

平成30年 5月14日現在

機関番号：11301

研究種目：新学術領域研究（研究領域提案型）

研究期間：2013～2017

課題番号：25107001

研究課題名（和文）原子層科学の推進

研究課題名（英文）Promotion of Science Atomic layers

研究代表者

齋藤 理一郎（Saito, Riichiro）

東北大学・理学研究科・教授

研究者番号：00178518

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 139,800,000円

研究成果の概要（和文）：本新学術領域研究は、「人類史上最も薄い物質」である、一原子層の厚さしかない物質（以下原子層物質）を合成してきました。また合成した非常に薄い物質を使って、消費電力が非常に小さい電子デバイスや、光デバイスの作成と検証を行い、その社会における有用性を実証しました。さらに、異なる原子層物質を積み重ねることによって、今までにない物質（複合原子層物質）を人工的に合成し、超伝導や量子的な性質を持つ、新しい機能材料を開発することに成功いたしました。これらは、国際共同研究基金を用いて国際共同研究を推進することによって、新しい物質の開発を加速いたしました。

研究成果の概要（英文）：In this project, we have synthesized the thinnest material in the history of human, that is, atomic layered materials. Using the synthesized, atomic layered materials, we have developed electronic or optical devices that require minimum consumption of the power, which enable us the possible applications for the commercial market. Further, stacking these atomic layered materials one by one, we make a completely new materials which enables a new properties such as two-dimensional superconductivity or quantum devices. This research activity is enhanced by the international collaboration of the researches.

研究分野：固体物理学

キーワード：原子層物質 遷移金属カルコゲナイド グラフェン 複合原子層 原子層超伝導 グラフェンフラッグシップ 量子デバイス

## 1. 研究開始当初の背景

研究開始当初(2013年)、欧米でグラフェンの研究に対する大型予算(1000億円)が採択された。これは、世界が日本のカーボンナノチューブや半導体デバイスにおける世界のトップレベルの研究に対抗するものであった。一方日本はゼロハンテープで劈開して作る、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、日本は当時の**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、世界との大きな認識の違いに対して「**このままでよいのか!**」という切迫感が多く研究者にあった。また応募当時のグラフェンの基礎研究は、ほぼ終わったと思われ(実際はそうではなかった)世界では“Beyond graphene”(グラフェンの次は?)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。しかしその研究レベルは、当時まだ低く、今日のような展開を予想できなかった。すくなくとも当時の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。このような状況を打開するため、**新しい原子層物質に対する学術水準の向上・強化**によって、原子層物質に対する展望を確立する必要があった。しかし、原子層物質の研究者が、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。この問題の対応として、**分野を超えたコミュニティとしての研究領域を作る必要**があった。

## 2. 研究の目的

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, MoS 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、新たな学術と産業の創出**を目指すものである。

総括班としての目標は、(1) 原子層物質のサ

ンプル提供をする手段を確立し、共同研究を推進すること。(2) 物理、化学、工学など異なる研究分野の交流を促進すること、(3) 異なる分野のお互いの理解を深めるために、講習会や講演会を一般にも公開して、開催すること。また講演会を通じて社会貢献をすること、(4) 共同研究を進めることで、この分野の学術水準の向上・強化をはかり、その結果として若手を育成すること。(5) 国際会議などを主催し、世界における日本の研究レベルをアピールすること。(6) 研究の成果を、Facebook や ニュースレター、また教科書形式の成果報告書を作ることによって、本新学術領域の最終目的である、「原子層科学の学理の構築」を目指すこと、などである。

## 3. 研究の方法

総括班は、上記の目的に対して、原子層科学の計画研究、公募研究のメンバーと協力して、以下の領域の運営方針を考えた。

(1) 原子層物質のサンプル提供をする手段を確立し、共同研究を推進すること。

(方法) 第1年度を合成班に予算を重点的に配分し、共同研究をすることができるサンプルを提供できる体制をはかる。また、合成班が、提供できるサンプルの情報をまとめ、物性班や応用班に提供するとともに、理論班が並行して基礎物性に関する計算をし、さらに応用班がデバイスの可能性を検証を開始するという、プロジェクトの流れを作る。

(2) 物理、化学、工学など異なる研究分野の交流を促進すること

(方法) 全体会議で、お互いを理解するのが難しい個々の成果発表を限定する。一方、フリーディスカッションを積極的に言い、お互いに何がわからないのか、何が必要か情報を洗い出すことにした。

(3) 異なる分野のお互いの理解を深めるために、講習会や講演会を一般にも公開して、開催すること。

(方法) (2)のディスカッションを通じて得られた、必要な情報に関する講習会を開催する。また講演会を各地で開催し、企業や一般の方にも原子層科学の重要性を理解してもらう。

(4) 共同研究を進めることで、この分野の学術水準の向上・強化をはかり、その結果として若手を育成すること。

(方法) 共同研究を進めるうえで、大学院生も含む若手が中心となって動けるように、講習会への参加費などを一部総括班の旅費と

して提供する。またサンプル提供に関しても、若手がサンプルを適切に扱えるように共同研究する研究室などで教育する。

(5) 国際会議などを主催し、世界における日本の研究レベルをアピールすること。

(方法) 総括班の予算が限られているので、総括班が組織委員や主催者として開催している国際会議を、原子層科学主催にして国際会議の運営を実質原子層科学のメンバーが主体となって運営を行う。参加登録費などを用いて招待講演者の旅費を確保する。

(6) 研究の成果を、Facebook や ニュースレター、また教科書形式の成果報告書を作成することによって、本新学術領域の最終目的である、「原子層科学の学理の構築」を目指すこと。

(方法) Facebook, ニュースレター、成果報告書の編集委員会をそれぞれ立ち上げる。それぞれを、毎週、毎シーズン、毎年定期的に発表する。

#### 4. 研究成果

それぞれの目的・方法に対して、総括班のメンバーが中心となり領域運営を行い、原子層科学の領域目標を当初の目標以上に達成した。

(1) 原子層物質のサンプル提供をする手段を確立し、共同研究を推進すること。

(成果) 楠(合成班班長)を中心として、第一年度に供給できるサンプルの内容、品質、量、提供方法などをまとめた資料を作成し、共同研究ができる体制を実現した。また、サンプル見本市として、実物のサンプルの実物を見せ、また合成方法を説明する講習会を開催した。この結果、2年度から共同研究が一気に増え、後半に共同研究の成果としての論文が多数発表された。共同研究の数は、各構成員あたり5に近い値になった。

(2) 物理、化学、工学など異なる研究分野の交流を促進すること

(成果) 全体会議を10回開催し、毎回フリーディスカッションを必ず行い、また班会議でも、共同研究を実現する方法について議論した。さらに全体会議の懇親会などでも、共同研究の話など多く議論し交流が活発に行われた。その結果、当初はあまり顔もわからなかったメンバーが、原子層科学の仲間として共同研究がしやすい交流が実現し、新たな一つ分野が形成した。

(3) 異なる分野のお互いの理解を深めるために、講習会や講演会を一般にも公開して、開催すること。

(成果) 講習会として、原子層作製講習会(4回)、第一原理計算講習会(2回)、グラフェン道場(理論の講習会)、複層原子層作製講習会、グラフェンミニ講演会、原子層サンプル見本市・講習会、カルコゲナイド結晶成長講習会、新量子相レクチャーシリーズ、オープンレクチャーなど、当初の予想よりはるかに多い講習会が、総括班中心でなく、メンバーが自主的に開催された。講習会の数は、一つの新学術領域研究として最多であろうと自負する。さらに、領域代表が、原子層に関する一般書(単著)を出版した。またメンバーが中心になって、原子層特集号の解説書も化学同人から出版した。また主に高校の出勤授業や一般向けの講演会は実に66回に開催され、そのうち参加人数が150名以上の一般講演会は、9回開催された。

(4) 共同研究を進めることで、この分野の学術水準の向上・強化をはかり、その結果として若手を育成すること。

(成果)若手を育成する、多くのプログラムを開催することで、若手が独立した研究者に成長した。その結果、文部科学大臣表彰、日本学術振興会賞、日本応用物理学会論文賞、など33件(2018年2月まで)の受賞があり、助教採用、助教から准教授、准教授から教授への昇進が32件(2018年2月まで)あった。2018年4月時点でも昇進の人事があり、客観的にみても、この分野の若手を当初の目標以上に育成できたと判断できる。

(5) 国際会議などを主催し、世界における日本の研究レベルをアピールすること。

(成果) A3 symposium on Emerging Materials (日中韓3か国の原子層物質に関する国際会議)、EU-Japan Workshop on graphene (EU flagship とグラフェンに関する国際会議) Indo-Japan Program on "Graphene and Related Materials"、NT15、など5年間に14件の国際会議を主催・共催した。新学術領域が単独にシンポジウムを開催するよりはるかに有効な方法である。

(6) 研究の成果を、Facebook や ニュースレター、また教科書形式の成果報告書を作成することによって、本新学術領域の最終目的である、「原子層科学の学理の構築」を目指すこと。

(成果) 研究成果に関しては、10回発行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Downloadでき

るようにした。4年次報告書(日本語 350 頁) 最終報告書(日本語 720 頁) は「原子層科学の学理の構築」を意識して、各論の個人の成果の報告でなく、章立てをして分担執筆をする教科書形式でまとめた。Facebook(日本語と英語)では、毎週1回のペースで、最新の成果をわかりやすい形で、かつ3人のレフリーによって文章を修正したうえで公開した。アクセス数は、年ごとに増え 2017 年度は、リーチ数が 37,000 件を超えた。特にこの Facebook は一般の人や、若手の研究者が最新の情報をわかりやすく得る機会となった。これらの方法は、原子層科学のオリジナルな方法であり、目に見えた形で、当初の目標以上の「学理の構築」が達成できた。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 0 件)総括班として発表した論文はない。

〔学会発表〕(計 0 件)総括班として学会発表はない。

〔図書〕(計 4 件)領域代表として、一般向けの領域の解説をした。

齋藤 理一郎、日本化学会編 化学同人、「グラフェンの基礎」、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、p14-24

齋藤 理一郎、共立出版 物理科学最前線5、「フラーレン・ナノチューブ・グラフェンの科学」、2015、163 頁

齋藤 理一郎、丸善 パリティ、「ナノカーボン物理:フラーレン、CNT、グラフェンそして原子層科学」、2015、Vol 30, No. 4,

齋藤 理一郎、仙台放送アプリ 東北大コラム、「究極に薄い物質を作る、という科学」、2015年6月1日-5日

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

原子層科学 ホームページ

<http://flex.phys.tohoku.ac.jp/gensisou/index.html>

原子層科学 Facebook

<https://www.facebook.com/gensisou/>

SATL (Science of Atomic Layers) Facebook  
<https://www.facebook.com/SATL-198930866932885/>

原子層科学 最終報告書(PDF, 54MB, 720 頁)  
<http://flex.phys.tohoku.ac.jp/gensisou/reports.html#rep2018>

#### 6. 研究組織

##### (1)研究代表者

齋藤 理一郎 (SAITO, Riichiro)  
東北大学・大学院理学研究科・教授  
研究者番号: 00178518

##### (2)研究分担者

長田 俊人 (OSADA, Toshihito)  
東京大学・物性研究所・准教授  
研究者番号: 00192526

依光 英樹 (YORIMITU, Hideki)  
京都大学・大学院理学研究科・教授  
研究者番号: 00372566

楠 美智子 (KUSUNOKI, Michiko)  
名古屋大学・エコトピア科学研究所  
研究者番号: 10134818

長汐 晃輔 (NAGASHIO, Kosuke)  
東京大学・大学院工学系研究科・准教授  
研究者番号: 20373441

上野 啓司 (UENO, Keiji)  
埼玉大学・大学院理工学研究科・准教授  
研究者番号: 40223482

塚越 一仁 (TSUKAGOSHI, Kazuhito)  
国立研究開発法人物質・材料研究機構・国際ナノアーキテクトニクス研究拠点・主任研究員  
研究者番号: 50322665

越野 幹人 (KOSHINO, Mikito)  
大阪大学・大学院理学研究科・教授  
研究者番号: 60361797

若林 克法 (WAKABAYASHI, Katsunori)  
関西学院大学・理工学部・教授  
研究者番号: 50325156

町田 友樹 (MACHIDA, Tomoki)  
東京大学・生産技術研究所・教授  
研究者番号: 00376633