい。総括班にも30代の若手を積極的に起用、領域の活性化を図る。

国際社会での貢献：グラフェンの研究ほど海外での研究動向に大きく影響を受ける領域はない。日本は、ナノカーボンでは世界をリードしてきた。しかし、必ずしも直接国際社会に貢献したわけではない。日本は、国際社会での科学の貢献を意識すべきであろうと考えている。計画研究班が外国にいつて行う共同研究も領域としてサポートしたい。

(2-2) マネジメント実績

以下のマネジメント実績がある。主に外国との活動が中心である。

- (1) 日本学術振興会の日米共同研究事業、代表者(1998-2000)
- (2) カーボンナノチューブの国際会議(NT)アドバイザーメンバー(2008, 2011-)
- (3) ナノチューブの光物性の国際会議(WONTON 隔年開催)主催者(2009)。アドバイザーボード(2009-)
- (4) 日本学術振興会の日本とインドの2国間のシンポジウム主催者(2012)
- (5) 日本と韓国とのナノチューブ会議、主催者(2005)、日本側代表(6回 2004-2009)
- (6) 日本と中国と韓国におけるナノカーボンのシンポジウム(2回、2010-)議長。
- (7) (財)新世代研究所、評議員(2010-)、ナノカーボン研究会代表(2008-14)。
- (8) 若手育成のためのナノチューブ・グラフェンの蔵王研究会を主催(2008-)
- (9) 米国NSF・JSPSナノジャパン・テラヘルツ・プロジェクトの組織委員(2011-)。
- (10) 一般および高校生相手の講演会、23回。外国での学部学生対象講演会3回。

4 研究経費

(1) 研究期間との関連性を含めた研究経費の必要性

本領域計画を5年間で進めていくうえで、すべての実験系の設備新設を単年度予算で賄うのは困難であるので、3年目まで各年度の重点配分を検討した。

平成25年度：合成班（A01 計画研究）に重点配備する。SiC からグラフェンを低欠陥で合成するためには、真空下で高温に加熱する装置（特注）が必要。また既存のSEMに取り付けて、酸化グラフェン還元効果の基板金属面方位依存性を評価する結晶方位解析装置が必要である。直径10cmのグラフェン共同利用試料作製のために大面積グラフェンCVD装置が平成25年度に必要である。ナノチューブ内で合成した試料を多量に調製するために大型遠心分離装置が必要。また、有機合成他で試薬などの消耗品が必要である。物性班（A02）では、角度分解高電子分光装置に高感度スピン検出器（特注）を付け、グラフェンのスピンに依存した電子状態を検出する。この装置は、組み立て、調整に時間がかかり、汎用性が高いので、平成25年度に導入する。外国との一部共同研究・グラフェンの国際会議で情報収集のために外国出張が必要である。総括班は、博士研究員を公募をおこなう。博士研究員、公募研究採用のための情報収集のため、研究集会を開催する。総括班は、情報管理サーバーを立ち上げる。

平成26年度：物性班（A02）に重点配分する。量子ホール伝導などの強磁場下の量子輸送現象を詳しく調べるための多目的物性測定プラットフォームとして15/17T超伝導磁石システム一式が必要である。またh-BN上へのグラフェン原子層を転写するのに必要なアライメントステージ（特注）が複合原子層制作に必要である。これは初年度に導入すべき装置であるが、設計に時間がかかるので2年目にした。電子線損傷をより低減させることで、これまでよりも高解像度の炭素原子観察を可能にするため電子顕微鏡用高感度CCDカメラが共通試料評価のために必要である。有機合成・物性実験他で試薬・真空部品などの消耗品が、また外国との一部共同研究・グラフェンの国際会議で情報収集のために外国出張が必要である。一部の装置組み立てに対して謝金が必要である。

平成27年度：応用班（A03）に重点配分する。このデバイスを作る装置のほとんどが特注で、詳細な設計や予備実験が必要であるので、3年度目に準備した。予備実験は既存の装置で行うので、計画研究に支障はない。透明デバイス専用の品質向上のための電極形成装置（特注）を導入する。デバイス動作下で試料評価を同時に行うため、顕微ラマン分光装置が必要。欠陥フリーな絶縁膜堆積手法の構築のために、長堆積距離の電子ビーム堆積装置が必要である。高品質大型窒化ホウ素原子層成長の雰囲気制御用に高温炉（特注）が必要である。理論（A04）班は、それぞれの計算機の更新時期に合わせて計算機の更新が必要。また、3年目以降は、研究成果等を国際会議で発表し、情報収集するため、国内外の出張が必要。総括班は2回目の博士研究員を公募する。

平成28・29年度：それぞれ、研究推進のための消耗品、旅費などが必要。総括班は4年目に国際会議を開催予定のため、会議費が必要。領域のとりまとめのためのWebサーバーの更新費用も、1年目と4年目に計上する。

5 主要研究業績

(1) 領域代表者

領域代表者 (A04 研究分担者) 齋藤理一郎

1. Zone folding effect in Raman G-band intensity of twisted bilayer graphene, K. Sato, R. Saito, C. Cong, T. Yu, M. S. Dresselhaus, Phys. Rev. B 86, 125414-1-6 (2012). (査読有)
2. Phonon self-energy corrections to nonzero wave-vector phonon modes in single-layer graphene, P. T. Araujo, D. L. Mafra, K. Sato, R. Saito, J. Kong, M. S. Dresselhaus, Phys. Rev. Lett. 109, 046801-1-5 (2012). (査読有)
3. Using the G' Raman cross-section to understand the phonon dynamics in bilayer graphene systems, D. L. Mafra, P. T. Araujo, K. Sato, R. Saito, M. S. Dresselhaus, J. Kong, Nano Lett. 12, 2883-2887 (2012). (査読有)
4. Raman spectroscopy in Graphene Related Systems, *A. Jorio, R. Saito, G. Dresselhaus, M. S. Dresselhaus, Wiley-VCH, Weinheim Germany, pp. 1-354 (2011), 著書. (査読有)
5. Raman spectroscopy of graphene and carbon nanotubes, *R. Saito, M. Hofmann, G. Dresselhaus, A. Jorio, M. S. Dresselhaus, Advances in Physics 60, 413-550 (2011). (査読有)
6. Raman spectra of out-of-plane phonons in bilayer graphene, K. Sato, J. S. Park, *R. Saito, C. Cong, T. Yu, C. H. Lui, T. F. Heinz, G. Dresselhaus, M. S. Dresselhaus, Phys. Rev. B 84, 035419-1-5 (2011). (査読有)
7. CNT とグラフェン研究の展開と焦点, *齋藤理一郎, 応用物理 Vol 79, No. 10, 890-895 (2010). (査読有)

(2) 各計画研究の研究代表者及び研究分担者

A01 研究代表者 楠 美智子

1. Epitaxial growth of boron-doped graphene by thermal decomposition of B₄C, *W. Norimatsu, K. Hirata, Y. Yamamoto, S. Arai, M. Kusunoki, J. Phys.: Cond. Matt. 24, 314207-1-3 (2012). (査読有)
2. Patterning of Aligned CNT Films Using SiO₂ Particles Monolayer as a Mask, K. Matsuda, W. Norimatsu, *M. Kusunoki, e-J. Surf. Sci. Nanotech. 10, 198-202 (2012). (査読有)
3. Transport Properties of Closely-Packed Carbon Nanotubes Film on SiC Tuned by Si-Doping, *W. Norimatsu T. Maruyama, K. Yoshida, K. Takase, M. Kusunoki, Appl. Phys. Express 5, 105102-1-3 (2012). (査読有)
4. Formation mechanism of graphene layers on SiC (000-1) in a high-pressure argon atmosphere, *W. Norimatsu, J. Takada, M. Kusunoki, Phys. Rev. B 84, 035424-1-6 (2011). (査読有)
5. Selective Formation of ABC-stacked graphene layers on SiC(0001), *W. Norimatsu, M. Kusunoki, Phys. Rev. B 81,161410-1-4 (2010). (査読有)

A01 研究分担者 齊木幸一朗

1. Electronic Structure and Graphenization of Hexaphenylborazine, G. Imamura, C. Chang, Y. Nabaie, M. Kakimoto, S. Miyata, *K. Saiki, J. Phys. Chem. C 116, 16305-16310 (2012). (査読有)
2. Growth of Graphene on Cu by Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition, T. Terasawa, *K. Saiki, Carbon 50, 869-874 (2012). (査読有)
3. Synthesis of Nitrogen-Doped Graphene by Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition, T. Terasawa, *K. Saiki, Jpn. J. Appl. Phys. 51, 055101 (2012). (査読有)

A01 研究分担者 野田 優

1. One second growth of carbon nanotube arrays on a glass substrate by pulsed-current heating, K. Sekiguchi, K. Furuichi, Y. Shiratori, *S. Noda, Carbon 50, 2110-2118 (2012). (査読有)
2. Sub-millimeter-long carbon nanotubes repeatedly grown on and separated from ceramic beads in a single fluidized bed reactor, D.Y. Kim, H. Sugime, K. Hasegawa, T. Osawa, *S. Noda, Carbon 49, 1972-1979 (2011). (査読有)
3. Millimeter-tall single-walled carbon nanotubes rapidly grown with and without water, K. Hasegawa, *S. Noda, ACS Nano 5, 975-984 (2011). (査読有)

A01 研究分担者 北浦 良

1. Fabrication and Characterization of Graphene/Hexagonal Boron Nitride Hybrid Sheets, Y. Miyata, E. Maeda, K. Kamon, R. Kitaura, Y. Sasaki, S. Suzuki, H. Shinohara, Appl. Phys. Express 5, 085102 (2012). (査読有)
2. Dimerization-Initiated Preferential Formation of Coronene-Based Graphene Nanoribbons in Carbon Nanotubes, M. Fujihara, Y. Miyata, R. Kitaura, Y. Nishimura, C. Camacho, S. Irle, Y. Iizumi, T. Okazaki, H. Shinohara, J. Phys. Chem. C 116, 15141-15145 (2012). (査読有)
3. Preparation and Observation of an Atomic Layer of Gold Formed on the Surface of Graphene, Y. Sasaki, R. Kitaura, Y. Yamamoto, S. Arai, S. Suzuki, Y. Miyata, H. Shinohara, Appl. Phys. Express 5, 065103 (2012). (査読有)

A01 研究分担者 丸山 茂夫

1. Diameter Modulation of Vertically Aligned Single-Walled Carbon Nanotubes, *R. Xiang, E. Einarsson, Y. Murakami, J. Shiomi, S. Chiashi, Z.-K. Tang, *S. Maruyama, ACS Nano 6, 7472-7479 (2012). (査読有)
2. Diameter-Controlled and Nitrogen-Doped Vertically Aligned Single-Walled Carbon Nanotubes, T. Thurakitserree, C. Kramberger, P. Zhao, S. Aikawa, S. Harish, S. Chiashi, E. Einarsson, *S. Maruyama, Carbon 50, 2635-2640 (2012). (査読有)
3. Deformable Transparent All-Carbon-Nanotube Transistors, S. Aikawa, E. Einarsson, T. Thurakitserree, S. Chiashi, E. Nishikawa, *S. Maruyama, Appl. Phys. Lett. 100, 063502-1-4, (2012). (査読有)

A01 研究分担者 依光 英樹

1. Synthesis of a Library of Fluorescent 2-Aryl-3-trifluoromethylnaphthofurans from Naphthols by Using a Sequential Pummerer Annulation/Cross-coupling Strategy and Their Photophysical Properties, Y. Ookubo, A. Wakamiya, *H. Yorimitsu, A. Osuka, Chem. Eur. J. 17, 12690-12697 (2012). (査読有)
2. Effective *meso*-Fabrications of Subporphyrins, M. Kitano, S. Hayashi, T. Tanaka, H. Yorimitsu, N. Aratani, *A. Osuka, Angew. Chem. Int. Ed. 51, 5593-5597 (2012). (査読有)
3. Palladium-Catalyzed beta-Selective Direct Arylation of Porphyrins, Y. Kawamata, S. Tokuji, *H. Yorimitsu, *A. Osuka, Angew. Chem. Int. Ed. 50, 8867-8870 (2011). (査読有)

A02: 研究代表者 長田 俊人

1. Magnetotransport in organic Dirac fermion system at the quantum limit: Interlayer Hall effect and surface transport via helical edge states, *T. Osada, Phys. Status Solidi B 249, 962-966 (2012). (査読有)
2. Observation of Angle-Dependent Stark Cyclotron Resonance in a Layered Organic Conductor, A. Kumagai, T. Konoike, K. Uchida, *T. Osada, J. Phys. Soc. Jpn. 81, 023708/1-4 (2012). (査読有)
3. Specific Heat of the Multilayered Massless Dirac Fermion System, *T. Konoike, K. Uchida, T. Osada, J. Phys. Soc. Jpn. 81, 043601/1-4 (2012). (査読有)

4. Quantum Hall Transport across Monolayer-Bilayer Boundary in Graphene, A. Tsukuda, H. Okunaga, D. Nakahara, K. Uchida, T. Konoike, *T. Osada, J. Phys.: Conf. Ser. 334, 012038/1-5 (2011). (査読有)
5. Anomalous Interlayer Hall Effect in Multilayer Massless Dirac Fermion System at the Quantum Limit", *T. Osada, J. Phys. Soc. Jpn. 80, 033708/1-4 (2011). (査読有)

A02: 研究分担者 町田 友樹

1. Boundary Scattering in Ballistic Graphene, *S. Masubuchi, K. Iguchi, T. Yamaguchi, M. Onuki, M. Arai, K. Watanabe, T. Taniguchi, T. Machida, Phys. Rev. Lett. 109, 036601-1-5 (2012). (査読有)
2. Atomic force microscopy-based tunable local anodic oxidation of graphene, *S. Masubuchi, M. Arai, T. Machida, Nano Lett. 11, 4542-4545 (2011). (査読有)
3. Tunnel spin injection into graphene using Al₂O₃ barrier grown by atomic layer deposition on functionalized graphene surface, T. Yamaguchi, S. Masubuchi, K. Iguchi, *R. Moriya, T. Machida, J. Magn. Mater. 324, 849 (2012). (査読有)

A02: 研究分担者 山本 倫久

1. Stacking-order dependent transport properties of trilayer graphene, *S. H. Jhang, M. F. Craciun, S. Schmidmeier, S. Tokumitsu, S. Russo, M. Yamamoto, Y. Skourski, J. Wosnitza, S. Tarucha, J. Eroms, C. Strunk, Phys. Rev. B 84, 161408-1-4 (2011). (査読有)
2. Electron surfing on a sound wave as a platform for quantum optics with flying electrons, S. Hermelin, S. Takada, M. Yamamoto, S. Tarucha, A. D. Wieck, L. Saminadayar, *C. Bäuerle, *T. Meunier, Nature 477, 435-438 (2011). (査読有)
3. Trilayer graphene is a semimetal with a gate-tunable band overlap, M. F. Craciun, S. Russo, M. Yamamoto, J. B. Oostinga, A. F. Morpurgo, S. Tarucha, Nature Nanotechnology 4, 383-388 (2009). (査読有)

A02: 研究分担者 八木 隆多

1. Observing Altshuler–Aronov–Spivak Oscillation in a Hexagonal Antidot Array of Monolayer Graphene, *R. Yagi, M. Shimomura, F. Tahara, H. Kobara, S. Fukada, J. Phys. Soc. Jpn. 81, 063707-1-4 (2012). (査読有)
2. Magnetoresistance oscillation at charge neutrality point in monolayer graphene due to potential fluctuation, *R. Yagi, S. Fukada, H. Kobara, Y. Shintani, N. Ogita, M. Udagawa, J. Phys. Conf. Ser. 232, 012013 (2010). (査読有)
3. Charge Imbalance Relaxation Due to Pair Breaking Perturbation by Magnetic Field, K. Tsuboi, *R. Yagi, J. Phys. Soc. Jpn. 79, 013704 (2010). (査読有)

A02: 研究分担者 劉 暉

1. Identification of active atomic defects in a monolayered tungsten disulphide nanoribbon, *Z. Liu, K. Suenaga, Z. Wang, Z. Shi, S. Iijima, Nature Commun. 2, 213 (2011). (査読有)
2. Imaging the Structure, Symmetry, and Surface-Inhibited Rotation of Polyoxometalate Ions on Graphene Oxide, *J. Sloan, Z. Liu, K. Suenaga, *N. R. Wilson, P. A. Pandey, L. M. Perkins, J. P. Rourke, I. J. Shannon, Nano Lett. 10, 4600-4606 (2010). (査読有)
3. Open and Closed Edges of Graphene Layers, *Z. Liu, K. Suenaga, P. JF Harris, S. Iijima, Phys. Rev. Lett. 102, 015501 (2009). (査読有)

A02: 研究分担者 菅原 克明

1. Ca-intercalated bilayer graphene: thinnest limit of superconducting graphite intercalation compounds C₆Ca, K. Kanetani, *K. Sugawara, T. Sato, R. Shimizu, K. Iwaya, T. Hitosugi, T. Takahashi, Proc. Natl. Acad. Sci. in press (2012). (査読有)
2. Fabrication of Li-intercalated bilayer graphene, *K. Sugawara, K. Kanetani, T. Sato, T. Takahashi, AIP Advances 1, 022103-1-5 (2011). (査読有)
3. Fermi-surface-dependent superconducting gap, K. Sugawara, *T. Sato, T. Takahashi, Nature Phys. 5, 40-43 (2009). (査読有)

A03: 研究代表者 長汐 晃輔

1. Is graphene contacting with metal still graphene?, *K. Nagashio, T. Moriyama, R. Ifuku, T. Yamashita, T. Nishimura, A. Toriumi, IEEE International Electron Device Meeting (IEDM) Tech. Dig. 27-30 (2011). (査読有)
2. Electrical transport properties of graphene on SiO₂ with specific surface structures, *K. Nagashio, T. Yamashita, T. Nishimura, K. Kita, A. Toriumi, J. Appl. Phys. 110, 024513-1-6 (2011). (査読有)
3. Density-of-States Limited Contact Resistance in Graphene Field-Effect Transistors, *K. Nagashio, A. Toriumi, Jpn. J. Appl. Phys. 50, 070108-1-6 (2011). (査読有, 解説論文)
4. Contact resistivity and current flow path at metal/graphene contact, *K. Nagashio, T. Nishimura, K. Kita, A. Toriumi, Appl. Phys. Lett. 97, 143514-1-3 (2010). (査読有)
5. Systematic investigation of intrinsic channel properties and contact resistance on mono- and multilayered graphene FET, *K. Nagashio, T. Nishimura, K. Kita, A. Toriumi, Jpn. J. Appl. Phys. 49, 051304-1-6 (2010). (査読有)

A03: 研究分担者 塚越 一仁

1. Quantitative Raman Spectrum and Reliable Thickness Identification for Atomic Layers on Insulating Substrates, S.-L. Li, H. Miyazaki, H. Song, H. Kuramochi, S. Nakaharai, K. Tsukagoshi, ACS Nano 6, 7381-7388 (2012). (査読有)
2. Origin of the relatively low transport mobility of graphene grown through chemical vapor deposition, H. S. Song, S. L. Li, H. Miyazaki, S. Sato, K. Hayashi, A. Yamada, N. Yokoyama, K. Tsukagoshi, Sci. Rep. 2, 00337/1-6 (2012). (査読有)
3. Unipolar transport in bilayer graphene controlled by multiple p-n interfaces, H. Miyazaki, S.-L. Li, S. Nakaharai, K. Tsukagoshi, Appl. Phys. Lett. 100, 163115/1-4 (2012). (査読有)

A03: 研究分担者 長谷川雅考

1. A roll-to-roll microwave plasma chemical vapor deposition process for the production of 294mm width graphene films at low temperature, T. Yamada, J. Kim, M. Ishihara, *M. Hasegawa, S. Iijima, Carbon 50, 2615-2619 (2012). (査読有)
2. Low-temperature synthesis of large-area graphene-based transparent conductive films using surfacewave plasma chemical vapor deposition, J. Kim, M. Ishihara, Y. Koga, K. Tsugawa, *M. Hasegawa, S. Iijima, App. Phys. Lett. 98, 091502-1-091502-3 (2011). (査読有)
3. Direct evidence of advantage of Cu(111) for graphene synthesis by using Raman mapping and electron backscatter diffraction, M. Ishihara, Y. Koga, J. Kim, K. Tsugawa, *M. Hasegawa, Mater. Lett. 65, 2864-2867 (2011). (査読有)

A03: 研究分担者 上野 啓司

1. Efficient Crystalline Si/Poly(ethylene dioxythiophene):Poly(styrene sulfonate):Graphene Oxide Composite Heterojunction Solar Cells, M. Ono, Z. Tang, R. Ishikawa, T. Gotou, K. Ueno, *H. Shirai, Appl. Phys. Express 5, 032301-1-3 (2012). (査読有)
2. Efficient Organic Photovoltaic Cells Using Hole-Transporting MoO₃ Buffer Layers Converted from Solution-Processed MoS₂ Films, S. Kato, R. Ishikawa, Y. Kubo, H. Shirai, *K. Ueno, Jpn. J. Appl. Phys. 50, 071604-1-5 (2011). (査読有)
3. Fabrication of Transparent and Flexible Organic Field-Effect Transistors with Solution-Processed Graphene Source-Drain and Gate Electrodes, K. Suganuma, S. Watanabe, T. Gotou, *K. Ueno, Appl. Phys. Express 4, 021603-1-3 (2011). (査読有)

A04: 研究代表者 越野 幹人

1. Energy Spectrum and Quantum Hall Effect in Twisted Bilayer Graphene, *P. Moon, M. Koshino, Phys. Rev. B 85, 195458-1-9 (2012). (査読有)
2. Orbital magnetic susceptibility of finite-sized graphene, *Y. Ominato, M. Koshino, Phys. Rev. B 85, 165454-1-9 (2012). (査読有)
3. Chiral orbital current and anomalous magnetic moment in gapped graphenes, *M. Koshino, Phys. Rev. B 84, 125427-1-11 (2011). (査読有)
4. Landau level spectra and the quantum Hall effect of multilayer graphene, *M. Koshino, E. McCann, Phys. Rev. B 83, 165443-1-9 (2011). (査読有)
5. Interface Landau levels in graphene monolayer-bilayer junction, *M. Koshino, T. Nakanishi, T. Ando, Phys. Rev. B 82, 205436-1-12 (2010). (査読有)

A04: 研究分担者 青木 秀夫

1. Topologically protected Landau levels in bilayer graphene in finite electric fields, *T. Kawarabayashi, Y. Hatsugai, H. Aoki, Phys. Rev. B 85, 165410-1-5 (2012). (査読有)
2. Magneto-orbital effect without spin-orbit interactions --- noncentrosymmetric zeolite-templated carbon structure, Phys. Rev. B, *T. Koretsune, R. Arita, H. Aoki, Phys. Rev. B 86, 125207-1-5 (2012). (査読有)
3. Changing the interaction of lattice fermions dynamically from repulsive to attractive in ac fields, *N. Tsuji, T. Oka, P. Werner, H. Aoki, Phys. Rev. Lett. 106, 236401-1-4 (2011). (Editors' Suggestion; Viewpoint) (査読有)

A04: 研究分担者 若林 克法

1. Electronic states and local density of states in graphene with a corner edge structure, *Y. Shimomura, Y. Takane, K. Wakabayashi, J. Phys. Soc. Jpn. 80, 0547101-1-9 (2011). (査読有)
2. Electronic states of graphene nanoribbons with analytic solutions, *K. Wakabayashi, K. Sasaki, T. Nakanishi, T. Enoki, Sci. Technol. Adv. Mater. 11, 054504-1-18 (2010). (査読有)
3. Edge States and Flat Bands of Graphene Nanoribbons with Edge Modification, *K. Wakabayashi, S. Okada, R. Tomita, S. Fujimoto, Y. Natsume, J. Phys. Soc. Jpn. 79, 034706-1-7 (2010). (査読有)

A04: 研究分担者 齋藤 晋

1. Electronic Properties of Graphene/h-BN Bilayer Superlattices, *Y. Sakai, S. Saito, J. Phys. Soc. Jpn. 81, 103701-1-4 (2012). (査読有)
2. Electronic structure and stability of layered superlattice composed of graphene and boron nitride monolayer, *Y. Sakai, T. Koretsune, S. Saito, Phys. Rev. B 83 (20), 205434-1-8 (2011). (査読有)
3. Body-Centered Tetragonal C₄: A Viable *sp*³ Carbon Allotrope, K. Umemoto, R. M. Wentzcovitch, *S. Saito, T. Miyake, Phys. Rev. Lett. 104, 125504 (2010). (査読有)