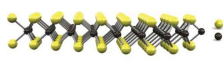


1/15

## 新学術領域研究「原子層科学」事後審査ヒアリング



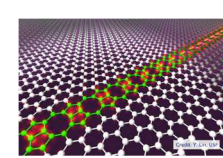
# 「原子層科学」

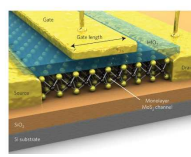

領域番号: 2506 平成25-29年度

## 齋藤 理一郎

### 東北大学理学研究科

5年間、がんばりました！







1. 原子層の歩み : 原子層科学の立ち上げ、中間評価
2. 領域の達成度 : 世界が注目する新規成果
3. アピールする点 : 領域内外との共同研究戦略
4. 領域の役目 : 社会貢献、講習会、若手育成
5. まとめ : 現状と新たな展開に向けて

2/15

## 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 → 2次元物質として認知**

h-BN, MoS<sub>2</sub>, RuO<sub>2</sub> 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**

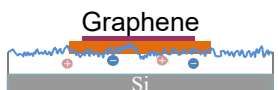
→ **新学術領域「原子層科学」**

**2013年スタート**

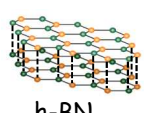


## 原子層科学の発足時(2013)の日本の現状 3/15

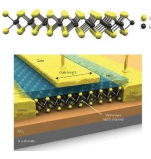
- ・日本に既存の研究組織が無かった  
 いろいろな学会にまたがる境界領域  
 → **横断プロジェクトが必要**
- ・新規原子層がぞくぞく出現  
 研究室ごとのサンプル作りは無理  
 → **組織的な協力体制が必要**
- ・世界で巨大プロジェクトがスタート  
 日本は世界から取り残されていた  
 → **強いリーダーシップが必要**




Graphene  
Si




h-BN



MoS<sub>2</sub> 複合系





EUクラフエン  
フラグシップ

(参考: EU:1000億/10年、韓国300億/5年、英国:300億/5年、**EUクラフエンフラグシップ**  
 米国:50億、シンガポール:100億、中国:100億、**ブラジル:10億**)

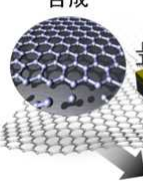
## 「原子層科学」の体制 (2013) 4つの計画班 4/15

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

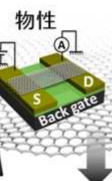
- A01: 試料**合成**法の開拓、複合原子層の合成・提供
- A02: 合成試料の**物性**評価、新規物性の発見
- A03: 合成試料によるデバイス**応用**設計
- A04: 原子層科学の**理論**的体系を確立、実験の解析

各分野の有機的連携による  
単原子層物質の探求

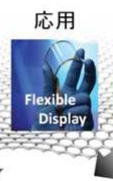
合成



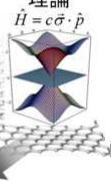
物性



応用



理論



$\hat{H} = c\sigma \cdot \hat{p}$

原子層科学の創成  
新たな学理、産業の創出

### 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**

5/15

### 採択時の所見と当初の総括班戦略

1. 本研究領域の新規性及び具体的な到達点を明示  
**戦略：新規原子層合成、新規物性検証、応用**
2. 素子応用の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



**15回講習会（公開）を実施、ポスドク・若手の育成**

6/15

### 「原子層科学」の中間審査(2015)の所見

評価結果： **A** (研究領域の設定目的に照らして、期待どおりの進展が認められる)

**所見=励ましの要点**

1. **グラフェン研究が多様化、本研究領域が各論にならずに全体として新しい学理を構築せよ。**
2. **ポスドクの人的費（総括班で一括して手当）によって、本来の総括班の活動に支障がないように運用せよ。**

#### 総括班の追加戦略

1. 専門書の形式の最終報告(720頁) → 学理を示す
2. お金を使わない総括班運営 → 自然な運営
3. 国際共同研究支援基金(2015年) → 戦略の強化

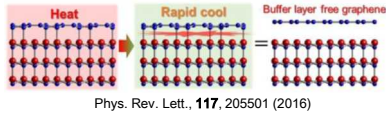
7/15


## A01 合成班の戦略目標と新規性 論文数=311

**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 ⇒ 2年目-5年目 サンプルの多様化、高品質化

- SiC上単層グラフェン:  
新規合成手法: 急冷法(特許取得)
- CVD法グラフェン: 企業化






**新規性: 面内で異なる物質を接合、不純物をドーピングする新方法**

単層WSe<sub>2</sub>/MoSe<sub>2</sub>面内ヘテロ構造 ○有機分子を“種”⇒原子層CVD結晶成長



Nano Res. (2015)

**原子の選択的配置・成長**



Methyl-form



Ketone-form

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

班内共同研究  
有機化学で作い ⇒ 新規発想  
無機化学で育てる

領域内 (合成班・理論班) 偶然の産物

8/15

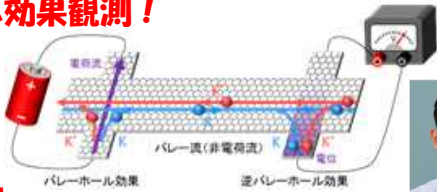
## A02 物性班の戦略目標と到達点 論文数=141


**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!**

↓

トポロジカル量子物性  
バレートロンクス応用  
応用班(試料)物性班(測定)  
理論班(予想) 緻密さと忍耐



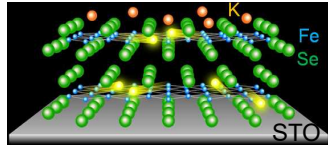


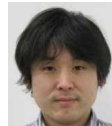
**戦略目標②: 新規原子層の探索と物性開拓**

**FeSe原子層の超伝導(50K)発見!**

↓

2次元物質超伝導の物理  
原子層による高温超伝導開発  
若手の挑戦!





9/15

## A03 素子応用展開の着想点 論文数 = 164

**戦略目標：界面を制御し原子層デバイスの応用**  
**グラフェン透明電極を用いた新規フレキシブル有機EL素子**





**応用班 + 企業の実用化共同研究**  
Carbon, 82, 60 (2015).

**輝度の各段の向上**  
**グラフェンが壊れることを利用！**  
 (逆転の発想) ポリエチレンナフタレート基板 (PEN)

**新規原子層半導体による**  
**インバーター回路 実現の手順**



**総括班4人組**  
**関連論文を含め**  
**引用500件以上**

**h-BN とグラフェンの2次元ヘテロ構造**  
**FET 作成の複層化技術 技術の執念**



**複合原子層の**  
**応用を実現！**  
 ACS Appl. Mater. Interfaces, 10, 28780 (2018)



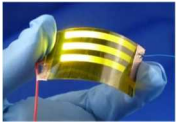
**測定限界まで**  
**電流を制御！**

10/15

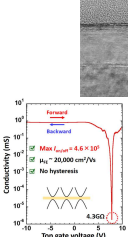
## 事前質問事項に対する回答

**<事前質問事項> 事後評価報告書 p.14 に、「追従を許さない高性能の素子応用を実現した」と記載されているが、具体的には何件くらい実現したのか、また、そのうち何件くらい特許出願したのか、説明いただきたい。**

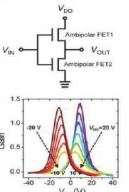
**グラフェンEL素子**



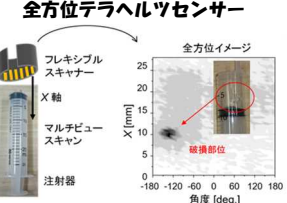
**2層グラフェンFET**  
**on/off 比 測定限界**



**インバーター回路**



**全方位テラヘルツセンサー**







**高性能の素子応用 4件**

**グラフェンEL素子 (長谷川)**  
**インバーター回路 (塚越)**  
**2層グラフェンのon/off比 (長汐)**  
**全方位テラヘルツセンサー (河野)**

**そのうち 2件特許出願**

**特許の総件数 11件**

**グラフェンEL素子 (長谷川)**  
**国内2件、海外2件**  
**全方位テラヘルツセンサー (河野)**  
**国内7件**

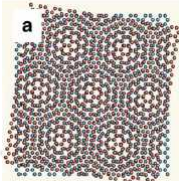
11/15

## A04 理論班の戦略目標と到達点 論文数 = 280

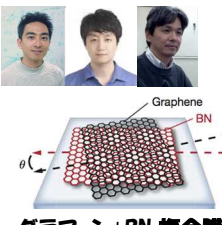
**戦略目標: グラフェンから新しい原子層物質への理論展開**  
 ... BN(窒化ホウ素)、TMD(遷移金属カルコゲナイド)、黒リン、シリコン薄膜, etc

### 原子層でフラクタル

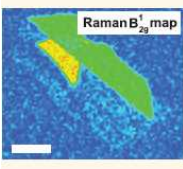
**2次元モアレ構造 コロソスの卵**



応用班 + コロンビア大との共同研究  
 Science **350**, 1231 (2015),  
 Nano Lett. **16**, 5053 (2016).





Graphene  
BN  
 $\theta$   
**グラフェン+BN 複合膜**



Raman  $B_{2g}$  map

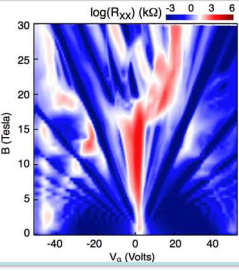
働く領域代表  
5年間で64件  
論文発表!  
生涯引用3万件

### 新規TMD ラマンスペクトル

**共鳴ラマンスペクトルの第一原理計算  
追従を許さない理論**

応用班 + MITとの共同研究  
 Phys. Rev. B **91**, 205415 (2015)  
 Nano Lett. **16**, 2260 (2016)



log( $R_{xx}$ ) (k $\Omega$ )  
-3 0 3 6  
B (Real)  
-40 -20 0 20 40  
 $V_g$  (Volts)

12/15

## 原子層科学の共同研究実績 = 総数499!

**共同研究発表論文の総数: 中間発表時 158件**

⇒ **事後評価時 499件** (重複無しでカウント)

**総論文数 836件 の 60% が共同研究**

**1つの共同研究で最低の2人の共著者としても**

(共同研究の成果) : (それ以外の成果)  
 = 499 x 2 : (836 - 499) = 3 : 1

**1研究者あたり 75% が共同研究**

## 原子層科学の対世界戦略 13/15

- 1. BN基板供給** → 世界で唯一（国際共同研究基金を投入）
- 2. 国際研究集会: 15回: 各国のプロジェクトとのミーティング**  
 中国・韓国とのA3シンポジウム（2013-2017）毎年開催！  
 インドとの2回（2014, 2016） **アジアでの人材、共同研究**  
 米国NSF調査団（2015） **新規政策を模索**  
 EUフラグシップ（2015, 2017） **共同研究促進 = 互惠関係**
- 3. 国際シンポジウムの開催(NT15, 2015. 6)**  
 前年の3倍以上の**165名**の参加



**A3シンポジウム**  
(天津、博多、扶余、杭州)



**日印セミナー**  
(バンガロール、名古屋)



**NT15 国際会議(名古屋大学)**

## 原子層科学の社会貢献 総数 = 73回 14/15

**著書総説 30件**      **講演会 15件、出前授業30回、全体会議10回、他18回**

**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~

**参加者 150名(半数以上高校生)**

**デモ実験: クロスキャッパリング**



**原子層科学レビュー論文集**  
(12月予定)

**原子層科学一般書**  
共立出版  
(2015. 1月出版)

**中間報告書**  
日本語(270頁)  
英語(187頁)  
**最終報告書(学理の構築)**  
(720頁、専門書の形式)

**NHKサイエンスゼロ(篠原)、TBS(菅原)出演**  
Web, Facebook(4万回閲覧), Youtube

**体験: グラフェンで氷を切る**



## まとめ：「原子層科学」の成果と今後の展開

15/15

### 1. 原子層に関する分野間横断プロジェクトの創成

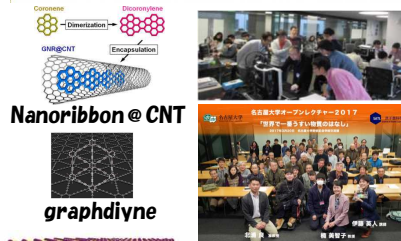
- 共同研究による研究推進（499件）
- 世界に「日本」を強くアピール



新学術領域研究「ナノスピン変換科学」「原子層科学」合同セッション 2017.9.12 大阪大学

### 2. 本学術領域の戦略と達成

- 新原子層物質にも含め学理の構築
- 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

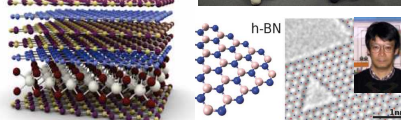


Nanoribbon@CNT

graphdiyne

### 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） 国際共同研究戦略

## 参考資料1：若手育成の実績 受賞総数 = 133件

16

### ① 領域メンバーの昇格（教授8件、准教授14件、研究者83件）

依光(京大准教授→教授)、若林(NIMS研究員→関学大教授)、  
越野(東北大准教授→阪大教授)、菅原(東北大助教→准教授)



### ② 領域メンバーによる受賞 総数159件(含40歳以上)

若林研究室発足!

紫綬褒章(篠原)  
学術振興会賞(若林)  
文部科学大臣表彰科学技術賞(楠、他計5件)  
文部科学大臣表彰若手科学者賞(加藤、他計5件)  
井上研究奨励賞(4件)  
日本物理学会論文賞(第19回齋藤、第20回初貝)  
日本物理学会若手奨励賞(菅原)  
応用物理学会論文賞(齋藤)  
錯体化学会研究奨励賞(坂本)  
新化学技術研究奨励賞(依光)  
Gottfried Wagener Prize(河野)  
Sir Martin Wood Prize(山本)  
Mukaiyama Award(依光)

文部科学大臣より  
代表して科学技術賞  
を受賞する楠先生

### ③ 国際会議における招待講演・基調講演 総数383件(含40歳以上)



## 参考資料2: 原子層科学 HP や Facebook SNS戦略!

### Home Page のスマート化



文書サーバー: 全ての文書の記録  
論文等・受賞等の入力欄: 自動化  
公開資料: ダウンロード数統計  
ニュースレター・報告書: PDF化

### Facebook: 原子層科学

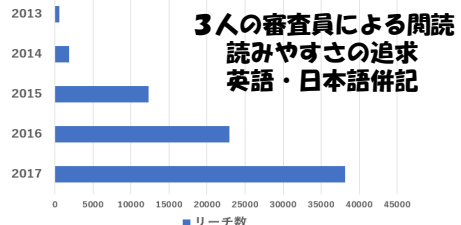


#### Facebookによる配信記事数の推移



年度	総括班	合成班	物性班	応用班	理論班
2013	40	0	0	0	0
2014	20	0	0	0	0
2015	50	10	0	0	0
2016	80	20	10	10	0
2017	100	30	20	10	0

#### Facebookによるリーチ数の推移

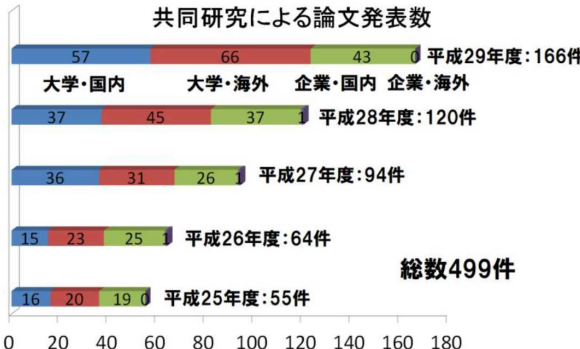


3人の審査員による閲読  
読みやすさの追求  
英語・日本語併記

年度	リーチ数
2013	~1000
2014	~1500
2015	~12000
2016	~25000
2017	~40000

## 参考資料3: 共同研究の年度ごとの分析と戦略

### 共同研究による論文発表数



年度	大学・国内	大学・海外	企業・国内	企業・海外	総数
平成29年度	57	66	43	0	166件
平成28年度	37	45	37	1	120件
平成27年度	36	31	26	1	94件
平成26年度	15	23	25	1	64件
平成25年度	16	20	19	0	55件

総数499件

### 年度ごとの戦略

- ← 企業との応用研究
- ← 公募班後期
- ← 国際共同研究基金 h-BN強化
- ← 合成班試料提供開始
- ← h-BN試料提供

	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)。

参考資料4：年度目標・共同体制の達成度

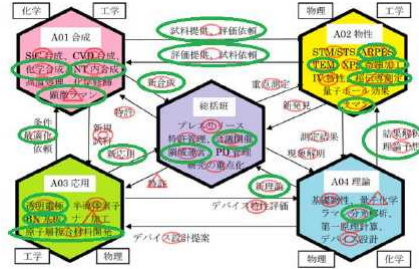
19

領域計画書の年度目標



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。

発足時の研究項目と共同体制



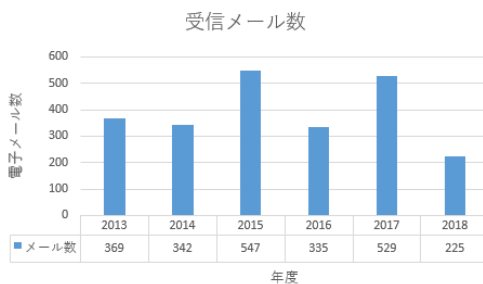
赤字は中間評価時の評価：◎予想以上、○予想通り、△展開中。緑は、後半に強化されて達成されたもの。

領域計画書を忠実に実行、努力目標の設定による達成

前倒しの達成の実現と展開

参考資料5：電子メールの数・総括班・若手班

20



領域代表が受け取った  
6年間の受信メール総数  
2,347件（送信数はこれ以上）  
Facebookの全原稿にコメント

総括班チーム体制（協力と責任）

班長+副班長体制（計画班管理）

専門職（Web、データ管理など）

国際共同研究領域内公募

文書入力・チェック体制

若手班（総括班と別組織）

Facebook編集委員会  
（企画からしフリーまで）

報告書編集委員会  
（すべての報告書はしフリー付き）

共同研究提案・ポスト原子層科学