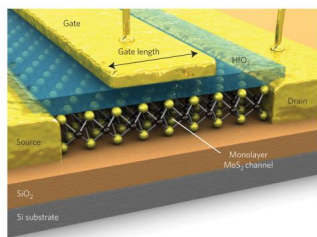
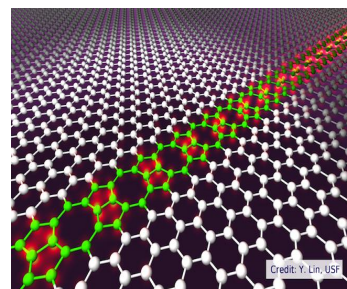


「原子層科学」



齋藤 理一郎
東北大学理学研究科



1. 原子層とは？ : 原子層の魅力と可能性
2. 領域の達成度 : 世界が注目する成果、戦略
3. 領域の存在意義 : 領域内外との共同研究の推進
4. 領域の役目 : 社会貢献、講習会、若手育成
5. まとめ : 現状と新たな課題

原子層とは？： 原子一層でできた最も薄い物質

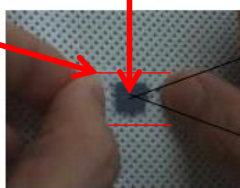
グラフェン = グラファイト(黒鉛)の1原子層



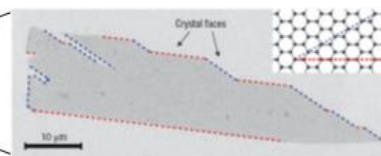
ガイムとノボセロフ



粘着テープ



“はく離”
で1原子層



光学顕微鏡で層数決定
(1層光吸収2%)

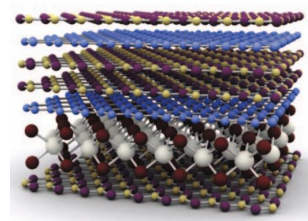
原子層のもつ驚異的な性質 (次頁以降) → 次世代物質

h-BN, MoS₂, RuO₂ 原子層の出現 → 複合原子層の設計

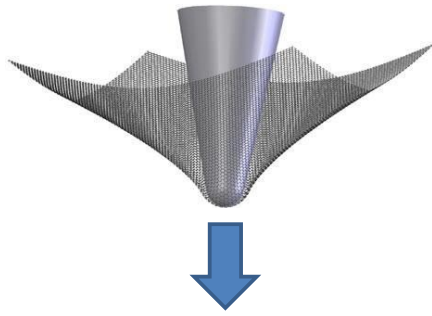
広分野への展開 → 国際競争強化の必要性

→ 新学術領域「原子層科学」

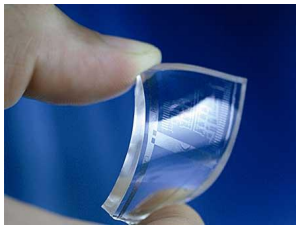
2013年スタート



・強靱で柔軟



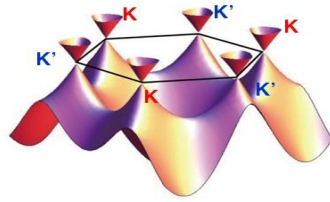
・フレキシブル透明導電体



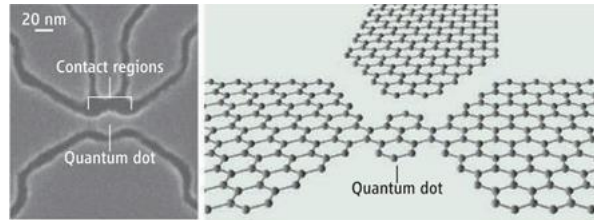
平面構造・熱的安定性

・桁違いの電気伝導性(室温)

→ 質量ゼロの電子: 秒速1000km



・原子層高速デバイス



止まらない電子

ノーベル物理学賞(2010) 研究の始まりに過ぎない



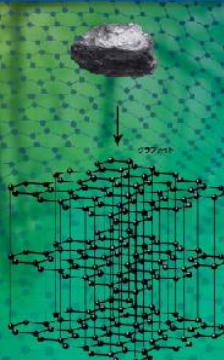
スウェーデン王立科学アカデミーは、17次元物理学
グラフェンの発見者安德烈・ゲイムとコンスタンチン・ノボシロフに
2010年のノーベル物理学賞を授与することを決定した。

The Nobel Prize 2010 in Physics



鉛筆と粘着テープ

青鉛の鉛芯が削れ出るように、2次元のグラフェンシートは、2004年、ワシントン州立大学の研究者によって発見された。グラフェンシートは、炭素原子の六角形格子構造を持つ。グラフェンシートは、非常に柔軟で、透明で、導電性を持つ。グラフェンシートは、さまざまな用途に使用されている。グラフェンシートは、さまざまな用途に使用されている。



αからΩへ

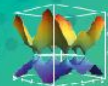
グラフェンでは、単層から多層までさまざまな厚さのグラフェンシートを合成することができる。グラフェンシートは、さまざまな用途に使用されている。グラフェンシートは、さまざまな用途に使用されている。

グラフェン - 完璧な原子格子

グラフェンは炭素の単層シートで、物質として非常に軽い（わずか0.77mg/m²）で、非常に強い（引っ張り強度は鋼鉄の100倍以上）性質を持つ。電気伝導性も非常に高く、室温で桁違いの電気伝導性を持つ。グラフェンシートは、さまざまな用途に使用されている。グラフェンシートは、さまざまな用途に使用されている。

パラドクスの世界

アンドレイ・ゲイムとコンスタンチン・ノボシロフは、2004年にグラフェンシートを発見した。グラフェンシートは、炭素原子の六角形格子構造を持つ。グラフェンシートは、非常に柔軟で、透明で、導電性を持つ。グラフェンシートは、さまざまな用途に使用されている。グラフェンシートは、さまざまな用途に使用されている。



グラフェンシートは、炭素原子の六角形格子構造を持つ。グラフェンシートは、非常に柔軟で、透明で、導電性を持つ。グラフェンシートは、さまざまな用途に使用されている。グラフェンシートは、さまざまな用途に使用されている。

グラフェンシートは、炭素原子の六角形格子構造を持つ。グラフェンシートは、非常に柔軟で、透明で、導電性を持つ。グラフェンシートは、さまざまな用途に使用されている。グラフェンシートは、さまざまな用途に使用されている。



夢の世界

グラフェンシートは、炭素原子の六角形格子構造を持つ。グラフェンシートは、非常に柔軟で、透明で、導電性を持つ。グラフェンシートは、さまざまな用途に使用されている。グラフェンシートは、さまざまな用途に使用されている。



アンドレイ・ゲイム



コンスタンチン・ノボシロフ

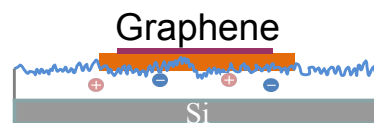
遊び心を持つ2人の共同研究者

アンドレイ・ゲイムとコンスタンチン・ノボシロフは、2004年にグラフェンシートを発見した。グラフェンシートは、炭素原子の六角形格子構造を持つ。グラフェンシートは、非常に柔軟で、透明で、導電性を持つ。グラフェンシートは、さまざまな用途に使用されている。グラフェンシートは、さまざまな用途に使用されている。

研究室レベルでは、世界の追従を許さぬ科学

複数の学会が関連する境界領域

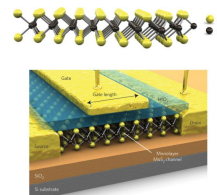
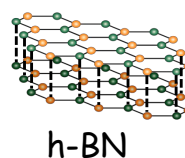
→ **横断プロジェクトの強化**



グラフェン以外の原子層も対象

新規原子層がぞくぞく出現(現在も)

→ **組織的な協力体制が必要**



世界で巨大プロジェクトがスタート

日本はグラフェン・プロジェクトが無かった

→ **強いリーダーシップが必要**



MoS₂ 複合系



(参考: EU:1000億/10年、韓国300億/5年・英国:300億/5年、
米国:50億、シンガポール:100億、中国・ブラジル:10億)

EUグラフェン
フラグシップ

「原子層科学」の体制 (2013) 4つの計画班

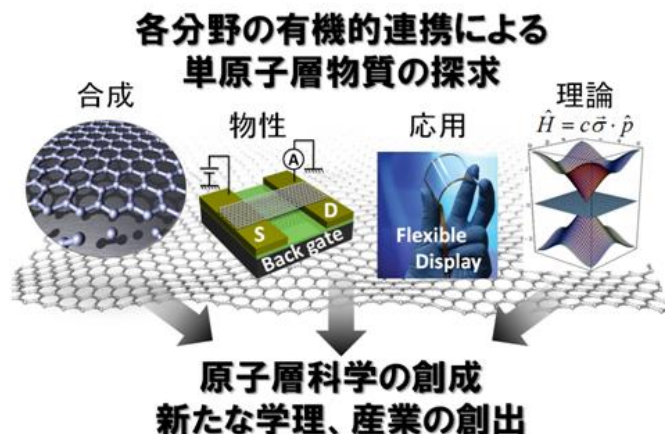
グラフェンや新規原子層による、原子層複合系の総合的探究

A01: 試料**合成**法の開拓、複合原子層の合成

A02: 合成試料の**物性**評価、新規物性の発見

A03: 合成試料によるデバイス**応用**設計

A04: 原子層科学の**理論**的体系を確立



日本の研究体制のコア

公募研究 (総予算の20%)
開かれた領域!

第1回 共同研究の拡大

第2回 新規原子層の開拓

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、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。本研究領域では、生成を担う計画研究による良質の大面积グラフェン試料の作成とその試料の早急な物性評価及び応用を担当する計画研究への提供が、本領域の成否を大きく左右すると思われる。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。</p>



1. **グラフェン研究の世界的な潮流に対する本研究領域の新規性及び具体的な到達点を明示せよ。**
2. **素子応用展開を探るためのブレークスルーを切り開く、戦略や着想を深めよ。**
3. **多くの生成方法の中から早急に標準試料を決定、他の計画研究へ安定的に提供せよ。**

総括班 + 各班の戦略目標と成果を紹介

原子層科学の総括班戦略 講習会 = 7回開催

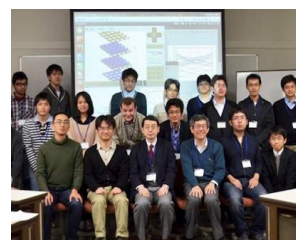
1. **本研究領域の新規性及び具体的な到達点**
戦略：新規原子層に先手、共同研究で物性測定
2. **ブレークスルーを切り開く、戦略や着想**
戦略：講習会の開催、分野を超えた知識の共有
3. **標準試料を決定、他の計画研究へ安定的に提供**
戦略：合成初期段階から試料提供、共同研究推進

原子層剥離講習会

グラフェン道場

合成試料見本市

第一原理計算講習会



講習会を通じたポスドク・若手の育成

A01 合成班の戦略目標と新規性 論文数 = 134

9

戦略目標: サンプル早期提供 mmサイズグラフェン単結晶達成!

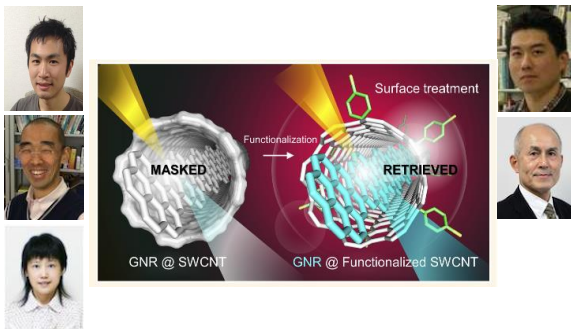
標準サンプル提供 初年度達成

- ・SiC上単層グラフェン: 物性班(磁気抵抗測定) 応用班(量子容量測定)
- ・CVD法グラフェン: **アルコール法** 応用班(輸送特性)
エッチング析出法 日本, 韓国, 米国特許

新規性: 新規二次元原子層の合成技術の共同開発実現!

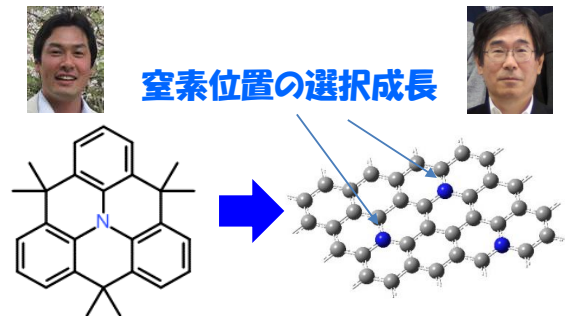
○ **GNR @ + / 空間の評価**

○ **有機分子を”種”としたグラフェンCVD合成**



領域内 (物性班・理論班) 共同研究成果

ACS Nano 9, 5034 (2015)



窒素位置の選択成長

班内共同研究成果

Phys. Chem. Chem. Phys. 17, 14115 (2015)

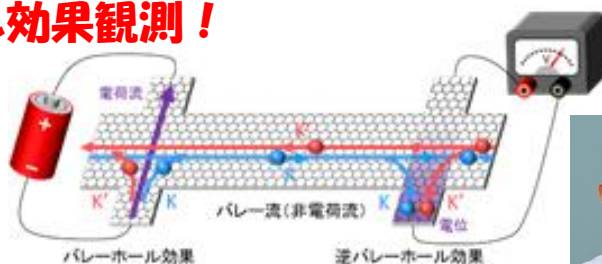
A02 物性班の戦略目標と到達点 論文数 = 63

10

戦略目標①: h-BN上グラフェンを用いたDirac電子系

2層グラフェンのバレーホール効果観測!

トポジカル量子物性
バレートロンクス応用
応用班(試料)物性班(測定)



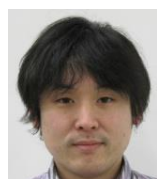
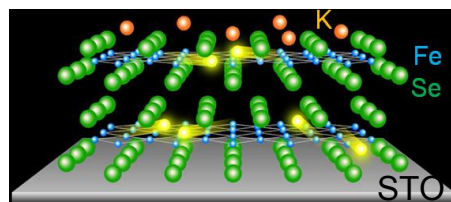
Unpublished



戦略目標②: 新規原子層の探索と物性開拓

FeSe原子層の超伝導(50K)発見!

2次元超伝導の物理
原子層による高温超伝導開発



Nat. Mater. 14, 775 (2015)

初年度装置開発予算投入

有機EL：グラフェン電極で輝度向上！

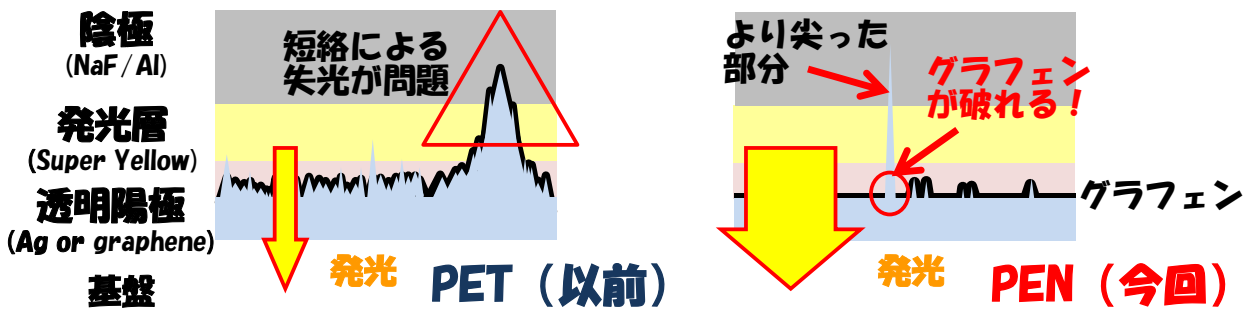


OLED
on PEN

8000 cd/m²
@15 V



JJAP 54, 095103 (2015)



短絡防止効果 (逆転の発想！とがった基板の採用)

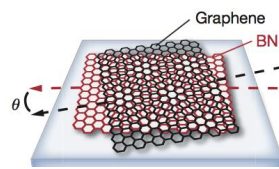
戦略：グラフェンから新しい原子層物質への理論展開

... BN(窒化ホウ素)、TMD(遷移金属カルコゲナイド)、黒リン、シリコン薄膜, etc

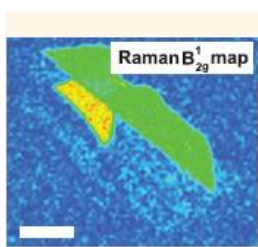
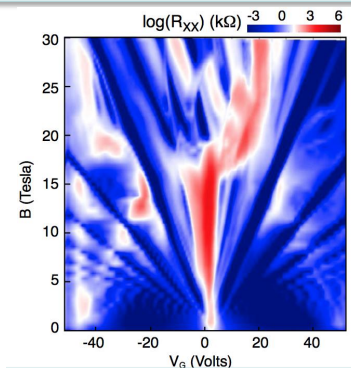
原子層でフラクタルを実現

量子力学効果による
フラクタル電子構造(1976予言)を
グラフェン+BN複合膜で初めて観測

応用班+コロンビア大との共同研究
Nature 497, 598 (2013)



グラフェン+BN 複合膜



TMD ラマンスペクトルの解明

TMD新物質のラマン共鳴スペクトルを
同定することに成功

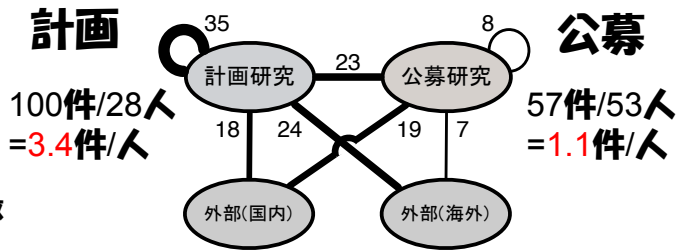
応用班+MITとの共同研究
Phys. Rev. B 91, 205415 (2015)

原子層科学の共同研究実績 = 総数 158 !

総数158件 = (国内,57件) + (国際BN関連,75件) + (国際その他,26件)

個別アンケートによる詳細な分析
 → ネットワーク図で全体像を把握
 → 公募 (共同研究重視) は成功

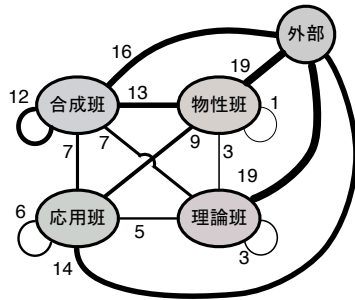
注: ネットワーク数は2グループ間の共同研究数
 (和は総数ではない。) 国際BN関連を除外。



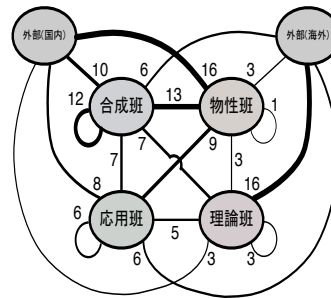
班別

合成班 (55)
 → 試料提供
 (戦略3が成功)

全体 = 134
 領域内 = 66
 外部 = 68



領域外共同研究の実態



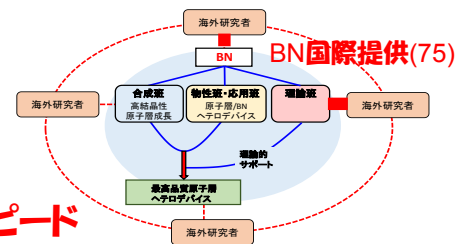
国内 = 37
 国外 = 31
 +
 国際BN = 75

原子層科学の対世界戦略

1. BN基板供給 → 世界で唯一 (国際共同研究基金に応募)

2. 各国のプロジェクトとのミーティング

- 中国・韓国とのA3(2013-2015)
- インドとの2国間(2014, 2016)
- 米国NSF調査団(2015. 3) 新規政策模索
- EUフラグシップ(2015. 10) 共同研究 = スピード



3. 国際シンポジウムの開催(NT15, 2015. 6)

前年の3倍以上の765名の参加



A3シンポジウム(天津)



日印セミナー
(バンガロール)



NT15 国際会議(名古屋大学)

原子層科学の社会貢献 総数 = 66件

15

著書総説 30件



公開講演会15件、出前授業16件、領域全体会議5件

2015年8月3日 市民講座「原子層科学」@京大
～ベンゼンから、カーボンナノチューブ、グラフェンまで～

原子層科学レビュー論文集
(12月予定)

参加者 150名(半数以上高校生)

デモ実験:クロスカップリング



トーク
ショー

原子層科学一般書
共立出版
(2015. 1月出版)



体験:グラフェンで氷を切る



中間報告書
日本語(270頁)
英語(187頁)
(2015. 3月)



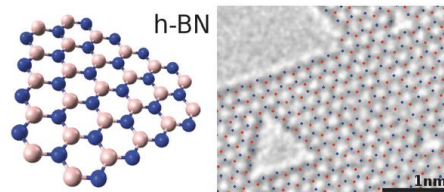
NHKサイエンスゼロ(篠原)、TBS(菅原)出演
Web, Facebook, Youtube でも公開!

まとめ: 「原子層科学」の成果と今後の展開

16

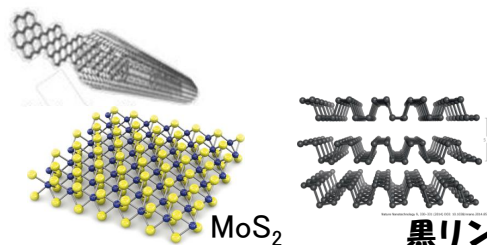
1. 原子層に関する分野間横断プロジェクトの創成

- 共同研究による研究推進 (158件)
- 世界に日本をアピールする存在



2. 本学術領域の戦略

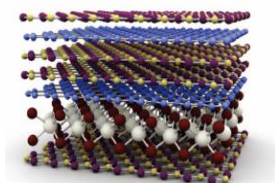
- 新原子層物質に共同研究で先手
- 講習会などで領域内の知の共有
- 市民講座、若手育成などの社会貢献



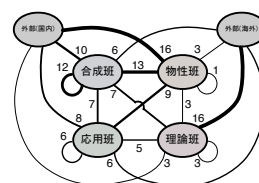
3. 今後の展開



- 複合原子層物質が次のターゲット
- 世界のプロジェクトとの共同研究



複合原子層 (概念図)



共同研究戦略

① 領域メンバーの昇格 総数5件

依光(京大准教授→教授)、若林(NIMS研究員→関学大教授)、仁科(岡山大助教→准教授) 他



若林研究室発足!

② 領域メンバーによる主な受賞 総数55件

		構成員*	2015	2014	2013	合計
合成班	計画研究	7	5	6	6	17
	公募研究	10	7	5	0	12
	合計	17	12	11	6	29
物性班	計画研究	7	4	3	0	7
	公募研究	25	1	7	0	8
	合計	32	5	10	0	15
応用班	計画研究	6	0	1	0	1
	公募研究	8	5	3	0	8
	合計	14	5	4	0	9
理論班	計画研究	8	1	0	1	2
	公募研究	10	0	0	0	0
	合計	18	1	0	1	2
合計	計画研究	28	10	10	7	27
	公募研究	53	13	15	0	28
	合計	81	23	25	7	55

第19回日本物理学会論文賞(齋藤)
Gottfried Wagener Prize(河野)
日本物理学会若手奨励賞(菅原)
第20回日本物理学会論文賞(初貝)
錯体化学会研究奨励賞(坂本)
文部科学大臣表彰若手科学者賞(加藤)
新化学技術研究奨励賞(依光) 他

③ 大学院生・ポスドクの育成 総数12件

JSPS特別研究員 (2015年度7名、2014年度2名採用)
JSPS外国人特別研究員(2015年度2名、2014年度に1名採用)

Web: 原子層科学で検索

Facebook: 原子層科学

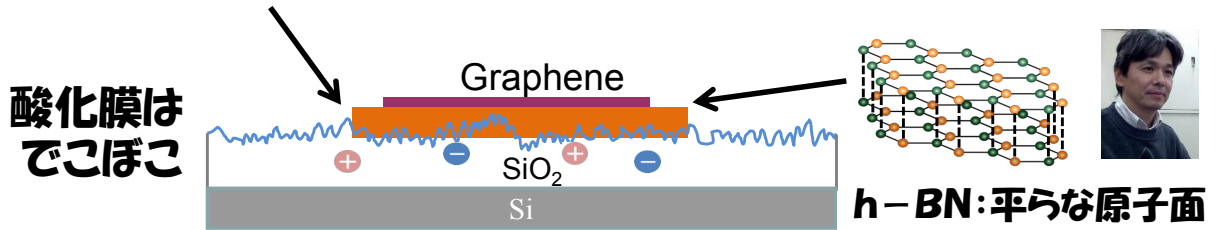
メディア報道 = 17件
昇進・受賞 = 68件

最高リーチ数 = 1,290人
平均 = 250人/記事



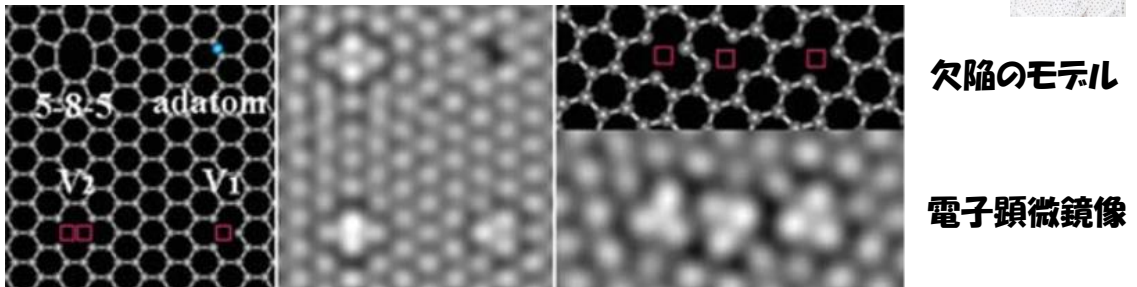
・半導体で重要な**大きな電子移動度**を達成 (USA, UK)

日本が**h-BN 原子層**を提供 (渡邊、本領域チーム)



・欠陥の**原子像**・**単原子分光**に成功。究極の評価法

日本の**チーム**だけ (劉、末永、本領域チーム)



欠陥のモデル

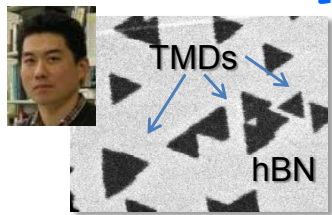
電子顕微鏡像

目標③：遷移金属ダイカルコゲナイドの設計と新機能探索

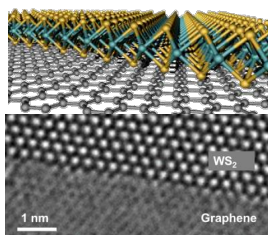
h-BN上への高品質WS₂の合成

グラファイト上高品質合成

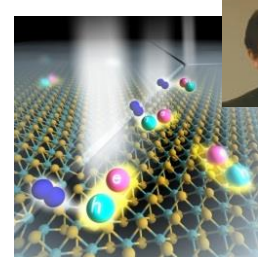
TMD局在励起子の発現



渡邊G (応用班) BN基板提供
ACS Nano 8, 8273 (2014)



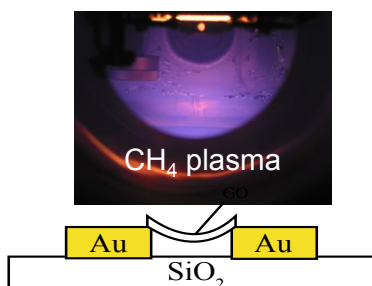
劉 (物性班) 共同研究
ACS Nano 9, 4056 (2015)



ACS Nano 8, 12777 (2014)

目標④：酸化グラフェンの新展開

還元法の高度化 プラズマ処理



応用展開：リチウムイオン電池
スーパーキャパシタ

活発な領域内共同研究進行

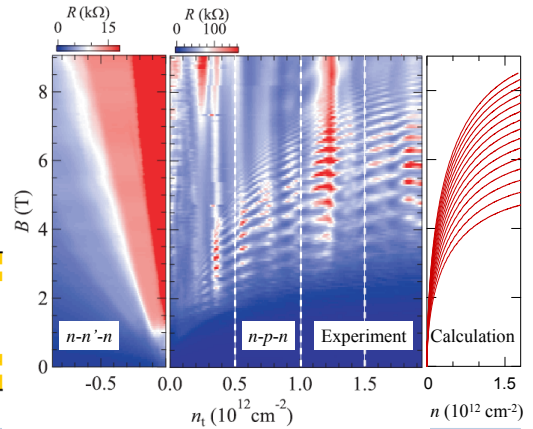
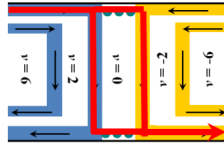


量子ホールエッジ状態間の量子干渉効果の観測

h-BN上高移動度グラフェンp-n接合

基底ランダウ準位の分裂による微細な量子効果を高精度測定

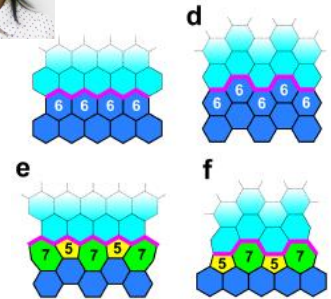
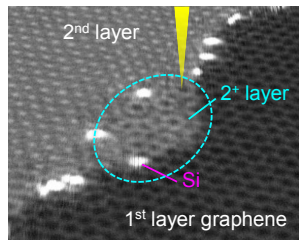
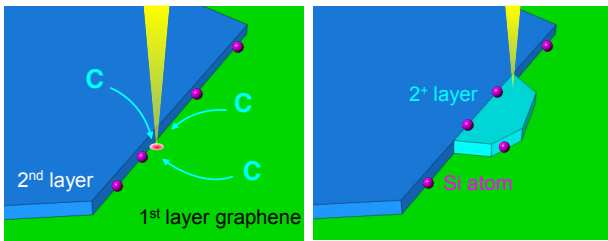
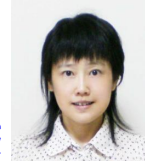
Appl. Phys. Lett. 106, 183101 (2015)



グラフェン面内結晶成長の直接観測

原子レベル高分解能電子顕微鏡
電子顕微鏡下熱処理時の面内成長様式のその場観察

Nat. Comm. 5, 4055 (2014)



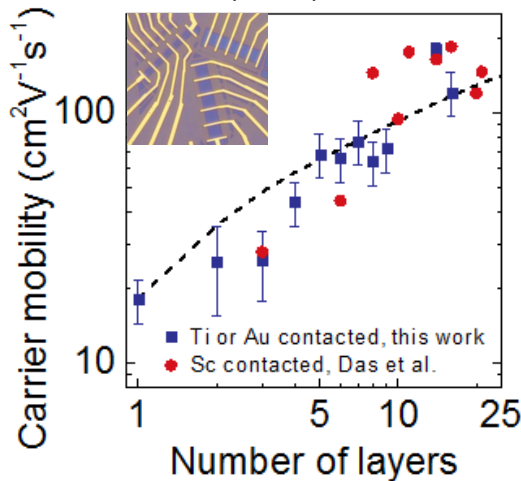
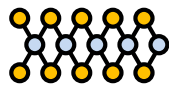
応用物性
国際共同研究:



評価 評価 成長 BN 理論 理論 台湾 豪州 米国

MoS₂

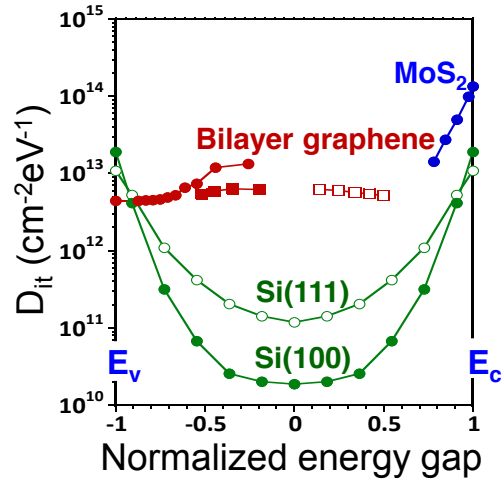
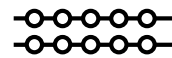
Nano lett. 13, 3546 (2013)



100cm²/Vsを超える移動度

Graphene

Sci. Rep. (2015)



初の界面準位計測

戦略:カルコゲナイドの層数選択, グラフェンの複層化!

戦略：新しい原子層物質への理論展開（急務）

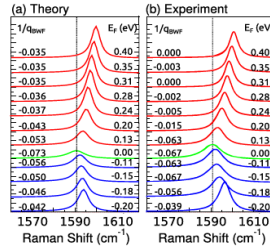
... TMD（遷移金属カルコゲナイド），黒リン，シリコン薄膜，etc

光学物性



グラフェン
ラマン・ファノ効果の解明
(40年来的未解決問題)

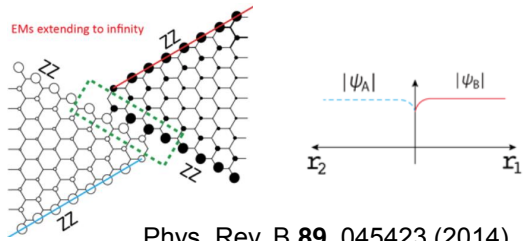
Phys. Rev. B 90, 245140 (2014)



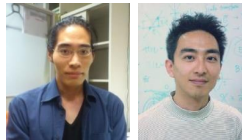
デバイス応用



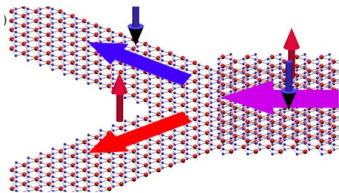
原子層ナノ構造で
量子伝導を制御



スピントロニクス



TMD上で
スピンを振り分ける機構の予言



Phys. Rev. B 91,
201407(R) (2015)

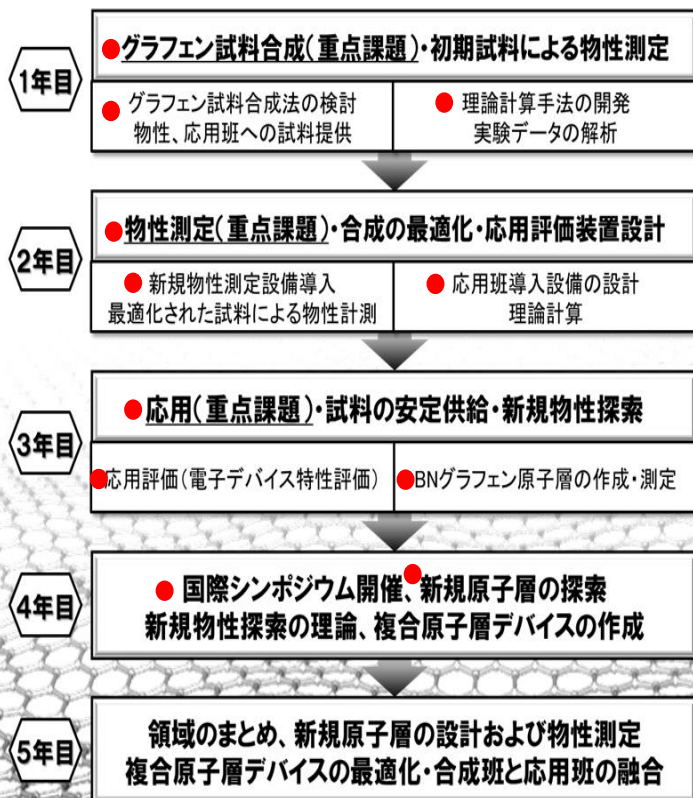
超伝導発現を目指して



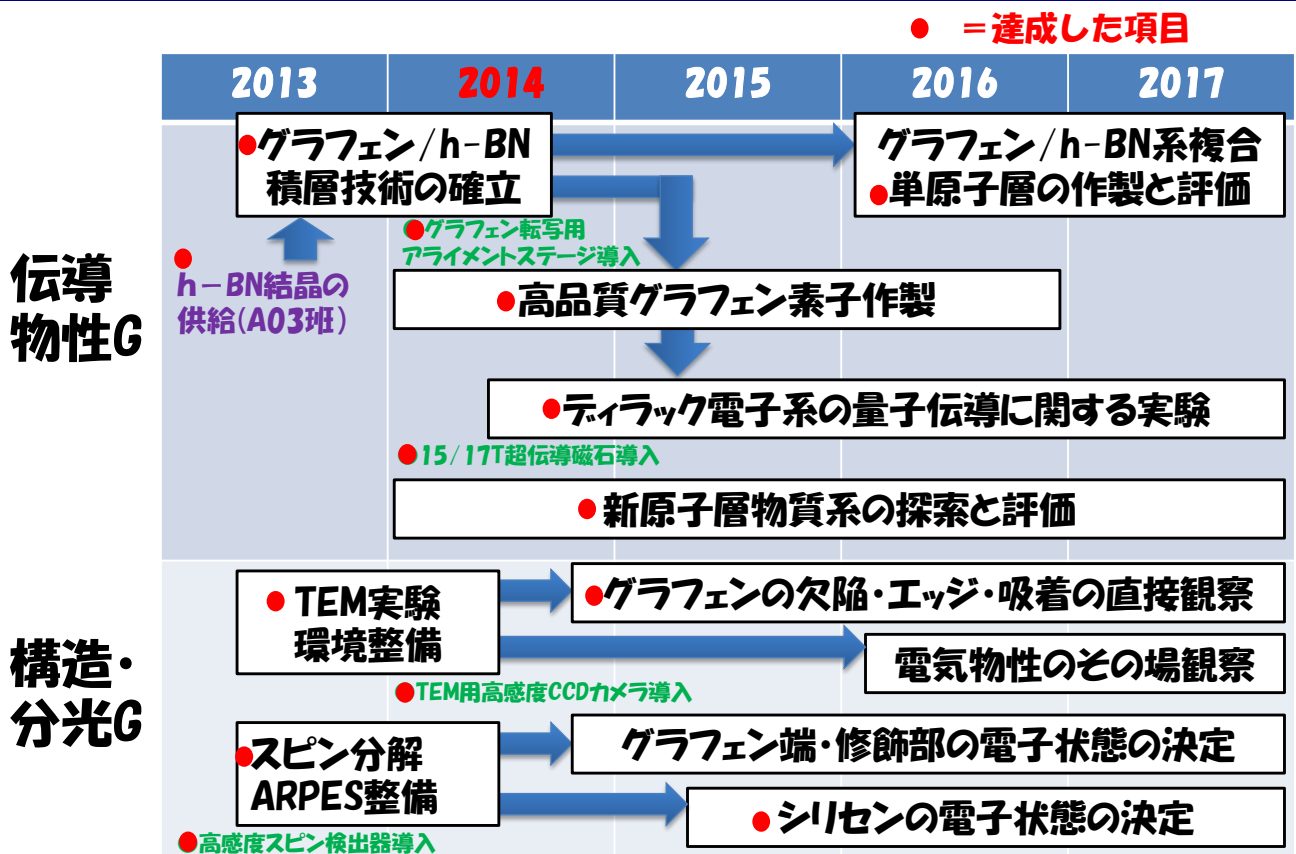
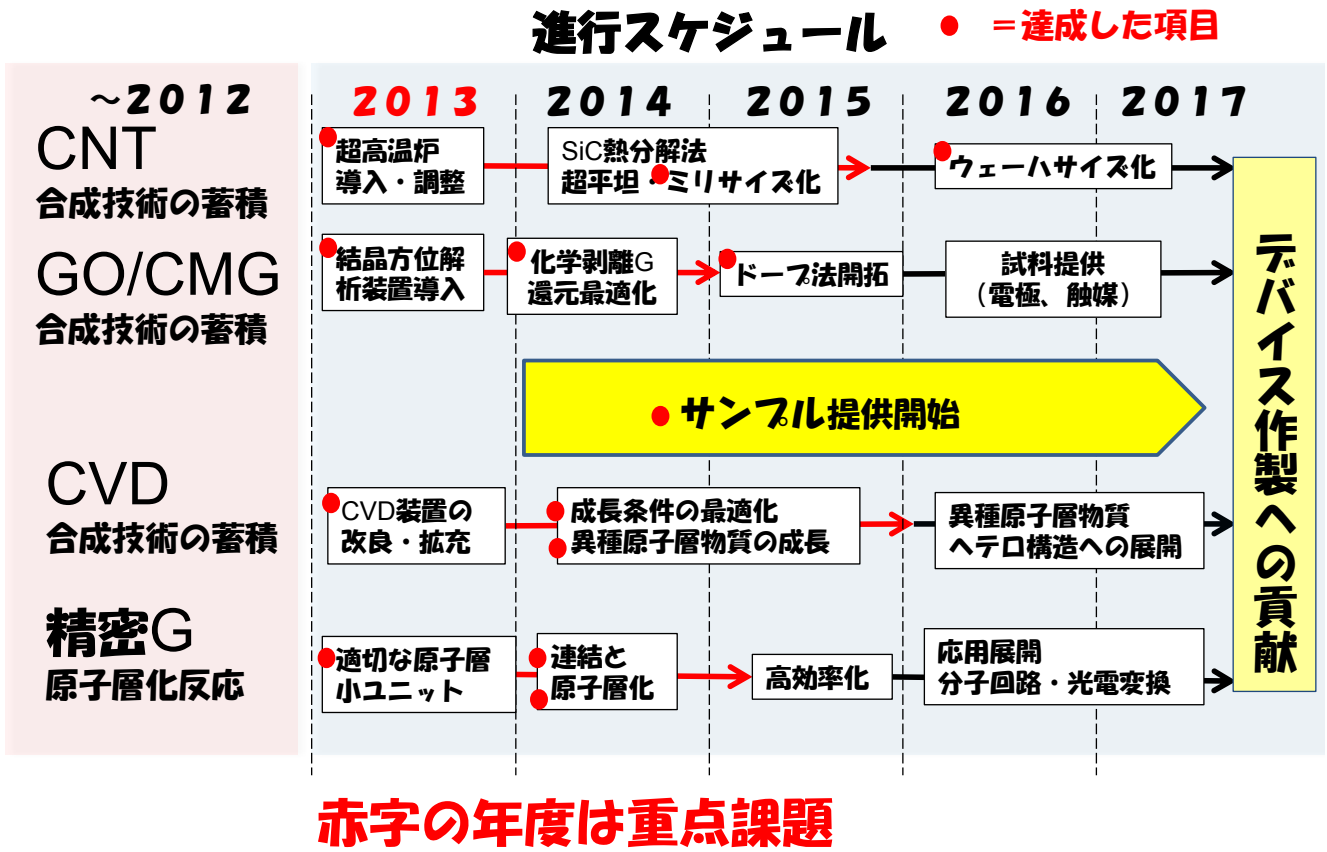
炭素+ホウ素+リチウム
原子層系の物質設計

Phys. Rev. B 88, 235407 (2013)

参考資料8：重点課題と総括班年次計画の達成度



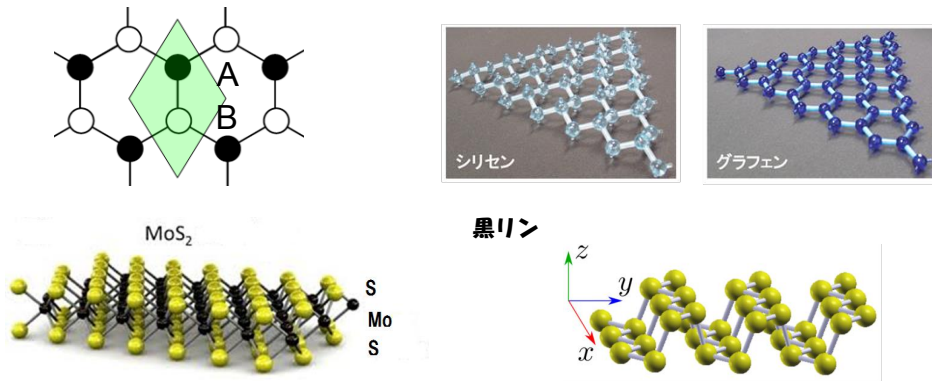
- =達成した項目
- 年度ごとの重点課題
- 公募研究の強化 (総予算の20%)
- 計画研究間の連携
- 若手研究者の採用
- 総括班によるPD確保
- 国内外社会への貢献



参考資料 1 1 : 代表的な原子層物質の構造と特徴

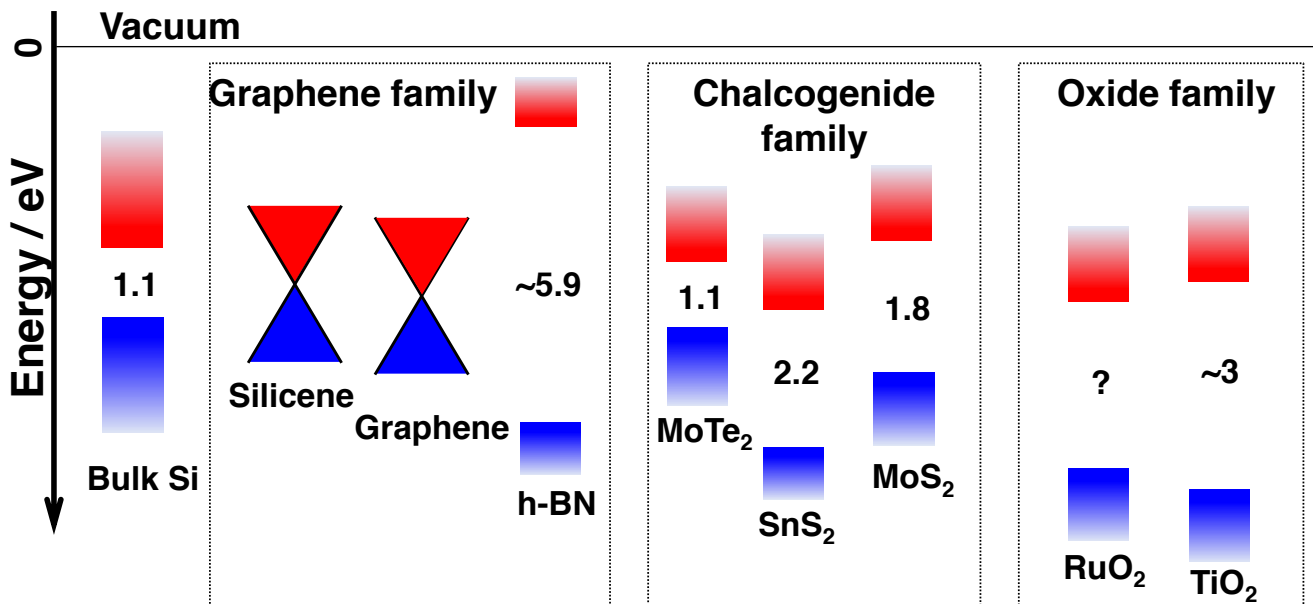
27

名称	母物質	電子状態	特徴	構造
グラフェン	グラファイト	半金属	○高移動度	六方格子
遷移金属ダイカルコゲナイド (MX ₂)	MoS ₂ のみ天然鉱物有 他にWS ₂ , MoSe ₂ , WSe ₂ , MoTe ₂ , WTe ₂	半導体 (2H, 3R) Direct Gap (単層) 金属 (1T')	○テバイス ×低移動度	3層構造 2H, 1T (1T'), 3R等 のポリタイプ
h-BN	h-BN	絶縁体 E _g =6eV	○最適基板 ○平滑な面	六方格子 ×合成困難
シリセン	Si	半金属	×合成困難	平面でない
黒リン	P	半導体 E _g =0.3eV	○中移動度 ×高反応性	平面でない x, y異方的



参考資料 1 2 : 新規原子層の種類と電子構造

28



共有結合型

カルコゲナイド型

酸化物型

MoSe₂, WSe₂, GaSe, InSe

論文発表数（重複を除く）

	構成員*	2015	2014	2013	合計
合成班	計画研究	7	31	35	98
	公募研究	10	25	0	36
	合計	17	56	35	134
物性班	計画研究	7	13	12	5
	公募研究	25	16	17	0
	合計	32	29	29	5
応用班	計画研究	6	13	11	16
	公募研究	8	5	7	0
	合計	14	18	18	16
理論班	計画研究	8	25	24	30
	公募研究	10	14	15	0
	合計	18	39	39	30
合計	計画研究	28	82	79	86
	公募研究	53	60	50	0
	合計	81	142	129	86

Nature: 1, Nat. Chem. 1, Nat. Comm. 11,
 Nat. Mat. 1, Science 2 他合計357件
約半分が共同研究による成果!

計画研究 247件 / 28人 = 8.8件 / 人
 公募研究 110件 / 53人 = 2.1件 / 人

招待講演数

	構成員*	2015	2014	2013	合計
合成班	計画研究	7	19	42	18
	公募研究	10	19	13	0
	合計	17	38	55	18
物性班	計画研究	7	5	9	9
	公募研究	25	16	31	0
	合計	32	21	40	9
応用班	計画研究	6	5	17	19
	公募研究	8	4	15	0
	合計	14	9	32	19
理論班	計画研究	8	7	21	18
	公募研究	10	0	1	0
	合計	18	7	22	18
合計	計画研究	28	36	89	64
	公募研究	53	39	60	0
	合計	81	75	149	64

*構成員数は2015年現在

**論文で、共同研究の重複は除く。

計画研究 189件 / 28人 = 6.8件 / 人
 公募研究 99件 / 53人 = 1.9件 / 人

参考資料14：主要な雑誌への掲載数 (I.F.>5)

雑誌名	合成班						物性班						応用班						理論班						合計		
	計画研究		公募研究		計画研究		公募研究		計画研究		公募研究		計画研究		公募研究		計画研究		公募研究								
	2015	2014	2013	2015	2014	2013	2015	2014	2013	2015	2014	2013	2015	2014	2013	2015	2014	2013	2015	2014	2013	2015	2014	2013			
ACS Appl. Mater.	2																								2		
ACS Nano	2	2	3	3	1	1	1	1																	20		
Adv. Mater.						1	1																		4		
Angew. Chem. Int. Ed.	5	5	2			1																			13		
Carbon	4	2	2	2	1	1	1	1																	17		
Chem. Commun.		2		2	2																				6		
Chem. Eur. J.	2	1	5		1																				9		
Chem. Sci.				1	1																				2		
Chem. Soc. Rev.						1																			1		
J. Am. Chem. Soc.	1	1		3	1																				6		
J. Mater. Chem. A	1	1		1																					3		
J. Mater. Chem. C												1											1		2		
J. Phys. Chem. Lett.				1	1																				2		
Nano Lett.	1					1							1												7		
Nano Res.		2		1																					4		
Nanoscale		2	1										1												9		
Nat. Chem.																							1		1		
Nat. Commun.	1	1	1	2		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	11		
Nat. Matr.									1																	1	
Nature																										1	
Org. Lett.				1																						1	
Phys. Rev. Lett.	1					1	2																		6		
Rep. Prog. Phys.																									1		
Sci. Rep.				2									1	1	1										6		
Science																									2		
Small																									1		
その他	11	13	17	9	5	0	9	5	5	5	5	11	13	0	6	5	12	3	2	0	20	22	23	11	15	0	217
合計	31	32	35	25	11	0	13	12	12	12	5	16	17	0	13	11	16	5	7	0	25	24	30	14	15	0	357