

研 究 報 告 書

—2018 年度研究会活動—

第 26 回 研 究 報 告 会

2019 年 7 月 2 日

ATI 公益財団法人 **新世代研究所**
FOUNDATION ADVANCED TECHNOLOGY INSTITUTE

— 目 次 —

- | | |
|--|----|
| (1) 『界面ナノ科学研究会(第9期)の始動』
柴田 直哉 (界面ナノ科学研究会 委員長) | 1 |
| (2) 『円熟のナノカーボン vs 情熱の二次元系』
片浦 弘道 (ナノカーボン研究会 委員長) | 8 |
| (3) 『スピン科学 —現状とこれから—』
齊藤 英治 (スピントロニクス研究会 委員長) | 18 |
| (4) 『中性子回折による高感度水素検出が切り開く構造生物学』
日下 勝弘 (水和ナノ構造研究会 委員長) | 26 |
| (5) 『環境制御微生物と酵素の創生』
西野 吉則 (バイオ単分子研究会 委員長) | 35 |

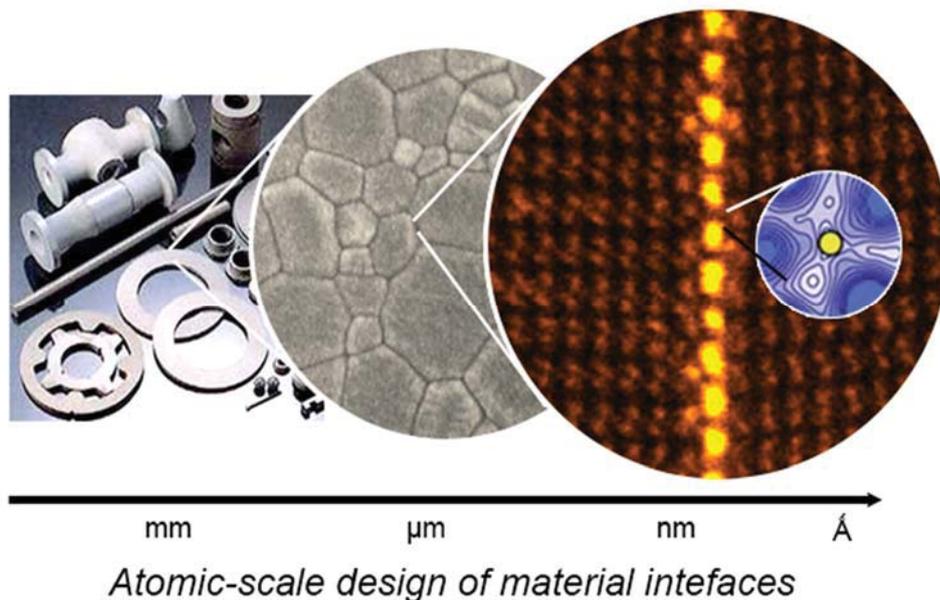
界面ナノ科学研究会(第9期)の始動と2018年度活動報告

委員長 柴田 直哉
東京大学大学院工学系研究科 教授

1. 研究構想

本界面ナノ科学研究会(第9期)は、2012年度から2017年度までの二期合計6年間、東工大の一杉太郎先生を委員長として活動を行ってきた界面ナノ科学研究会(第7,8期)の後継として2018年度から始動した研究会である。一杉研究会での6年間の取り組みを継承しつつ更なる発展を目指し、総勢12名のメンバーによって船出した。メンバーには、材料開発、デバイス創製、ナノ計測、第一原理計算といった様々なバックグラウンドを有する気鋭の研究者にご参画頂き、界面ナノ科学をキーワードとして、幅広い研究分野をカバーする異分野融合領域を形成することを意図している。

界面ナノ科学研究の意義に関しては今更申し上げるまでもないが、物質・材料、エネルギー、情報通信、医療・創薬などの現代社会を根底から支える基盤技術開発において、「ナノ界面」はあらゆる領域に存在し、時として様々な現象発現の起源として作用する。つまり、「ナノ界面」は常に科学の最先端課題であり、全く新しい現象の発見から、それを利用した応用まで、幅広い分野の科学者を魅了して止まない研究対象である。今後、ナノ界面における現象の本質的理解と制御は、材料、デバイス、バイオなど様々な分野のキーテクノロジーとしてますます重要性が増していくと考えられる。



ナノ界面現象を原子・電子レベルから理解し、新たな研究分野を切り開く!

このような背景のもと、近年では原子・電子レベルで界面構造を詳細に計測する手法や、界面電子状態を精緻に予測する計算科学の発展が進んでおり、新奇な現象の発見や界面を積極的に利用したデバイス開発などが多数報告されている。しかし、界面科学のフロンティアはまだ未踏・未開拓の領域が数多くあり、本研究会では、広く界面ナノ科学をキーワードとして、気鋭の中堅・若手研究者を一同に会し、ナノ界面を切り口とした新たな科学分野の潮流を生み出すことを目指している。界面をキーワードするとき、必然的に学際的なメンバーが集うこととなるため、普段密接な交流をもたないメンバー間の”界面”に積極的に”反応”を起こさせることで、新たな研究フロンティアの開拓に挑戦していきたいと考えている。また、社会と研究者の今日的な関わり方に関しても深く議論し、これからあるべき科学者像についても一杉研究会での議論を更に発展させたいと考えている。

委員長を拝命するに当たって、私自身の本研究会に対する基本方針として、以下の事項を念頭に運営を行っていく所存である。

①学際的なメンバーによる最先端の研究交流

本研究会では、「ナノ界面」をキーワードとする研究であれば特に大きな制約は設けず、最先端研究のトップランナー（メンバー及び外部から）をお招きして講演会を開催し、深い議論を行う機会を設ける。これにより、「ナノ界面」に関する新たな発見や共同研究展開などのインキュベーションの場を提供する。

②界面ナノ科学のフロンティア開拓

本研究会に参画頂いている研究者は、ナノ界面に関連する材料開発、デバイス創製、ナノ計測、第一原理計算等の第一線の専門家である。このメンバーを一同に会することで、今後の界面ナノ科学研究のフロンティアについて密接な議論を行い、学術分野としてどのような将来性、可能性があるのか、個々の知見を深めるとともに提言などを取り纏める場としても機能させたい。

③若手研究者の発掘と仲間作り（サロン形成）

研究会等の企画では、積極的に若手研究者の講演を拝聴し、将来に渡る仲間作りの場としたい。日本の学会は個々の研究分野が島宇宙化しており、分野（学会）が異なれば交流する機会が少ないのが現状である。そのため、欧米に比べて研究者集団（サロン）の力が相対的に弱く、社会における信頼度や発言力が弱いことが大きな問題であると考えている。今後、環境問題、エネルギー・資源枯渇、食料不足、人口増加など、世界規模の問題を解決していくためには、研究者集団による科学的根拠に基づいた提言を的確に社会に届けることが極めて重要になる。よって、本研究会では、日本及び世界の将来を背負う責任重大世代（40代）と若手（30代以下）が積極的に議論・交流する場を提供し、10年、20年先を見据えたサロン作りを目指したい。

④科学者と社会、大学の今後、世界と日本、教育

大学を取り巻く環境や社会からの要請が、ここ数年目まぐるしく変化していることを自覚する大学関係者は多いと思うが、それが意味する社会背景を客観的な視点で語れる当事者は意外に少ないかもしれない。これは、様々な立場の情報、意向、考え方が錯綜しており、データに基づいた科学的なアプローチというよりも現場感覚の感情的な意見が流布し易いためであると考えられる。一杉研究会では、このような問題を意識的に議論する場を作り出し、大学の当事者が分野や立場を越えて議論する場を実験的にスタートさせた。本研究会でもそのような理念を踏襲し、今後の大学、教育そして日本の進むべき道などについて大いに議論する場を提供したい。

以上が、本研究会を運営する上での大方針である。なお、私自身は更に個人的に、以下のような期待を抱いている。

- ① 各先生方からご自身の美学溢れる研究の話を知りたい
- ② 未踏峰に挑むような研究の話を知りたい
- ③ 研究活動への初期衝動、情熱を取り戻す場としたい
- ④ 若手研究者の才能に学びたい
- ⑤ 10年、20年の研究交流、壮大なビジョンに繋がりたい

自分自身が打ちのめされるような、胸の熱くなる研究発表を聞けるのではないかとワクワクしながら毎回参加する予定である。

2. 2018年度活動の概要

2018年度は、2回の研究会を開催した。まず、第1回は2018年11月5日に「第9期界面ナノ科学研究会を考える ― 界面研究の新大陸とは? ―」と題してキックオフミーティングを開催した。第2回目は、2019年3月25-26日の一泊二日で、「界面現象の理論 - 最先端と取り組みと展望 -」と題して研究会を行った。

以下に開催した2つの研究会の概要を報告する。

第1回 2018年11月5日

会場：新世代研究所 会議室

テーマ：「9期界面ナノ科学研究会を考える ― 界面研究の新大陸とは? ―」

内容：本研究会は、第9期最初の研究会であり、参加メンバーで第9期3年間の方向性を考える場とした。下記に示すメンバーから自己紹介を兼ねた自身の研究テーマや近況について発表があり、界面研究全体のトレンド・方向性、注目する新分野、研究会への期待等についての意見を拝聴した。最後のディスカッションでは、メンバーからの提案を踏まえ、第9期界面ナノ科学研究会の方向性とロードマップの検討を行った。基本路線として、界面を取り巻く最先端の理論、計測、材料・デバイス創製、バイオ界面などのテーマで研究会を年2回程度行っていくことが大筋

で合意された。当日は、以下のメンバーからの発表があった。

- ①柴田 直哉 (東京大学、委員長)
- ②戸川 欣彦 (大阪府立大学、会員)
- ③安藤 康伸 (産業技術総合研究所、会員)
- ④千葉 大地 (東京大学 (現大阪大学)、会員)
- ⑤塩見 淳一郎 (東京大学、会員)
- ⑥大友 明 (東京工業大学、会員)
- ⑦福間 剛士 (金沢大学、会員)
- ⑧森田 清三 (大阪大学、会員)

また、第2回研究会のテーマ案が議論され、界面現象を取り扱う理論における最近の進展（第一原理計算、AI・機械学習、大規模計算、熱力学など）についての研究会を行うことが決定した。その後の意見交換会では、具体的な講師の先生方の選定について活発な議論があり、各メンバーが分担して講演依頼を行うことになった。更に、ATI 研究助成に採択された若手研究者の中から界面ナノ科学と親和性の高い分野の先生方にも御講演頂くこととし、散会となった。

第2回 2019年3月25-26日

会場：野地温泉ホテル (福島県土湯温泉)

テーマ：「界面現象の理論 - 最先端と取り組みと展望 -」

内容：第2回の研究会では、界面現象に関する最先端の理論的取り組みについての講演会を初日に行った。以下の先生方のご講演を拝聴し、活発な議論を行った。

- ・渡邊 聡 (東京大学) 「第一原理計算に基づく界面構造・物性解析に関するいくつかの話題」
- ・塩見淳一郎 (東京大学) 「界面ナノ構造のフォノン輸送」
- ・明石遼介 (東京大学) 「超伝導密度汎関数理論の発展：理論および応用」
- ・沙川貴大 (東京大学) 「情報処理の熱力学」

渡邊先生からは、第一原理計算を用いた固体界面における最近の研究について御講演頂き、機械学習などを取り入れた最新の取り組みについてもご紹介いただいた。塩見先生には、ナノ界面のフォノン輸送をどのように理論的に予測するのかに関して、現状と展望について御講演頂いた。明石先生には、超伝導密度汎関数理論について、その理論的基礎および応用に関する最新トピックスを御講演頂いた。沙川先生からは、情報熱力学の基本的な考え方とマックスウェルデーモンに関してわかり易い御講演を頂いた。いずれの講演も議論が尽きず白熱し、時間をオーバーする結果となった。

また、二日目は以下に示すATI 研究助成採択者によるご講演を拝聴し、新進気鋭の若手研究者との活発な議論の場を得た。

- ・近藤 浩太 (理研) 「局在プラズモン共鳴を用いた新奇スピントロニクス機能の開拓」
- ・馮 斌 (東京大学) 「原子分解能電子顕微鏡法に基づいた結晶界面の三次元構造再構築」

近藤先生からは、プラズモン共鳴を用いた表面状態の制御や新奇スピントロニクス機能発現の

可能性について、これまでの取り組みと本助成での挑戦についてご紹介頂いた。馮先生からは、セラミックス粒界の三次元原子構造をいかに通常の原子分解能電子顕微鏡像から再構成するの
かに関する最新の研究トピックスをご紹介頂いた。

以上の講演を通じて、各メンバーが今後の界面理論に関する俯瞰的な知見を得ることができ、
大変意義深い研究会となった。



第2回研究会での記念撮影

3. 2019年度活動の構想

2019年度は、本研究会を本格始動し、年2回の研究会を行う予定である。テーマとしては、「界面デバイス、材料開発」に関する研究会、「最新界面ナノ計測」に関する研究会を構想しており、外部からの講師の先生をお招きして活発な議論を行う場としたい。また、若手研究者を積極的に御招待して最新の界面研究とその研究に対する熱い想いを拝聴し、将来の共同研究や研究交流に繋がるような参加者一同の糧となるような研究会を開催したい。

研究会開催記録

【第1回】2018年11月5日(月) 御茶ノ水

「第9期界面ナノ科学研究会を考える –界面研究の新大陸とは?–」

1. 柴田 直哉 (東京大学)
2. 戸川 欣彦 (大阪府立大学)
3. 安藤 康伸 (産業技術総合研究所)
4. 千葉 大地 (東京大学)
5. 塩見 淳一郎 (東京大学)
6. 大友 明 (東京工業大学)
7. 福間 剛士 (金沢大学)
8. 森田 清三 (大阪大学)

参加者 8名 (会員 8名、外部 0名)

【第2回】2019年3月25日(月)–26日(火) 福島県福島市野地温泉

3月25日(月)

「界面現象の理論 - 最先端と取り組みと展望 -」

1. 「第一原理計算に基づく界面構造・物性解析に関するいくつかの話題」
東京大学大学院 工学系研究科 マテリアル工学専攻 渡邊 聡※
2. 「界面ナノ構造のフォノン輸送」
東京大学 工学系研究科 塩見 淳一郎
3. 「超伝導密度汎関数理論の発展：理論および応用」
東京大学 理学部 明石 遼介※
4. 「情報処理の熱力学」
東京大学大学院 工学系研究科 物理工学専攻 沙川 貴大※

※印は外部の講演者

3月26日(火)

「研究助成採択者による講演」

5. 「局在プラズモン共鳴を用いた新奇スピントロニクス機能の開拓」
理化学研究所 創発物性科学研究センター 近藤 浩太
6. 「原子分解能電子顕微鏡法に基づいた結晶界面の三次元構造再構築」
東京大学大学院 工学系研究科 総合研究機構 馮 斌

参加者 15名 (会員 10名、外部 5名)

界面ナノ科学研究会員名簿

柴田 直哉	東京大学 大学院工学系研究科	教授 研究会委員長
一杉 太郎	東京工業大学 物質理工学院	教授
高橋 琢二	東京大学 生産技術研究所	教授
森田 清三	大阪大学	名誉教授
大友 明	東京工業大学 物質理工学院	教授
戸川 欣彦	大阪府立大学 工学研究科	教授
陰山 洋	京都大学 大学院工学研究科	教授
村上 修一	東京工業大学 理学院	教授
安藤 康伸	産業技術総合研究所機能材料コンピューテーショナルデザイン研究センター	主任研究員
千葉 大地	東京大学工 学系研究科物理工学専攻	准教授
福間 剛士	金沢大学 新学術創成研究機構 ナノ生命科学研究所	所長・教授
塩見 淳一郎	東京大学 大学院工学系研究科	教授

2019年3月現在

円熟のナノカーボン vs 情熱の二次元系

委員長 片浦 弘道

産総研ナノ材料研究部門 首席研究員

はじめに

ブラックオイルとモリオイル。学生時代自分の車にこんなエンジンオイルを入れた記憶がある。添加物の詳細をメーカーは明かさなかったと記憶しているが、それぞれグラファイト微粉末と二硫化モリブデン粉末入りのエンジンオイルであると思われる。どちらも固体の潤滑剤として知られているが、果たしてこいつらを入れたオイルが、通常のオイルに比べてどれほどの優位性があったのか定かでない。まあ、本当に良いのなら、自動車メーカーが純正オイルとして採用するはずだというのが、学生間のお話の締め方だった。要するに効果を本気で期待してはいないものの、ひょっとすると、と思って何度もだまされる消費者の典型である。まあ、費用対効果が問題で、確かに効果はあるが価格に見合わないというのも純正採用されない理由になり得るので、一概に効果が無いとは言えないかも知れないのだが。この原稿を書き出して、こんなレベルでもずいぶん昔からこれらカーボン材料と二次元材料は競い合っていたのだなあと思い出した。そういう意味では、これらの材料は決して新しくない。

ナノカーボン研究会 2018 年度トピックス

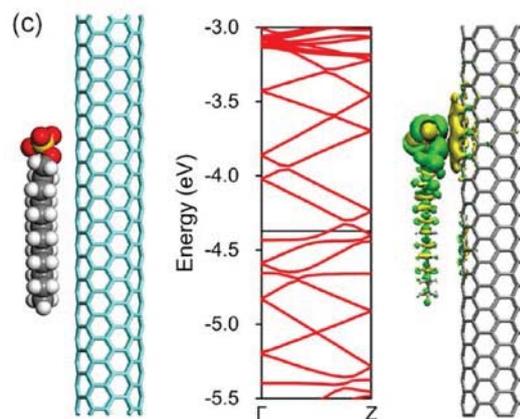
フラーレンからカーボンナノチューブ (CNT)、そしてグラフェンと進展を続けてきたナノカーボン材料の研究も、現在では上述の二硫化モリブデンを含む遷移金属ダイカルコゲナイド (TMDC) など、グラフェン以外の二次元系材料に研究は大きく広がりを見せている。日本における二次元材料の研究の発展には、ナノカーボン研究会の前委員長である齋藤理一郎先生が代表をされた新学術領域「原子層科学」が果たした役割が非常に大きかったのは言うまでも無い。炭素のみから成るナノカーボン材料においては、単一の元素から成る材料でありながら、そのネットワーク次元性の変化や構造の変化によって、物性が多彩に変化するところが非常に興味深かったが、他の化合物系にまで間口を広げた新規二次元系では、単に次元性の問題にとどまらず、元素の違い、結晶構造の違いなど、その自由度は大きく拡張された。さらに最近では、異種の二次元材料で面内・面間でヘテロ接合を作製するなど、極めて高度な材料技術が可能になっており、もはや単一の物質系として捉えることのできない新たな概念へと広がっている。こう見ると、まさに無限の可能性を持つ新規二次元系がすごく魅力的にも見えるが、いやいやナノカーボン材料にもまだまだ面白い事がたくさんあり、話題が尽きることが無い。

ナノカーボン研究会でも、もはや円熟の領域にも差し掛かっているナノカーボン材料と新進気鋭、情熱の二次元系が毎回それぞれに面白い話題を提供してくれている。材料

系を活動動機として進展する研究分野で、最も大切なのはやはり材料の品質である。きちんとした材料で無ければ、まともな物性は期待できない。以前、カーボンナノチューブの毒性に関する研究プロジェクトの中で、既報の研究論文の統計の結果を聞いたことがあるが、面白い事に、その材料に見られる毒性の高さと、キャラクターゼーションには奇妙な相関があると言うことであった。論文中でキャラクターゼーションのいい加減な、何だかわからない材料ほど高い毒性を示すということだ。これは、その論文執筆の動機付け、いや研究者の心構えによると言ってもいいかも知れない。要するに、キャラクターゼーションもまともにできないやつに、物性を語る資格は無い。単にセンセーショナルな論文を書きたいという輩はいつの世もいる。

フラーレンも CNT も、様々な構造異性体が存在する。幸いな事に、フラーレンは溶媒に溶けたため、クロマトグラフィーを使うことで比較的容易に構造分離が可能になった。もっとも、実際の合成から分離・精製に至る工程は大変手間のかかるもので、決して容易な道では無かったが。CNT は溶媒に溶けないため、構造分離実現までに長い年月を必要としたが、面白い事にやはりクロマトグラフィーで構造分離が可能になった。ただし、その分離原理は全く異なっている。研究会メンバーの大淵先生は、CNT への界面活性剤吸着のエネルギー論を第一原理計算で明らかにし、2018 年蔵王で開催されたナノカーボン研究会で報告された。2004 年に米国のチームが 2 種類の界面活性剤と密度勾配超遠心分離法を用いて、カーボンナノチューブを金属型と半導体型にきれいに分離した快挙から、14 年経ってようやくその分離原理の正しい理解にたどり着きつつある。ドデシル硫酸ナトリウム (SDS) のイオンが CNT に吸着した際の電荷分布は、モスラの幼虫が東京タワーにしがみつ়く様に似ているが、その吸着のエネルギーが金属型と半導体型で大きく異なる事が明らかになった。違いの理由は界面活性剤とナノチューブ間の電荷の移動で、まさにそれが、分離のおおもとの原理である。吸着エネルギーの違いが、CNT に吸着する界面活性剤の量の違いを生む。あとは、この界面活性剤の量の違いをどのような手法で効率よい分離に結びつけるかというのが、実験屋の腕の見せ所というわけだ。

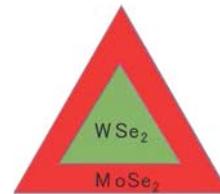
制御合成の困難さから、合成後の構造分離に終始しているナノカーボン材料に対し、新規二次元系ではレベルの高い制御合成が可能になりつつある。しかも、合成後に転写



(5, 5)CNT に吸着したドデシル硫酸イオンの構造 (左) とバンド構造 (中) と電荷分布 (右) (緑が正、黄色が負)

Mari Ohfuchi, J. Phys. Chem. C 2018, 122, 4691-4697.

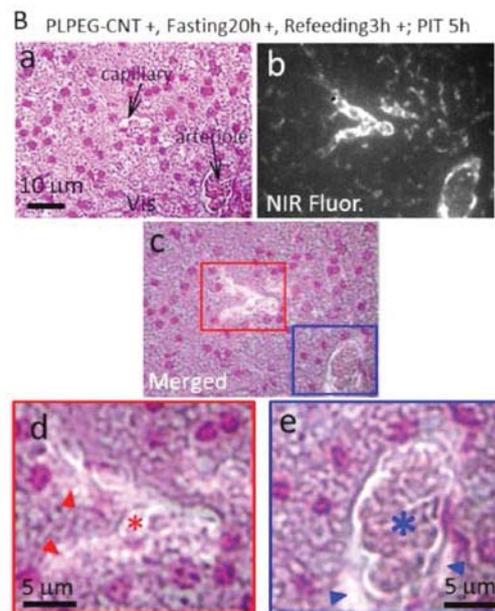
するという技も可能であり、様々な構造を人工的に構築できる。この合成時の制御性の高さがこの材料系の魅力だ。当研究会メンバーの宮田先生は、単層の MoSe_2 と WSe_2 を面内で接合させることに成功した例を発表された。まず、三角形の WSe_2 の二次元結晶を基板上に CVD で成長させる。そこに間髪入れずに MoSe_2 を成長させると、 WSe_2 を取り囲む様に MoSe_2 の結晶が成長する。アイデアだけを聞くと、そんなに都合良く結晶成長が進むのか? と思ってしまうが、実際にできてしまうのだから素晴らしい。どちらも単原子層の二次元膜であるから、それらの界面は一次元の線になる。もちろん、このような高度な制御合成は決して楽では無い。各元素の原料を独立に制御して供給する自動化された CVD 装置を構築し、さらに結晶成長にいろいろと鼻薬を効かせて初めて可能となる。宮田先生は、この複雑な合成プロセスを成功させたわけだ。研究会では、1次元界面の魅力的な物性の一部を披露していただいたが、残念ながらまだ未公開であるため、ここから先は論文になるのを待つしか無い。



WSe_2 と MoSe_2 の面内ヘテロ接合模式図

未発表データで大いに盛り上がった話題は、CNT にもある。メンバーの湯田坂先生は、カーボンナノチューブからの近赤外蛍光をプローブとして、生体内の造影を行っている。

蔵王や野地温泉の会議でこれらの先端の結果を惜しげも無く披露された。半導体型の単層カーボンナノチューブは生体透過性の高い近赤外領域において、明るい蛍光を示す事から、生体の蛍光染色材料としての応用が検討されている。その際、分散剤をうまく調整することで、長期に渡って蛍光を維持できる。尻尾の血管からマウスに投与して、血流で運ばれる CNT をリアルタイムで観察し、特定の臓器や組織に滞留させて、その組織を蛍光造影する事が可能である。しかも、解剖して顕微鏡観察用の試料を作製してもなお、明瞭な蛍光を発することから、マクロな動的観察から、ミクロな組織の観察まで一貫してその様子を観察する事ができるという利点を持つ。このような長寿命の蛍光染色剤は他に無い。そのため、ナノチューブ染色を用いる事で、組織への滞留のメカニズムをマクロ・ミクロな観察

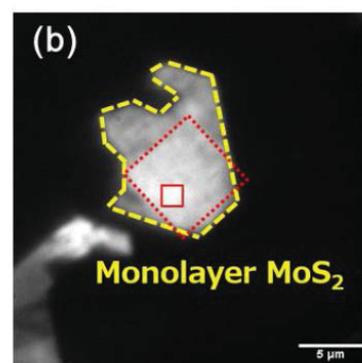


20 時間絶食させ、CNT を静脈内投与したマウスの褐色脂肪組織(核染色)の顕微鏡写真。可視光透過顕微鏡写真(a)と近赤外蛍光顕微鏡写真(b)、および(a)と(b)のマージ写真(c-e)。(b-e)の白い部分がCNTの蛍光。毛細血管からCNTが漏出(赤△と青△)していることから、絶食により血管がダメージを受けたことがわかる。
Masako Yudasaka et al. Sci. Reports 2018, 8, 14446.

で詳細に検討することが可能になる。この手法を用いて、湯田坂先生は新たな発見を次々と見いだされている。ミトコンドリアが存在するため脂肪組織でありながら褐色に色づいた褐色脂肪組織は、熱を発することのできる脂肪組織であり、この組織が活性化すると運動する事無くカロリーを消費する事から、生活習慣病予備軍の体重・脂肪のコントロールに生かせるということで、最近注目されている組織である。その褐色脂肪組織を選択造影する手法を応用して、飢餓状態で褐色脂肪組織がどのように変化するか、マクロ・ミクロの双方から確認した結果は、脂肪組織に詳しい医学者も驚く結果であり、世界的に高く評価された。現在、湯田坂先生の研究対象は、さらに医学的に重要度の高い方向に進んでおり、非常に興味深い結果に委員会は大いに盛り上がった。しかし残念ながらこれも未発表データのため、ここには書くことができない。思わせぶりで申し訳無いが、もうしばらくお待ちいただくしかない。これらの研究では、ナノチューブを単に蛍光染色材料として利用しているわけだが、その実験手法には、長年の研究の蓄積が生かされており、まさに円熟のナノカーボン研究の成果である。

一方、情熱の二次元系は、やはり試料の質にこだわる。これまでできなかった構造を実現するのも重要だが、その品質にもこだわりたい。単原子層からなる二次元系材料は柔らかいシート状試料であるから、基板の凹凸を拾って物性が変化してしまう。この系の物性研究において基板の平坦性は重要なカギとなる。この問題に大きく貢献したのが、六方晶(h)BN 基板である。この結晶が生み出す完全にフラットで電氣的に絶縁された表面は、二次元系の物性研究にブレークスルーをもたらした。上記「原子層科学」では、物質材料研究機構から良質な hBN 基板が提供された。メンバーの北浦先生も、試料の質にはこだわる一人だ。劈開 hBN 基板を用いて、二次元系材料を挟み込むという神業を披露してくださった。下地だけでは不十分で、表面も覆って完全に保護しようというわけだ。単層の二硫化モリブデン結晶を hBN 基板上に成長させ、そこに別の hBN フレークを PMMA 上に貼り付けて転写し、さらに載せた hBN フレークの上から AFM チップで押さえ込んでスキャンし密着させるという手の込んだ手法だ。さて、二硫化モリブデンはバルクでは間接ギャップ型半導体だが、単層の結晶になると直接ギャップ型に変化する。間接ギャップと直接ギャップでは、蛍光の特性が大きく異なる。北浦先生は、hBN で挟み込んだ単層二硫化モリブデン結晶の蛍光の温度依存性を測定する事により、この単層試料のバンドギャップが間接型になっていることを突き止めた。

第一原理計算から、hBN と二硫化モリブデンの軌道の混成が間接ギャップ化の原因であると考察している。hBN は、基板として極めて優秀で、大きな成果を導いたが、二次元



hBN に挟まれた MoS₂ からの蛍光像
Yosuke Uchiyama et al.,
arXiv:1903.06427 (2019)

結晶と相互作用が無いというわけでは無い。hBN でサンドイッチする手法は最近流行の手法らしいが、孤立した二次元結晶の物性測定が可能になると安易に期待してはいけないという、興味深い結果である。逆に言えば、転写というまるでシールを貼るような作業で、電子軌道の混成によるダイナミックな物性の変化を引き起こすことが可能であるという、ハイテクなのかローテクなのか良くわからない、ナノテクノロジーの世界がそこには展開されている。この辺の仕事の美しさが、二次元系の面白さなのだと思う。現在、材料のコントロールはこのレベルまで到達していると言うことでもある。

丸山先生は、最近 CNT に BN の衣を着せることに熱心である。CNT を基板としてその曲面上に BN 層を成長させる。BN は透明なので、一見何も変わらないが、確かに BN 層ができています。ここまで来ると、ナノカーボンなのか二次元系なのかもはや区別がつかない。

さて、近年バレートロンクスが注目されている。グラフェンや TMDC の様に、伝導帯の底（バレー）が有限の運動量を持つ系では、複数の独立のバレーが存在し、電子はその中のどの状態をとるか自由度がある。このバレー自由度を利用するのが、バレートロンクスである。グラフェンの K 点と K' 点の電子は逆向きのカイラリティーを持つため、円偏光の右巻きと左巻きを使うことで、別々に励起する事ができる。このように、バレートロンクスでは、通常あまりなじみの無い円偏光が登場する。前委員長の齋藤先生は、この円偏光を用いた物性研究はこういった材料群に対して非常に有効で、宝の山である事を示された。円偏光が反転するラマン散乱や、円偏光の EL 発光など、楽しい話題がいっぱいである。特に、CNT では右巻きと左巻きの構造の違いと右巻きと左巻きの円偏光との相互作用が面白い。CNT の光吸収では、CNT の直径が小さいため、CNT 軸に垂直な偏光の反電場効果が大きくなり、光吸収が抑制される事が知られているが、この効果は円二色性スペクトルにも影響を及ぼすという計算結果が示された。エナンチオマー分離した単一カイラリティーCNT を配向させて円二色スペクトルを測定すれば、CNT の向きによりスペクトルが大きく変化する。さて、我々のところには分離した試料があり、配向も可能である。そろそろやらないと、叱られそうである。

2018 年度 活動報告

2018 年度のナノカーボン研究会は、例年通り夏の蔵王研究会と冬の野地温泉の研究会の 2 回開催した。例年通り、蔵王の研究会では各メンバーの研究室から若手の研究者や学生に（若手分の旅費は各メンバーの予算を利用して）参加してい



蔵王 2018 研究会 会場のホテルの前で集合写真

ただき、これも例年通り、英語での発表・質疑応答で小さな国際会議風に開催した。2018年度もなかなかの盛会であった。いつも使用している会場があいにく満室で、姉妹店を利用したのだが、そこではバーベキューが可能だと言うことで、齋藤先生がいろいろと準備してくださり、盛大なバーベキューパーティーを開催できた。海外からの若手研究者向けにハラル対応も完璧であった。ホテル側との連絡がうまくついていないなど、アクシデントがあったものの、それも含めて結果的にすべて良い方向に収まり、大満足の会議となった。バーベキューに気を良くした我々は、来年度の蔵王2019もこちらの会場で開催することにした。



バーベキューパーティー@蔵王2018 大盛況！

冬は野地温泉で、メンバーのみの参加で、日本語でじっくりと議論する機会を得た。そういえば、野地温泉も以前に良く使っていたたまご湯が満室で、その代わりに探していただいた宿である。この温泉は、本当に良い。実は私は温泉があまり好きでは無いのだが、この温泉だけは別である。不都合な出来事も、後で振り返ればむしろ良かったという事もある。いや、そんな事ばかりだ。研究もしかりである。長く生きていくと、だんだん図太くなるものだ。



野地温泉での会議風景：驚くべき成果で議論が白熱した湯田坂先生の話提供。内容は発表前のため非公開。

国際フォーラムとして、齋藤前委員長からの申請で、9th A3 symposium of Emerging Materials: Nanomaterials for Electronics, Energy, and Environment, Oct. 29-31, 2018, Kyoto, Japan (<http://www.iae.kyoto-u.ac.jp/conv/a3/index.html>) が採択された。韓国・中国・日本の3カ国が毎年持ち回りで開催するCNT関連の会議である。今回は、京都大学の松田先生が主催で開催された。科学の社会は実に平和である。

研究会開催記録

【第1回】2017年8月1日(水)–2日(木) 山形県山形市蔵王温泉

8月1日(水)

Invited talk:

1. Low-defective dispersion of SWCNTs
Hiromichi Kataura, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology
2. Conservation law of angular momentum in Raman spectra by circularly polarized light
Riichiro Saito, Tohoku University
3. Modulation doping in atomic-layer semiconductors
Susumu Saito, Tokyo Institute of Technology
4. All-dry fabrication of hBN-encapsulated devices with high-quality CVD-grown transition metal dichalcogenide flakes
Ryo Kitaura, Nagoya University
5. Flexible Carbon Nanotube ICs for Wearable Electronics: Device Modeling, Circuit Design Tools, and Fabrication
Yutaka Ohno, Nagoya University
6. Raman signal of Dirac mass
Kenichi Sasaki, NTT Basic Research Laboratories

Contributed talk:

7. Transverse Magnetic and Transverse Electric Surface Waves in Silicene
M. Shoufie Ukhtary, Tohoku University
8. Exciton-phonon coupling in MoS₂ by Resonance Raman Scattering
Toshiya Shirakura, Tohoku University
9. Mo₃S₁₁ polymer as high capacity anion redox electrodes for sodium-ion battery
Nguyen T. Hung, Tohoku University
10. Spontaneous Self-Assembly of One-dimensional Transition-metal Chalcogenides Inside Carbon Nanotubes
Yusuke Nakanishi, Nagoya University
11. High-output, transparent and stretchable triboelectric generator with carbon nanotube thin film
Masahiro Matsunaga, Nagoya University
12. Toward high-efficiency electric power generation devices: control of SWCNT carrier density by encapsulating organic molecules
Guowei Wang, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology
13. Improved interlayer coupling in suspended van der Waals heterostructures
Kana Kojima, Tokyo Metropolitan University

8月2日(木)

Invited talk:

14. Quantification of CNTs in Mice Excrements
Masako Yudasaka, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology
15. Ab Initio Study of Sodium Dodecyl Sulfate on Single-Wall Carbon Nanotubes
Mari Ohfuchi, Fujitsu Laboratories Ltd.
16. CVD growth of in-plane heterostructures based on two-dimensional semiconductors
Yasumitsu Miyata, Tokyo Metropolitan University
17. Sorting of Semiconducting Carbon Nanotubes with large diameter by Column Chromatography
Takeshi Tanaka, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

Contributed talk:

18. Optical transition mechanism in tip-enhanced Raman spectroscopy of monolayer graphene
F.R. Pratama, Tohoku University
19. Chirality dependence of depolarization effect in single-wall carbon nanotubes
Yuya Iwasaki, Tohoku University
20. Doping effect on the electronic and vibrational properties of armchair graphene nanoribbons
M. S. Islam, Tohoku University
21. THz antenna handling circularly polarized light
M. Maruoka, Tohoku University
22. Photoluminescence polarization for detecting valley polarization and coherence in a monolayer MoS₂
M. Suzuki, Tohoku University
23. Electric double layer light emitting diode of WSe₂/MoSe₂ in-plane heterostructures
Yuhei Takaguchi, Tokyo Metropolitan University
24. In-plane heterostructures based on twisted WSe₂ bilayers
Hong En Lim, Tokyo Metropolitan University
25. Improving Single walled Carbon Nanotubes via Coaxial Wrapping and Durable Doping: Toward Applicable Devices
Ahmed Shawky (University of Tokyo)

参加者 27名 (会員 9名、外部 18名)

【第2回】2019年2月21日(木)–22日(金) 福島県福島市野地温泉

テーマ：「これ、面白いんだけど？」

1. 「カーボンナノチューブの欠陥について考える」
産総研 ナノ材料研究部門 片浦 弘道
2. 「褐色脂肪組織のなぞ：コラーゲン線維」
産総研 ナノ材料研究部門 湯田坂 雅子
3. 「酵素-カーボンナノチューブ複合体の応用」
産総研 ナノ材料研究部門 田中 丈士
4. 「カーボンナノチューブや二次元材料と分子の相互作用」
富士通研究所 大淵 真理
5. 「グラフェンエネルギーギャップのフォノンスペクトルによる同定」
NTT 物性科学基礎研究所 佐々木 健一
6. 「単層CNTを中心に成長させた一次元ファンデルワールスヘテロ構造」
東京大学大学院工学系研究科，産総研エネルギーナノ工学ラボ 丸山 茂夫
7. 「MoSe₂ ナノリボンの成長と評価」
首都大学東京 物理学教室 宮田 耕充
8. 「原子層ヘテロ構造における層間相互作用」
名古屋大学 理学研究科物質理学専攻 北浦 良
9. 「円偏光に関する光物性で、面白い話」
東北大学理学研究科 齋藤 理一郎

参加者 10名（会員9名、外部1名）

ナノカーボン研究会員名簿

片浦 弘道	産業技術総合研究所 ナノ材料研究部門	首席研究員 研究会委員長
齋藤 理一郎	東北大学 大学院理学研究科物理学専攻	教授
遠藤 守信	信州大学 先鋭領域融合研究群カーボン科学研究所	特別特任教授
榎 敏明	東京工業大学	名誉教授
斎藤 晋	東京工業大学 理学院 物理学系	教授
北浦 良	名古屋大学 大学院理学研究科	准教授
湯田坂 雅子	産業技術総合研究所 ナノ材料研究部門	招聘研究員
本間 芳和	東京理科大学 理学部物理学科	教授
佐々木 健一	NTT物性科学基礎研究所 機能物質科学研究部	主任研究員
若林 克法	関西学院大学 理工学部	教授
丸山 茂夫	東京大学大学院 工学系研究科機械工学専攻	教授
大野 雄高	名古屋大学 未来材料・システム研究所	教授
宮田 耕充	首都大学東京 大学院理学研究科	准教授
大淵 真理	(株)富士通研究所	シニアマネージャー
田中 丈士	産業技術総合研究所 ナノ材料研究部門	上級主任研究員

2019年3月現在

スピン科学—現状とこれから—

委員長 齊藤 英治
東京大学大学院工学系研究科 教授

1. 研究構想

本研究会名が冠する「スピントロニクス」は、日本が長年の蓄積と強みを持つ磁性と電子物性研究の融合により生み出された研究分野である。そのネーミングには、基礎科学の対象であったスピンをより深く理解し、次世代エレクトロニクスといった先端技術応用に結びつけるという思いが込められている。日々大学等で生み出されるスピントロニクスの最新成果は、研究室の枠を越え、今や瞬く間に民間企業での製品開発競争に取り入れられるようになってきた。

このような背景のもと、日本のスピントロニクス研究の中心メンバーを結集し、それぞれが得意とする専門領域を超えた人材交流による学術研究の展開と異分野研究領域の融合を推進することで、「新しい研究コンセプトの提案」を行うことが本研究会の目的である。

これまでを振り返ってみると、本研究会初代委員長の新庄輝也先生のもと、「微小領域の磁性体」を人工的に作成・制御する技術とその伝導特性や磁気ダイナミクスを詳しく調べる解析法が整備され大きく発展した。第二代目委員長の前川禎通先生は、スピン角運動量の流れである「スピン流」の概念を定着させ、様々なスピン流生成法・利用法の研究を牽引された。また、国際的な研究交流の促進にも尽力された。そして第三代目、前委員長の太谷義近先生は、スピンを媒介とした電気、光、音、振動、熱の相互変換現象である「スピン変換」の研究を推進し、若手新メンバーを積極的に取り入れ研究者コミュニティの活動基盤を今まで以上に強固なものとした。

太谷前委員長からバトンをゆずり受け、2018年4月より本研究会は4名の会員を加えた新体制で出発をした。スピントロニクスのさらなる発展には、物理現象の普遍性と、高度に完成された理論体系が土台として必要とされる。スピン流など角運動量を軸とする物質科学「スピン科学」を建設し、これまでになかった動作原理で稼働する革新的な情報処理デバイスの実現を目指す。

2. 2018年度活動の概要

2018年度は、次の3テーマについて研究会を開催した。

- ・第1回（2018年5月7日）「人工知能デバイス応用へ向けたスピントロニクス」
- ・第2回（2018年10月22日）「ワイル物質のスピントロニクス」
- ・第3回（2019年3月22日）「MRAM技術の最前線」

各テーマを牽引する講演者を3~4名招き、未発表情報を交えた講演とそれに基づく意見交換が行われた。テーマ選定の理由は、スピントロニクスにとって人工知能デバイスは新しい機能発現の場となり、トポロジーに規定された物性を有するワイル物質は機能性新材料として大きな可能

性を秘めている。また、MRAM 技術は今なお当該分野の最も重要な応用事例となっている。いずれの研究会でも、スピントロニクス研究の今後の展開を見据える上で重要な知見が共有された。

以下に開催された3回の研究会の概要をまとめる。

第1回：2018年5月7日（月）15:30～18:40 + 意見交換会

会場：御茶ノ水 ATI 会議室

参加者：14名（会員11名、外部講演者1名、齊藤研究室2名）

テーマ：「人工知能デバイス応用へ向けたスピントロニクス」

各講演は発表45分、議論10分

意見交換会会場：淡路町カフェ CAPPUCETTO ROSSO（カプチエット・ロン）

近年、スピントロニクスの新しい応用先として、「人工知能デバイス」に注目が集まっている。第1回研究会のテーマは「人工知能デバイス応用へ向けたスピントロニクス」とし、そのハード面に関して3名の講演者から最新成果についての紹介がなされた。

講演に先立ち、伊達理事長より「スピン流が実用化される可能性について興味を持っている」というご挨拶を賜り、齊藤委員長より本研究会の「非公開で世間の一年先を議論する」という特徴と、新たに加わった会員4名（介川、深見、関、家田）の紹介があった。

講演①「トンネル磁気抵抗素子を用いたリザバー計算と

磁気スキルミオンによるブラウニアン計算」

大阪大学 大学院基礎工学研究科 鈴木義茂先生

鈴木氏は、冒頭スピントロニクス研究の歴史を概観し、磁化制御手法の最先端である電圧制御技術を応用して人工知能デバイスへの足がかりを築くという研究構想が紹介された。80年代中頃に提案されたスピングラスによる脳型計算は、情報読み出しの困難から実現できなかった。これを現在のスピントロニクス技術により実現する道筋を示し、シミュレーションによる検討結果が示された。また、熱力学的な可逆過程に近いブラウニアン計算のコンセプトを、磁気スキルミオンを導入した微小チャンネルを適切に組み合わせることで実現する、非ノイマン型の超低エネルギー計算機の将来展望についても紹介された。



講演②「アナログスピントロニクス素子を用いた脳型情報処理」

東北大学 電気通信研究所 深見俊輔先生

深見氏は、まず Alpha-Go に代表される現行の脳型情報処理が大型計算機に頼っており、大量の電力を消費するという課題を指摘した。本来の脳が持つような小型で低消費電力なハードウェアが必要であるという将来像を提示され、反強磁性体と強磁性体の接合系に着目した研究成果の紹介がなされた。具体的には、反強磁性体の多磁区構造が磁気抵抗値のアナログ制御をもたらし、これが人工シナプスとして利用できることを模擬実験とともに示された。また、この人工シナプスは、学習によりパターンを不揮発に記憶し、かつ不完全な入力に対しても正しいパターンを想起する能力があることが紹介された。

講演③「スピントルク発振素子を用いたリザーバー計算」

産業技術総合研究所 スピントロニクス研究センター 常木澄人先生

常木氏は、スピンドYNAMIKSの持つ非線形性に基づく人工ニューロンの形成について紹介された。直流電流による高周波発振のために開発が進められてきたスピントルク発振素子は、ダイナミクス様式に強い非線形性を示す。この非線形性をニューロンにおける発火現象に対応させ、時間分割法により単一の振動子で400ニューロンの仮想ネットワークが構築されることが示されその評価結果と共に紹介された。

第2回：2018年10月22日（月）13:30～18:00 + 意見交換会

会場：御茶ノ水ソラシティ カンファレンスセンターRoom D

参加者：24名（会員13名、外部講演者4名、前川先生所属理研研究室1名、村上研究室6名）

テーマ：「ワイル物質のスピントロニクス」

各講演は発表45分、議論10分

意見交換会会場：Terrace 8890（ワテラスタワー コモン 3階）

固体電子の性質を、電子波動関数の波数空間が有するトポロジーの視点から理解する試みが、物性物理学や材料科学分野において盛んに行われている。その中でもワイル半金属またはワイル物質と称される一群のトポロジカル物質に焦点を当て、そのスピントロニクスとの関連を探る。4名の外部講演者を招き最新成果についての紹介を受け意見交換を行った。企画時の予想を超えた参加者のため、直前に会場を変更する必要があったが、会議冒頭には伊達理事長より盛会を喜ぶコメントが寄せられた。

講演①「イリジウム酸化物における強相関ディラック・ワイル電子の磁気輸送現象」

筑波大学 数理物質科学研究科 藤岡 淳先生

藤岡氏は、トポロジカル物質としてのディラック半金属やワイル半金属の示す多様な量子伝導現象を紹介した後、これまでの一電子近似の枠を超えた電子相関の効果が重要となる強相関領域

のトポロジカル物質として関心が持たれているイリジウム酸化物に着目した実験研究成果を紹介した。特に、パイロクロア型物質のモット転移近傍で観測された巨大な異常ホール効果と波数空間において定義されるベリー位相の関係について実験結果に基づき議論された。

講演②「立方対称なワイル磁性体の有効模型とホール効果・磁気抵抗」

東京大学大学院 工学系研究科 物理工学専攻 石塚大晃先生

石塚氏は、直前の講演内容の実験結果を受けてその理論背景について詳細な解説を行った。ワイルノードのベリー位相や量子異常 (chiral anomaly) が導く特徴的な輸送現象として、ワイル物質における異常ホール効果と磁気抵抗効果を取り上げて、具体的な対象物質に即した有効模型の導入とその解析結果の検討事例を紹介した。量子相対論の模型であったワイル方程式は線形の分散関係を持つが、物質中ではより一般的な有効模型への拡張が必要となる。このような実際のワイル半金属における磁気抵抗を記述する一般化された公式が示された。

講演③「ワイル磁性体を用いたトポロジカルスピントロニクス」

東京大学大学院 物性研究所 中辻 知先生

中辻氏は、通常強磁性体が示す異常ホール効果、異常ネルンスト効果、磁気光学カー効果といった電気磁気応答が、反強磁性体の Mn_3X ($X = Sn, Ge$) において観測されたことを紹介した。反強磁性体における隠れた多極子秩序が時間反転性を巨視的に破ることがその背景にあり、また巨大な応答にはこの系のワイル点がフェルミ面近傍に位置することが重要となる。これにより反強磁性体を用いたスピントロニクスが今後大きく展開する可能性を秘めていることが紹介された。

講演④「ワイル物質 Mn_3X ($X = Sn, Ge$) のスピントロニクス」

東京大学工学系研究科・理化学研究所創発物性科学研究センター 有田亮太郎先生

有田氏は、直前の講演内容の実験結果を受けてその理論背景について詳細な解説を行った。まず磁気構造を多極子展開することで導入される「クラスター多極子」の概念を説明し、それに基づく系統的な議論を第一原理計算の結果と共に示すことで、なぜ反強磁性において強磁性と同等の電気磁気応答が観測されるかについて解説された。さらに、クラスター多極子に基づく反強磁性 Mn_3Sn の磁壁ダイナミクスのシミュレーション結果も紹介された。

第3回： 2019年3月22日(金) 14:00~17:45 + 意見交換会

会場：御茶ノ水 ATI 会議室

参加者：11名(会員8名、外部講演者2名、鈴木研究室1名)

テーマ：「MRAM 技術の新展開」

各講演は発表45分、議論10分

意見交換会会場：淡路町カフェ CAPPUCETTO ROSSO (カプチエット・ロソ)

強磁性トンネル接合(MTJ)を記録ビット素子として用いるスピン移行トルク型(STT)磁気ランダム アクセスメモリ(MRAM)は長年スピントロニクス重要なターゲットであった。現在は、その開発はLSI 混載メモリとして実用段階に入っている。今後MRAMが半導体メモリと同様に広く利用されるためには、大幅な大容量化・高速化・低消費電力動作化が強く求められる。これらの高性能化にカギを握るMTJ技術の新展開を、開発の中核で活躍する3名の講演者に語って頂いた。

講演①「不揮発性メモリ MRAM の新展開」

産業技術総合研究所 スピントロニクス研究センター 湯浅新治先生

湯浅氏は、不揮発性メモリMRAMの記憶素子である磁気トンネル接合(MTJ)素子の物理と材料について解説され、その最先端開発状況を紹介された。はじめに、MRAM開発の歴史と現在の開発目標と国際的な情勢を提示し、その中で日本のMTJ開発プロジェクトを牽引してきた立場から、新材料・新プロセス開発の取り組みや省電力が期待できる電圧駆動型のMRAMについて解説を行った。

講演②「電圧制御スピントロニクス不揮発メモリ『VoCSM』の可能性」

株式会社東芝 研究開発センター 大沢裕一先生

大沢氏は、冒頭に現在が「メモリカンブリア時代」であることに触れ、VoCSMと呼ばれるMRAMの新コンセプト提案とその実証について紹介された。今後需要が見込まれる深層学習向けのメモリ素子ではさらなる省電力化と無限回の書き換え耐性が必要とされる。VoCSMは、情報の書き込みにスピンホール効果と磁気異方性の電界制御を用いており、先行方式のスピントランスファートルク方式(STT-MRAM)に比べ書き込み電流の低減と書き換え耐性の向上が実証されている。



講演③「MRAM 応用に向けた強磁性トンネル素子用新材料の開発」

物質・材料研究機構 介川裕章先生

介川氏は、MRAM の記憶ビット素子を構成する強磁性トンネル接合 (MTJ) の高性能化を目指した研究成果を紹介された。現在標準となっている MTJ は、バリア層の MgO と強磁性層の CoFeB の組み合わせであるが、MgO 層のプロセスの特殊性から他の高スピン偏極強磁性材料などとの組み合わせを探索する事が困難であった。この状況に対して、新しいバリア層材料として幅広い磁性体と整合性をもたすことが可能なスピネル型の MgAl_2O_4 が有用である事が実験的に示され、材料開発が加速的に進んでいる状況の紹介が行われた。

3. 2019 年度活動の構想

スピン変換は、角運動量保存則に基づく、電気、光、音、振動、熱の相互変換現象の総称であり、スピントロニクス研究の根幹を担うものである。この中には、スピントロニクス効果、逆スピンホール効果、スピンゼーベック効果、スピンペルチェ効果、純スピン流誘起磁化反転、絶縁体へのスピン注入、スピン起電力、強磁性超薄膜の磁気異方性電圧制御など、最近発見された関連現象が数多く含まれる。これらのスピン変換現象の多くは、磁性体、非磁性体、半導体、絶縁体等の異種物質の比較的単純な接合界面近傍のナノスケールの領域で発現する。このため、スピン変換現象は優れた汎用性・応用性を持っており、様々な物質の接合種を選択できることから自由度の大きな機能設計が可能である。

スピン変換現象に関わる遍歴スピン、マグノン、フォノン、フォトンなど多様な粒子・準粒子間の相互変換を統一的に理解し、その背後に潜む物理現象の普遍性を解明することで、高度に完成された理論体系を構築する気運が高まっている。本研究会を、スピントロニクス研究の発展に向けた次の一手を見出すための契機としたい。

研究会開催記録

【第1回】2018年5月7日(月) 御茶ノ水

テーマ：「人工知能デバイス応用へ向けたスピントロニクス」

1. 「トンネル磁気抵抗素子を用いたリザーバー計算と磁気スキルミオンによるブラウニアン計算」
大阪大学 大学院基礎工学研究科 鈴木 義茂
 2. 「アナログスピントロニクス素子を用いた脳型情報処理」
東北大学 電気通信研究所 深見 俊輔
 3. 「スピントルク発振素子を用いたリザーバー計算」
産業技術総合研究所 スピントロニクス研究センター 常木 澄人*
- 参加者 14名 (会員 11名、外部 3名)

【第2回】2018年10月2日(月) 御茶ノ水

テーマ：「ワイル物質のスピントロニクス」

1. 「イリジウム酸化物における強相関ディラック・ワイル電子の磁気輸送現象」
筑波大学 数理物質科学研究科物性・分子工学専攻 藤岡 淳*
 2. 「立方対称なワイル磁性体の有効模型とホール効果・磁気抵抗」
東京大学大学院 工学系研究科 物理工学専攻 石塚 大晃*
 3. 「ワイル磁性体を用いたトポロジカルスピントロニクス」
東京大学 物性研究所 中辻 知*
 4. 「ワイル物質 $Mn_3X(X=Sn, Ge)$ のスピントロニクス」
東京大学工学系研究科・理化学研究所創発物性科学研究センター
有田 亮太郎*
- 参加者 24名 (会員 13名、外部 11名)

【第3回】2019年3月22日(金) 御茶ノ水

テーマ：「MRAM技術の新展開」

1. 「不揮発性メモリ MRAM の新展開」
産業技術総合研究所 スピントロニクス研究センター 湯浅 新治*
 2. 「電圧制御スピントロニクス不揮発メモリ『VoCSM』の可能性」
株式会社東芝 研究開発センター 大沢 裕一*
 3. 「MRAM応用に向けた強磁性トンネル素子用新材料の開発」
物質・材料研究機構 介川 裕章
- 参加者 11名 (会員 9名、外部 2名)

※印は外部の講演者

スピントロニクス研究会員名簿

齊藤 英治	東京大学 大学院工学系研究科	教授 研究会委員長
大谷 義近	東京大学 物性研究所	教授
前川 禎通	理化学研究所 創発物性科学研究センター	特別顧問
新庄 輝也	京都大学	名誉教授
小野 輝男	京都大学 化学研究所	教授
永長 直人	理化学研究所 創発物性科学研究センター	副センター長
白石 誠司	京都大学 大学院工学研究科	教授
水上 成美	東北大学 材料科学高等研究所	教授
多々良 源	理化学研究所 創発物性科学研究センター	チームリーダー
大岩 顕	大阪大学 産業科学研究所	教授
村上 修一	東京工業大学 理学院	教授
新見 康洋	大阪大学 大学院理学研究科	准教授
鈴木 義茂	大阪大学 大学院基礎工学研究科	教授
家田 淳一	日本原子力研究開発機構 先端基礎研究センター	研究主幹
関 真一郎	東京大学 大学院工学系研究科	准教授
介川 裕章	物質・材料研究機構 磁性・スピントロニクス材料研究拠点	主幹研究員
深見 俊輔	東北大学 電気通信研究所	准教授

2019年3月現在

中性子回折による高感度水素検出が切り開く構造生物学

委員長 日下 勝弘

茨城大学フロンティア応用原子科学研究センター 教授

1. 研究構想と概要

サブナノメートルレベルで生体内機能を制御するタンパク質等の周りには、非常に多様な形で水が存在する。あるものは安定に水和し、あるもの運動し、そしてあるものはイオンの形で存在する。タンパク質や核酸 DNA のように特定の大きな構造を持つ生体高分子と比べて、地球上ではありふれた小さな分子である水が、生体高分子とどのように相互作用をして生命活動を成立させているかは、未知な部分が多い。たとえば、タンパク質や DNA が機能する直前の分子認識における水の役割、化学反応中の状態における水の関与したプロトンや水分子自体の授受および水素結合の形成・解消、そして、反応後の水の脱離やタンパク質・DNA分子への再水和・再配置、さらには膜タンパク質のプロトンポンプ機構におけるプロトン等の授受における水の役割のように、生体機能の中において、ナノスケール絶えず揺らぎながら重要な役割を、黒子のように、果たしている。最近では、膜タンパク質などの複雑な系での水の振る舞いなどが注目されており、水素原子位置情報はますます重要視されている。

中性子回折は水素位置決定を得意とする手法であり、このような水和ナノ構造の解明は非常に重要な役割を果たすことができることが知られている。日本においては、大強度陽子加速器施設 J-PARC に中性子源施設である MLF が建設され、生体高分子の中性子構造解析をはじめとした中性子を利用した生命科学研究の利用が活発に進められている。現在、生体高分子の中性子構造解析は、米国の中性子源施設 SNS においても、専用のビームラインが稼働している。さらにはヨーロッパにおいても日本、米国に続く次世代中性子源 ESS の建設が開始しており、生体高分子用のビームラインが高い優先順位で建設が予定されている。これらのことから、生体高分子の中性子構造解析は、その重要性が世界的に認識されていることが伺える。

日本の中性子源施設 J-PARC、MLF においては、茨城県生命物質構造解析装置 iBIX が生体高分子の構造解析が可能な装置として開発され、ユーザーによる実験が進んでおり、既にプロトン互変異性の観測等の中性子の特徴を生かした成果が創出されている。今後2年以内には1MWの最高出力を迎え(2018年度:500kW)、病因タンパク質や各種酵素とその基質との複合体や膜タンパク質も含めた水和構造に関して、プロトネーションも含めた機能に直結した水や水素位置構造の解明を目指して、さらなる成果

創出を創出し、学术界・産業界にその有用性を浸透させることを目指している。さらには、生命学のさまざまな場面で用いられる X 線や NMR、赤外線、計算科学等との相補的な利用により生命科学分野において重要な知見をもたらすことが期待されている。

本研究会では VII 期から基本的なコンセプトを引き継ぎ、iBIX により科学的意義、波及効果、革新性のある中性子の長所を生かした研究を展開し、中性子による水和ナノ構造研究の有用性を示していくことを目的とし、利用研究、ソフト・ハードの改良、大型結晶育成などのさまざまな実験分野研究者と計算科学研究者に生体高分子中の水やプロトンについて議論を深めてもらい、関連する分野の相互の発展を目指す。委員は VII 期からのメンバーに継続をお願いするとともに、iBIX のコアユーザ 1 名を新たな委員として迎えている。

2. 2018 年度の研究活動の概要

2018 年度は 2 回の水和ナノ構造研究会を開催した。またこれに加えて、生体高分子用中性子回折計 iBIX の運営母体である茨城県が中心となっている中性子産業利用推進協議会が主催する生物構造学研究会および茨城県中性子利用促進研究会が主催する iBIX 研究会との共催それぞれ 2 回、4 回を含め、計 8 回の研究会を実施した。

2.1 第 1 回水和ナノ構造研究会

(2018 年 10 月 18 日 (木) ~19 日 (金)、静岡県熱海市 KKR ホテル熱海)

第一回水和ナノ研究会は静岡県熱海温泉の KKR ホテル熱海にて行われた。外部講師 4 名をお迎えし「タンパク質プロトン化状態の機能制御と測定法およびソフトウェアの高度化に向けて」というテーマで開催した。

1 人目の外部講師は、名古屋大学理学研究科の神山勉先生をお迎えし、「イオン輸送性ロドプシンの反応中間体の構造解析」というタイトルでご講演頂いた。高度好塩菌の細胞膜からは 2 種類のイオン輸送性ロドプシンが見いだされている。最近の研究によれば、海洋性微生物など多くの生物種もイオン輸送性ロドプシンを有し、これらのロドプシン群タンパク質が地球上に降り注ぐ太陽光エネルギーの相当部分を吸収していると見積もられている。5 種類の光駆動プロトンポンプと 1 種類の塩素イオンポンプの X 線結晶構造解析の結果についてお話しいただいた。特にバクテリオロドプシンおよびハロロドプシンについては反応中間体の構造が詳しく調べられ、現時点までにイオン輸送サイクルについて、1) タンパク質部分では 3 種類の構造変化が起こる。2) 発色団レチナールも 3 種類の異性化状態を経る。3) レチナールの異性化→タンパク質の構造変化→イオン移動→レチナールの異性化…という具合に反応が進行することでイオンの一方向の輸送が保証される等のイオン輸送機構における知見が得られており、プロトン移動という中性子における研究への発展も考えられる非常に興味深い結果であった。

2 人目の外部講師は北海道大学大学院 先端生命科学研究院 の姚関 先生をお招きし、「アンモニア輸送機構を理解するための GatCAB 中性子構造解析の現状」というタイトルで発表いただいた。細胞内での代謝過程において発生するアンモニアは様々な細胞毒性を引き起こすため、タンパク質は触媒反応に必要とするアンモニアが分子内で生産され、分子外へ排出しないという自給自足の仕組みを持っている。tRNA 依存アミド基転移酵素 GatCAB 複合体がその様なタンパク質である。本公演ではこの GatCAB のアンモニア輸送機構解明についてお話しいただいた。GatCAB 複合体の構造・機能相関の解析によって GatB のアミド基転移反応に使われているアンモニアが 30 Å ぐらい離れている GatA の脱アミノ化の反応部位で生産されていることを明らかにし、そのアンモニアが分子内チャンネルを経由して送られていることが提案されが、その輸送の仕組みが不明である。そこで、中性子線構造解析法を利用して、GatCAB の分子内チャンネルに、存在するのが水素かアンモニアかを見分けることが試みられた。結晶化においてもアガロースゲルを用いた結晶化等いろいろな結晶化に取り組みれていた。また、中性子回折実験における初心者としての疑問等を多く投げかけていただき、中性子回折装置グループとしては、有意義な情報交換を行うことができた。今後の中性子解析の結果に期待されるお話であった。

3 人目の外部講師として、大阪大学大学院基礎工学研究科の香川晃徳先生に講演をお願いした。「トリプレット DNP による超高感度 NMR/MRI」というタイトルで発表頂いた。スピンの信号をとらえる核磁気共鳴(NMR)や磁気共鳴イメージング(MRI)は、化学分析や医療など様々な分野で利用されている。それらの核スピン信号強度は、核スピン偏極に比例して大きくなる。近年、低い核スピン偏極を、電子スピンを利用して増大させる動的核偏極(DNP)が注目されているが、熱平衡下で電子スピン偏極を大きくするためには、高磁場 (>3T)、極低温で DNP 実験が行われるのが一般的である。しかしながら、光励起によって生成された三重項状態の電子スピンを用いた DNP(トリプレット DNP)は低磁場(0.4T)、室温で、非常に大きな電子スピンを得ることができる。このトリプレット DNP を NMR や MRI へ汎用的に応用するための研究についてご紹介いただいた。iBIX グループ DNP を応用し、タンパク質内の水素を偏極することで水素の散乱長を増大させ、水素由来のバックグラウンドを低減させることにより水素原子の感度を上げるという手法に着目してきたが、タンパク質単結晶を極低温かつ高磁場下に置くことは非常にハードルの高いものであると認識していた。しかしながらトリプレット DNP 法は生体高分子にやさしい条件で核偏極の増大ができる。まだまだ萌芽的な技術でありタンパク質単結晶への応用は乗り越えるべき壁は多々あると思われるが、タンパク質の核偏極法を検討する我々にとっては非常に興味深く、新たな可能性を感じる講演であった。

4 人目の外部講師は理研科学研究センターの宮下治先生をお招きし、「構造解析へのハイブリッドアプローチ:電子顕微鏡と X 線自由電子レーザーからの実験データの活

用」というタイトルで発表いただいた。タンパク質の構造得るために使われている最も幅広く使われているのはX線構造解析である。しかし、重要な生理機能をつかさどる生体分子複合体の多くはその大きさゆえ結晶化が難しく、構造情報取得のためにのために cryo-electron microscopy (EM) single particle analysis (SPA) が活用されつつある。EM法はサンプルの結晶化が必要なく、中間構造をとらえることが容易であるが、原子構造を1から構築するのは難しい。生体高分子の構造と機能を議論する上では原子レベルの情報が必要になるため、シミュレーションを活用して低解像度の実験データが捉えている構造状態に対応する新たな原子モデルを作る方法についての研究についてお話をいただいた。中性子回折法とは異なるアプローチによる構造モデル取得の方法として非常に興味ある内容であった。今後は、中性子回折法との相補的利用や、計算手法の相互利用等の発展に期待したいものであった。

すべてのご講演で研究会員を交えて非常に活発な議論が交わされ有意義な研究会となった。



第1回研究会の様子

2.2 第2回水和ナノ構造研究会

(2019年1月29日(火)、東京都千代田区TKPガーデンシティ)

第2回の水和ナノ構造研究会は「ナノ環境下における水素と水溶液中のナノ粒子挙動」というテーマで東京都千代田区のTKPガーデンシティ御茶ノ水カンファレンスルーム2Dにて開催した。3名の外部講師をお招きした。

1人目の外部講師は、岡山大学惑星物質研究所の奥地拓生先生で、「パルス中性子を使った地球深部水素の単結晶構造解析とダイナミクス解析」というタイトルでご講演いただいた。地球深部には含水鉱物として非常に多くの水が存在しており、プレートにのって移動する含水鉱物が、地球深部の高温高压の条件で結晶構造変化や脱水分解を起こすと、その結果として地震が起こり、放出された水が融剤となって火山の起源となるマグマを発生させる。これらの地球深部の含水鉱物の結晶構造とダイナミクスの相関を、高強度パルス中性子線を用いた単結晶回折と準弾性散乱法の統合によって、系統的に解析しつつあり、独自に開発してきた、高品質の高密度鉱物の超高压合成法と中性子線と

の組み合わせにより、地球深部鉱物としては初めての単結晶中性子構造解析に成功している。その後、中性子準弾性散乱による水素イオンダイナミクス観測にも成功している。構造生物学とは全く異なる分野であるが、中性子を使った水の観測ということで非常に面白いご講演をいただくことができ、中性子の幅広い活躍を期待できるものであった。

2人目の外部講師は名古屋大学大学院理学研究科物質理学専攻 野口巧先生で、「光化学系IIにおける電子・プロトン移動反応の赤外分光解析」というタイトルで発表いただいた。光合成における光エネルギー変換は、光エネルギーによって駆動される電子移動と、それに共役するプロトン移動によって行われる。特に、光合成電子伝達鎖の酸化側末端に位置する光化学系IIタンパク質は、水分解・酸素発生およびキノン分子の還元によるキノール生成の機能を持ち、プロトン移動反応や水分子・アミノ酸側鎖のプロトン化構造が反応機構の鍵をにぎる。赤外分光法、特に光誘起フーリエ変換赤外 (FTIR) 差分光法や時間分解赤外 (TRIR) 法を用いた、光化学系IIの電子・プロトン移動反応およびその制御の分子機構の解明についてご講演をいただいた。赤外分光法による電子プロトン移動の調べ方に始まり、気質水分子の取り込みやプロトン放出の過程、やその経路について詳細なお話をいただいた。プロトン移動を見るということで、中性子と相補的な役割を担うことができる手法であることがわかり、今後互いの研究が結びつくことが期待されるお話であった。

3人目の外部講師は京都大学 複合原子力科学研究所 杉山正明先生で、「溶液散乱法を用いた生体高分子の構造・ダイナミクスの研究」というタイトルで発表いただいた。統合構造生物学における中性子を用いた溶液散乱の独自性を示すために2つの溶液散乱法、中性子小角散乱法と中性子スピンエコー法を用いた最近の研究成果をご紹介いただいた。中性子を溶液散乱のプロブとして用いる利点は、軽水素-重水素置換によるコントラストが調整可能という点と低いエネルギーとスピンを利用したスローダイナミクスが観測可能という点である。そこで、前者に関しては、低バックグラウンドでの標的蛋白質の観測を可能にした逆転コントラスト変調-中性子小角散乱法を用いたクラウド系での蛋白質キネティクスの研究と更に解離会合系に応用するために Size-Exclusion Chromatographyを組み合わせた SEC-iCM-SANS法による複合蛋白質の構造研究をご紹介いただいた。また、スローダイナミクスの研究としては、中性子スピンエコー法と Molecular Dynamics (MD) 計算を組み合わせた解析による蛋白質内部の機能発現に繋がる共同的なドメイン運動の研究を紹介いただいた。種々の手法を協奏的に用いることで生体高分子の織りなすシステム全体を理解しようする「統合構造生物学」において中性子が重要な役割を果たし得ることがわかる非常に興味深い講演であった。

4人目の外部講師は東京大学大学院工学系研究科応用化学専攻の馬渡和真先生で、「ナノ流体工学と溶液物性」というタイトルで発表いただいた。講演者はガラスのナノ加工技術に加え、aL-fLでの流体制御、超高感度検出技術などの基盤技術を創成して、ナノ流体工学を開拓してきた。そして、ナノ流路が単一分子を取り扱うのに適した空間であ

ることを見出し、壁面での捕捉などを利用することで、単一分子レベルの分子プロセシングが可能であることを示してきた。実際に、単一分子 ELISA(enzyme-linked immunosorbent assay)を 実現して、医学・バイオで必要とされている単一細胞単一分子分析システムに展開している。一方、基礎化学の観点からは、ナノ空間は孤立分子と通常の凝縮相をつなぐ過渡的空間であり、バルクとは異なる溶液物性が期待される。構築した基盤技術により、ナノ空間での溶液物性測定を実現して、粘度上昇、プロトン移動度上昇、誘電率低下など、多くのユニークな溶液物性が示され、表面特性や溶媒依存性などを検討した結果、水がガラス表面のシラノール基から50nm程度緩やかに構造化したプロトン移動相モデルが構築された。また、モデルの検証のため、ナノ空間での溶液 X線構造回折を実現して、現在いくつかモデルを支持する結果も得られている。

2.4 共催による研究会

その他、共催で開催された 6 研究会の概要を以下に示す。

2.4.1 平成 30 年度茨城県 iBIX 研究会：

第 1 回 iBIX 研究会 平成 30 年 7 月 20 日(金)

野尻 正樹 (大阪大学 大学院理学研究科)

酵素が使う量子力学的な仕組み-金属酵素における電子とプロトンの協奏-

第 2 回 iBIX 研究会 平成 30 年 12 月 6 日(木)

伏信 進矢 (東京大学大学院農学生命科学研究科)

高効率キシロオリゴ糖合成酵素に転換可能な酵素 Rex の構造機能相関

第 3 回 iBIX 研究会 平成 31 年 3 月 7 日(木)

岩下 芳久 (京都大学化学研究所)

強度変調型永久六極磁石中性子集束器による中性子ビームの有効利用

2.4.2 平成 30 年度 iBIX-JAXA-KEK 物構研-QST 量子研合同タンパク質研究会

「茨城県生命物質解析装置 iBIX の特長を生かした研究の紹介」 日下勝弘 (茨城大学)

「iBIX を利用したヒト α -トロンビン活性部位の水素結合様式の解明」

山田 太郎 (茨城大学)

「JAXA における高品質タンパク質結晶生成に向けた取り組み」

吉崎 泉、山田 貢 (JAXA きぼう利用センター)

「表面ループの構造的可塑性は酵素機能とどう関わるかを見る」

日辛 隆雄 (福井県立大学生物資源学部)

「イエロープロテインの構造と光反応-巨大結晶化、中性子結晶構造解析、時間分解結晶構造解析」

片岡 幹雄 (CROSS)

「KEK・物構研・構造生物学研究センター紹介」 千田 俊哉 (KEK 物構研 SBRC)

「高エネ機構における膜タンパク質の構造解析に向けた取り組み」

田辺 幹雄 (KEK 物構研 SBRC)

「立体構造解析により実現した細胞の GTP エネルギー検知機構の発見」

竹内 恒 (産業技術総合研究所)

「量子科学技術研究開発機構における研究紹介」玉田 太郎 (QST 高崎量子応用研究所)

「ヒト酸化ヌクレオチド加水分解酵素の構造学的研究～水素原子レベルでの酵素反応機構の解明を目指して～」

中村 照也 (熊本大学大学院先導機構)

2.4.3 中性子産業利用推進協議会 構造生物学研究会:

平成 30 年度第 1 回生物構造学研究会

『新世代中性子構造生物学の目指すもの』

(平成 30 年 9 月 21 日(金)、エッサム神田ホール 2 号館 501 会議室)

「iBIX の現状と将来計画」

日下勝弘 (茨城大学)

「ゲノムの安定性に関わる酵素の機能解明と中性子構造解析の展望」

山縣ゆり子 (熊本大学)

「中性子回折によるアミド基転移酵素 GatCAB のアンモニア輸送機構解明」

姚 関 (北海道大学)

「味覚受容体による味物質応答の相関構造解析」

山下敦子 (岡山大学)

「生命機能に迫る相関構造解析」

山本雅貴 (理研)

「蛋白質の X 線結晶構造解析によるフラグメントスクリーニング」

宮口郁子 (田辺三菱製薬)

「X 線結晶構造解析による水素分解酵素 [NiFe] ヒドロゲナーゼの酸素耐性機構の解明」

庄村康人 (茨城大学)

平成 30 年度第 2 回生物構造学研究会

(平成 31 年 3 月 27 日(水)、エッサム神田ホール 1 号館 401 会議室)

『新世代中性子構造生物学が目指すもの II - J-PARC MLF が目指す生命科学研究との整合性 -』

「中性子結晶構造解析で見えるタンパク質の水素」

今野美智子 (茨城県)

「J-PARC MLF における生命科学研究」

金谷利治 (J-PARC)

「新世代中性子構造生物学が目指すサイエンス」

杉山正明 (京都大学)

「リード化合物創成を目指した創薬標的蛋白質の構造機能相関解析」

藤間祥子 (奈良先端科技大)

「良質なタンパク質結晶を得るための戦略」

千田美紀 (KEK)

「効率的立体構造探索法による生体分子シミュレーション」 岡本祐幸 (名古屋大学)

「巨大膜タンパク質複合体の高分解能構造解析から探る光合成の仕組み」

沈 建仁 (岡山大学)

研究会開催記録

【第1回】2018年10月18日(木)–19日(金) 静岡県熱海市

テーマ：「タンパク質プロトン化状態の機能制御と測定法および
ソフトウェアの高度化に向けて」

10月18日(木)

1. 「イオン輸送性ロドプシンの反応中間体の構造解析」
名古屋大学理学研究科 神山 勉[※]
2. 「アンモニア輸送機構を理解するための GatCAB 中性子構造解析の現状」
北海道大学大学院 先端生命科学研究院 姚 閔[※]

10月19日(金)

3. 「トリプレット DNP による超高感度 NMR/MRI」
大阪大学大学院 基礎工学研究科 香川 晃徳[※]
4. 「構造解析へのハイブリッドアプローチ：
電子顕微鏡と X 線自由電子レーザーからの実験データの活用」
理化学研究所・計算科学研究センター 宮下 治[※]

参加者 14 名 (会員 9 名、外部 5 名)

【第2回】2019年1月29日(火) 御茶ノ水

テーマ：「ナノ環境下における水素と水溶液中のナノ粒子挙動」

1. 「パルス中性子を使った地球深部水素の単結晶構造解析と
ダイナミクス解析」
岡山大学 惑星物質研究所 奥地 拓生[※]
2. 「光化学系 II における電子・プロトン移動反応の赤外分光解析」
名古屋大学 大学院理学研究科 物質理学専攻 野口 巧[※]
3. 「溶液散乱法を用いた生体高分子の構造・ダイナミクスの研究」
京都大学 複合原子力科学研究所 杉山 正明[※]
4. 「ナノ流体工学と溶液物性」
東京大学 大学院工学系研究科 応用化学専攻 馬渡 和真[※]

参加者 17 名 (会員 12 名、外部 5 名)

※印は外部の講演者

水和ナノ構造研究会員名簿

日下 勝弘	茨城大学 フロンティア応用原子科学研究センター	教授 研究会委員長
田中 伊知朗	茨城大学 大学院理工学研究科	教授
新村 信雄	茨城大学	特命研究員
五十嵐 圭日子	東京大学 大学院農学生命科学研究科	准教授
茶竹 俊行	京都大学 複合原子力科学研究所	准教授
秋山 良	九州大学 大学院理学研究院	准教授
今野 美智子	お茶の水女子大学	名誉教授
矢野 直峰	茨城大学 フロンティア応用原子科学研究センター	産学官連携助教
横山 武司	富山大学 大学院医学薬学研究部	助教
重田 育照	筑波大学 計算科学研究センター	教授
高野 和文	京都府立大学 大学院生命環境科学研究科	教授
石北 央	東京大学 先端科学技術研究センター	教授
海野 昌喜	茨城大学 大学院理工学研究科	教授
富田 賢一	(株)ヴィジブルインフォメーションセンター	主任研究員

2019年3月現在

環境制御微生物と酵素の創生

委員長 西野 吉則
北海道大学 教授

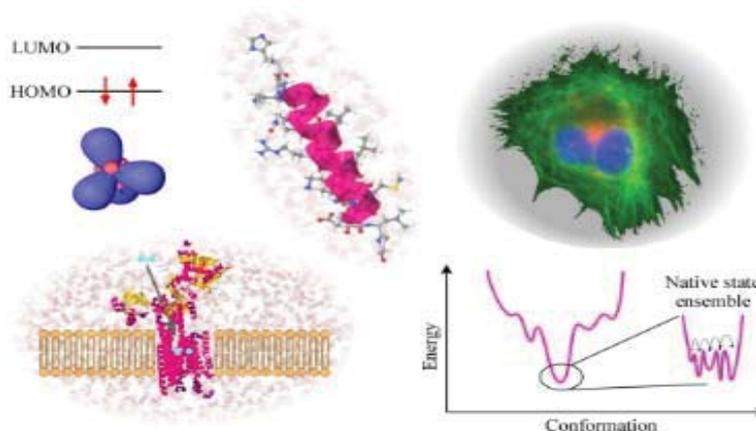
1. 研究構想

バイオ単分子研究会は、ATI 研究会第 6 期の 2009 年度に発足した研究会である。第 6 期（2009～2011 年度）および第 7 期（2012～2014 年度）では、佐々木裕次教授（東京大学大学院新領域創成科学研究科）が委員長を務めた。第 8 期（2015～2017 年度）および第 9 期（2018～2020 年度）は、西野が委員長を務めている。第 9 期では、第 8 期を踏襲し、以下の構想のもとバイオ単分子研究会を運営する。

生命現象を動的な分子レベルから理解することは、生物学の究極の目標の一つである。これは量子力学的な「デジタル」世界と古典統計力学的な「アナログ」世界とを結び付けるという、自然科学の壮大な問いにも通じる。特定の立体構造をもったタンパク質分子やその複合体は、あるものは精密な「デジタル」な分子機械として振る舞う一方で、あるものは熱的なゆらぎを受けて「アナログ」な動的機能を発現する。DNA を介して「デジタル」な遺伝情報は次世代に正確に受け継がれるが、エピジェネティックな制御により「アナログ」で多様な表現型に道が開かれる。さらに、生物は雄大な時間スケールで大進化を起こす。このように、生物は、確実な動作や情報伝達を行うデジタルな世界と、多様性と個性をもったアナログな世界を巧みに使い分けて自らを制御している。

多数の分子のアンサンブル(集団)平均や時間平均ではなく、生物試料を、生きた細胞の中や生きているに近い環境で、分子レベルで理解するには、多岐に亘る革新的な技術開発が求められる。

本研究会では、様々なプローブを用いた単分子レベルでの計測技術や、細胞の動的制御技術、さらには情報科学や理論など、様々なアプローチから、生命現象の動的な分子レベルからの理解を目指す議論を交わすことを目的とする。



(図 1) ATI 研究会第 9 期バイオ単分子研究会の構想図

2. 2018 年度活動の概要

ATI 研究会は、2018 年度より第 9 期が開始された。バイオ単分子研究会では、若干の会員の変更を行い、新たに渡邊力也先生（東京大学大学院・工学系研究科）に委員に加わって頂いた。また、渡邊委員には、バイオ単分子研究会の幹事をお引き受け頂き、研究会運営のサポートをして頂くこととなった。渡邊委員は、マイクロチップを利用した膜タンパク質の単分子計測に関して活発に研究を行っており、2017 年度第 1 回バイオ単分子研究会でもご講演頂いた。また、2018 年 10 月に所属を理化学研究所に移し、現在は主任研究員として自らの研究室を主宰している。

第 8 期最後の 2017 年度第 2 回バイオ単分子研究会において、第 9 期のバイオ単分子研究会で扱いたいテーマとして、「情報生命科学」、「クライオ電子顕微鏡」、「環境」を選定した。2018 年度は、このうち「環境」に焦点を当てた研究会を 2 回開催した。

第 8 期 3 年間のバイオ単分子研究会を通じて、初めて顔を合わせた研究者が議論を交わし、研究会での議論がきっかけとなり多くの共同研究が始まり、科研費や CREST の採択へと繋がった。また、バイオ単分子研究会が中心となり、科研費の新学術領域研究に申請する機運が委員の間で高まった。2018 年度のバイオ単分子研究会で焦点を当てた「環境」は、この科研費の新学術領域研究への申請を意識したものであり、研究会の中で申請に向けた議論も行った。

2.1 2018 年度第 1 回バイオ単分子研究会（2018 年 7 月 5 日）

2018 年度第 1 回バイオ単分子研究会は、養王田正文委員に座長をお願いして企画を進めた。研究会のテーマは、養王田委員の研究室のキャッチフレーズともなっている、「From single molecule to environment」とし、副題は「バイオ単分子から地球環境問題への挑戦」とした。研究会の講演者は、養王田委員と相談して人選を行い、養王田委員および大島泰郎委員に加え、田中剛先生（東京農工大学）に依頼した。また、前述の科研費の新学術領域研究への申請に向けて、ブレーンストーミングのディスカッションの時間を多く確保した。このディスカッションに参加して頂くため、東京農工大で関連する研究をされている、吉野知子先生、新垣篤史先生にも、研究会にご参加頂いた。多くの先生方が参加し易いよう、研究会は ATI で開催した。

1 人目の発表は、田中先生が「海洋珪藻を用いたバイオ燃料・有用物質の生産」という演題で行った。田中先生は、海洋から分離した約 800 種類におよぶ微細藻類、光合成細菌の独自のカルチャーコレクション NKCC (No-Ko Culture Collection) を構築し、様々な有用物質生産株のスクリーニングを行っている。なお、コレクションの名称の No-Ko は、所属の東京農工大にちなんだものと思われる。特に、海洋光合成微生物を用いたバイオ燃料生産に注目しており、バイオ燃料の原料となるトリグリセリド (TAG) を生産するソラリス株の海洋珪藻 (*Fistulifera solaris*) に関する研究を進められており、TAG の生産性を高めて、高品質なバイオディーゼル燃料を生産することを目指している。

実用化には、培養、藻体回収、オイル抽出に至るトータルプロセスの省エネ化・低コスト化が求められるとのことである。なお、年間 2 万トンのバイオ燃料生産が一つの目安とのこと、これが実現されると日本国内航空機のジェット燃料の 1%を賄うことができるとのことである。また、珪藻は最大の一次生産者として地球全体の CO₂ 固定の 20%を担っているとのことで、地球温暖化防止への寄与も期待されるとのことである。



(図 2) 2018 年度第 1 回バイオ単分子研究会での発表の様子 (於: ATI 会議室)

2 人目の発表は、大島委員が「極限環境生物の魅力」という演題で行った。微生物には、好冷菌、好熱菌、好塩菌、好酸菌、好アルカリ菌、好圧菌、耐放射性菌などがあり、あらゆる環境に住み着いている。大島委員は、高度好熱菌 *Thermus thermophilus* の発見者として、世界的に著名である。*T. thermophilus* は、遺伝子操作系が確立したモデル生物として生物学の実験で幅広く用いられている。2018 年は、ちょうど



(図 3) 温泉水を採取する大島委員 (峰温泉, 2018 年 9 月 29 日)

大島委員が伊豆の峰温泉で *T. thermophilus* を発見してから 50 年に当たることなどが紹介された。バイオ単分子研究会の活動からは離れるが、この発見 50 周年を記念した国際ワークショップが 2018 年 9 月 28-29 日に伊豆で開催され、西野も一部日程に参加した。峰温泉の見学もあり、大島委員がはしごを登り、*T. thermophilus* 発見当時から使っているひしゃくで、温泉水を採取するアトラクション(?)もあった。因みに、*T. thermophilus* 発見の日は、ちょうど西野が生まれた 1 週間後であることを大島委員から伺った。大島委員が、いかに長い期間にわたり研究をされているか、感慨深かった。

3 人目の発表は、養王田委員が「バイオ単分子から地球環境問題への挑戦 - From single molecule to environment -」という演題で行った。微生物と酵素は、長い進化の過程で地球環境を変えてきた。例として、酸素生産、炭素固定、窒素固定、メタン生産、セルロース分解などが紹介された。また、現在の地球環境も、微生物と酵素で維持されている。しかしながら、この微生物や酵素が、人間環境に最適化されているかは疑問が残るとのことである。微生物がセルロースを分解できるようになったように、プラスチックも微生物や酵素によって分解できるようになる可能性があるが、これには一般的なスクリーニングや進化工学を超えた技術開発が必要との認識が示された。さらに、生物を用いた環境問題への取り組みとして、バイオマス燃料、バイオファイナリー、バ

イオレメディエーション，廃棄物処理，土壌地下水汚染浄化などの例が紹介された。

続くブレインストーミングでは，科研費の新学術領域研究への申請に向けた活発な議論を行った。また，今後のバイオ単分子研究会の進め方についても議論した。活発な議論は，意見交換会でも引き続き行われた。

2.2 2018年度第2回バイオ単分子研究会（2018年12月13-14日）

2018年度第2回バイオ単分子研究会は，第1回研究会および科研費の新学術領域研究への申請を受けて，科研費の申請に加わって頂いたバイオ単分子研究会内外の先生方に各計画班からの発表をお願いして，申請の内容をバイオ単分子研究会委員の方々に伝え議論して頂く場とした。参加できなかった計画班の先生方には，あらかじめ発表資料をご準備頂き，西野が代理で発表した。

また，研究会の2日目は，申請に関連する施設として養王田委員からお勧めのあった，横浜市北部汚泥資源化センターと同第二水再選センターを見学した。また，1日目の研究会は，2日目の見学場所への移動を考慮して，湘南国際村 レクトーレ葉山で行った。

上記の内容のため，通常よりも多くの委員外の先生方に研究会にご参加頂いた。委員外からは，ご発表頂いた，尾高雅文先生（秋田大学），田中剛先生（東京農工大学），大河内美奈先生（東京工業大学），中村彰彦先生（岡崎統合バイオサイエンスセンター）に加え，ご発表はなかったが新垣篤史先生（東京農工大学），森屋利幸先生（共和化工株式会社）が参加された。

2.2.1 環境制御微生物と酵素の創生に関する研究会

まず，科研費新学術領域研究申請の研究代表者の養王田委員より，概要説明があった。微生物や酵素を用いた環境問題へのアプローチを，先端的1分子/1細胞解析技術によって最適化することを目指す計画が語られた。また，研究体制は，環境問題解決の素材について研究を進める原石（Gemstone）班と，それらを磨いて人類に貢献するものに発展させる工房（Workshop）班の2つに大別されることが示された。原石班の取り纏めは養王田委員が努め，工房班の取り纏めは西野が務める構成である。原石班の概要も養王田委員から示された。

続いて，原石班の5つの計画班からの発表があった。まず，養王田委員より，「有機塩素化合物嫌氣的脱塩素化微生物と酵素の創成」と題した発表があった。有機塩素化合物は，溶媒，農薬，電気絶縁体などとして広く使われていたが，難分解性で，人に対して毒性や発ガン性を示



（図4）2018年度第2回バイオ単分子研究会での発表の様子（於：湘南国際村レクトーレ葉山）

すことから、土壤汚染が問題となっていることが示された。汚染土壤の浄化に向けて、有機塩素化合物を分解する嫌氣的脱塩素微生物と酵素を創生し、利用する計画が示された。

原石班 2 人目は、尾高先生が「シアン化合物分解酵素と微生物の創出」と題して発表した。シアン化合物は、金属のメッキや表面加工等の廃液に多く含まれ、高い毒性を示し、生分解も化学分解も受けにくいいため、土壤汚染が問題となっていることが示された。この問題に、シアン化合物分解酵素を創生して取り組む計画が示された。

原石班 3 人目は、田中先生が「オルガネラ工学による有用物質生産微生物の創製」と題して発表した。第 1 回研究会での発表内容から更に踏み込んだ提案がされた。

原石班 4 人目は、中村先生が「難分解性環境汚染ポリマーを探索・分解・資化する改変細菌の創出」と題して発表した。細菌が天然由来の難分解性ポリマーを検出・分解・資化する仕組みを理解することで、酢酸セルロースや PET などの難分解性環境汚染ポリマーを分解する非天然酵素を創出する計画が示された。

原石班 5 人目は、大島委員が「資源循環を加速する新規微生物機能の開発」と題して発表した。PET などの合成樹脂やリグノセルロースなどの生体高分子といった難分解性化合物を、堆肥化や活性汚泥法によって分解する計画が示された。

続いて、西野が工房班の概要を発表した。工房班の 5 つの計画班のうち、2 名からの発表があった。まず、西野が「コヒーレント X 線による微生物の 1 細胞ナノイメージング」と題して発表した。蓄積リング光源や X 線自由電子レーザーを使って環境汚染物質に含まれる微量元素の細胞内での分布をイメージングすることによって、汚染物質の細胞内への取り込みや、細胞内での汚染物質の分解のメカニズムの解明に繋がる知見を得る計画が示された。

また、委員会を欠席した 3 つの計画班の内容を、西野が代理で短く発表した（「微生物内分子動態」(佐々木委員)、「クライオ電子顕微鏡法による 1 分子/1 細胞解析技術の開発」(宮澤委員)）、および「膜輸送タンパク質の構造・機能 1 分子計測による有害物質取り込み機構の解明」(平野委員)。

工房班の最後は、大河内先生が「ペプチドアレイ技術を利用したバイオアクティブ界面設計による環境微生物機能創発」と題して発表した。環境問題の解決につながる微生物や酵素の 1 分子/1 細胞解析技術の接点の場として、材料-細胞、材料-生体分子をつなぐバイオアクティブなペプチド界面を設計する計画が示された。

研究会の最後に、総合討論および、翌日の見学先に関する養王田委



(図 5) 2018 年度第 2 回バイオ単分子研究会での集合写真 (於: 湘南国際村 レクトーレ葉山)

員からの短いレクチャーがあった。ちなみに、研究会を行った湘南国際村 レクトーレ 葉山は、富士山を望む景色の良い場所だった。また、研究会の日は偶然、ふたご座流星 群が見られ、夜の意見交換会の後に皆で夜空を眺めた。

2.2.2 横浜市北部汚泥資源化センターおよび同第二水再生センターの見学

2018 年度の研究会活動のテーマに 関連した施設として、横浜市北部汚泥 資源化センターおよび同第二水再生セ ンターを見学した。横浜市内で発生する 生活排水（汚水）は、市内 11ヶ所の水 再生センターで、活性汚泥法により、 きれいな水に再生されて、川や海に放 流される。その過程で発生した汚泥は、 北部と南部の 2ヶ所の汚泥資源化セン ターに送られ、濃縮、消化、脱水、焼 却されて、臭気のない衛生的な灰にな り、改良土やセメント原料等に利用さ れている。このうち、消化の過程では、 汚泥中の有機物を、メタン生産菌群を 用いて分解する（嫌気消化）。北部汚泥 資源化センターには、たまご形の消化 タンクが 12 個並んでおり、通称エコた まご鶴見と呼ばれている。消化タンク で発生した消化ガス（メタン約 60%）は、 ガス発電や汚泥の焼却燃料として使わ れている。発電した電力は、水再生セン



（図 6）横浜市北部汚泥資源化センターの 見学の様子



（図 7）横浜市北部汚泥資源化センターの 消化タンク（通称エコたまご鶴見）

ターで下水を最初沈殿池にくみ上げる等に使われて、発電の際の廃熱は消化タンクの加 熱等に使われている。このように、処理で発生する消化ガスも灰も有効利用された、循 環型社会に貢献した最先端の施設で、海外からも見学者が多く訪れるとのことである。

3. 2019 年度活動の構想

2018 年度の研究会では、「環境」に焦点を当てた活動を行った。2019 年度以降の研究 会活動について、研究会の意見交換会で話し合った。2019 年度以降は、第 8 期同様に、 新たな研究の芽を育むべく、研究会ごとにホットなトピックスを選び研究会を開催して いきたいと考えている。2019 年度に扱うテーマの一つとして、新生ポリペプチド鎖を 考えている。

研究会開催記録

【第1回】2018年7月5日(木) 御茶ノ水

テーマ：「From single molecule to environment

バイオ単分子から地球環境問題への挑戦」

1. 「海洋珪藻を用いたバイオ燃料・有用物質の生産」
東京農工大学 大学院工学研究院 田中 剛*
 2. 「極限環境生物の魅力」
共和化工(株) 環境微生物学研究所 大島 泰郎
 3. 「バイオ単分子から地球環境問題への挑戦 - From single molecule to environment -」
東京農工大学 大学院工学研究院 養王田 正文
 4. ブレーンストーミング「新学術領域の申請内容の具体化に向けて」
- 参加者 12名 (会員9名、外部3名)

【第2回】2018年12月13日(木)－14日(金) 神奈川県三浦郡

テーマ：「環境制御微生物と酵素の創生」

1. 概要説明
新学術領域研究 領域代表者 東京農工大学 養王田 正文
2. 「有機塩素化合物嫌氣的脱塩素化微生物と酵素の創成」
東京農工大学 養王田 正文
3. 「シアン化合物分解酵素と微生物の創出」
秋田大学 尾高 雅文*
4. 「オルガネラ工学による有用物質生産微生物の創製」
東京農工大学 田中 剛*
5. 「難分解性環境汚染ポリマーを探索・分解・資化する改変細菌の創出」
自然科学研究機構 中村 彰*
6. 「資源循環を加速する新規微生物機能の開発」
共和化工(株) 大島 泰郎
7. 概要説明 2
北海道大学 西野 吉則
8. 「コヒーレントX線による微生物の1細胞ナノイメージング」
北海道大学 西野 吉則
9. 「その他の話題」
北海道大学 西野 吉則
10. 「ペプチドアレイ技術を利用したバイオアクティブ界面設計による
環境微生物機能創発」
東京工業大学 大河内 美奈*
11. 総合討論
12. 見学先 レクチャー (東京動向大学 養王田 正文)

12月14日(金) 見学

横浜市北部汚泥資源化センター及び同第二水再生センター (神奈川県横浜市)

参加者 15名 (会員9名、外部6名)

※印は外部の講演者

バイオ単分子研究会員名簿

西野 吉則	北海道大学 電子科学研究所	教授 研究会委員長
渡邊 力也	理化学研究所 渡邊分子生理学研究室	主任研究員
佐々木 裕次	東京大学 大学院新領域創成科学研究科	教授
大島 泰郎	共和化工(株) 環境微生物学研究所	顧問
飯野 亮太	自然科学研究機構 分子科学研究所	教授
宮澤 淳夫	兵庫県立大学 大学院生命理学研究科	教授
小松崎 民樹	北海道大学 電子科学研究所	教授
平野 美奈子	光産業創成大学院大学 光バイオ分野	講師
朽尾 豪人	京都大学 大学院理学研究科	教授
城地 保昌	高輝度光科学研究センター	チームリーダー
須藤 雄気	岡山大学 大学院医歯薬学総合研究科	教授
秋山 修志	自然科学研究機構 分子科学研究所	教授
古田 寿昭	東邦大学 理学部	教授
養王田 正文	東京農工大学 大学院工学府	教授

2019年3月現在

発行：公益財団法人 新世代研究所

Foundation Advanced Technology Institute

〒101-0063

東京都千代田区神田淡路町 1-23-5 淡路町龍名館ビル 4 階

電話：03-3255-5922 ファックス：03-3255-5926

ホームページ：<http://www.ati.or.jp>

