

研 究 報 告 書

—2020 年度研究会活動—

第 27 回 研究報告会

2021 年 7 月 5 日（月）オンライン開催

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2020年度活動報告』 柴田 直哉 (界面ナノ科学研究会 委員長)	1
(2) 『最後のハードル』 片浦 弘道 (ナノカーボン研究会 委員長)	8
(3) 『スピン科学のたゆまぬ進展を』 齊藤 英治 (スピントロニクス研究会 委員長)	16
(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)	22
(5) 『2020年度バイオ単分子研究会活動報告-ナノバイオ研究の進展-』 西野 吉則 (バイオ単分子研究会 委員長)	30
(6) 『ロボティクス技術と力触覚、そして五感へ』 都甲 潔 (ナノメカニクス研究会 委員長)	38

界面ナノ科学研究会(第9期)の2020年度活動報告

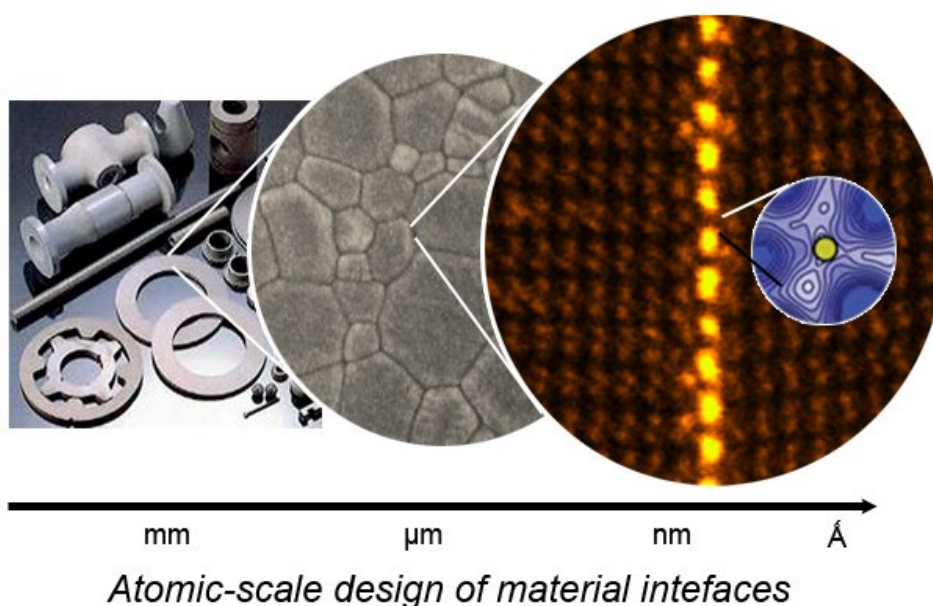
委員長 柴田 直哉

東京大学大学院 工学研究科 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、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、幅広い研究分野を横断する異分野融合領域を形成することを意図している。2019年度からは東京大学の沙川貴大教授にもメンバーに加わって頂き、総勢13名のメンバーで研究会活動を行っている。

界面ナノ科学研究の意義と波及効果は極めて大きい。物質・材料、エネルギー、情報通信、医療・創薬などの未来社会の実現に不可欠な科学技術領域において、「ナノ界面」は極めて重要な課題であり、今なお未踏のフロンティアである。つまり、「ナノ界面」は、全く新しい現象の発見からそれを利用した応用までの幅広いスペクトルを有し、多くの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、マテリアル、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。こ



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!

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た。また、社会と研究者の今日的な関わり方についても深く議論し、これからのあるべき科学者像についても議論した。

2020年度においては、コロナ禍のため対面での研究会が困難であり、運営面では難しい状況であったが、委員会発足時の以下の運営方針を堅持し活動を行った。

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

本研究会にご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る。

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。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）が中心となって積極的に議論・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。これは、様々な立場の情報、利害、思惑が錯綜しており、データに基づいた科学的なアプローチ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。

2. 2020年度活動の概要

2020年度は、2回の研究会をオンライン開催した。第1回は2020年12月15日に「最新ナノ計測」と題して研究会を開催した。この研究会では、昨年度末に開催を予定し、新型コロナウイルス感染拡大の影響で中止した研究会でご講演頂く予定であった2名の講師による講演会を中心に行った。第2回は2021年3月25日に「界面ナノ科学研究会総括 -未来を語る-」と題し、研究会を行った。ここでも昨年度ご招待予定であった2名の講師による講演会を行った。

以下に2つの研究会の内容を説明する。

第1回 2020年12月15日

開催方法：オンライン

テーマ：最新ナノ計測

内容：各会員から推薦頂いた以下の気鋭の若手ナノ計測研究者から最新計測に関する最新研究トピックスをご紹介頂いた。また、各会員からコロナ禍における近況が報告された。

講師（敬称略）

- ・川井茂樹（物質・材料研究機構）
- ・千賀亮典（産業技術総合研究所）

まず前半の講演パートでは、2020年度に企画した講演会で予定していた講師をお招きして、最新の界面計測研究のお話を伺った。まず、川井氏からは超高分解能走査型プローブ顕微鏡を用いた表面化学研究について、紹介頂いた。原子や小分子、さらに高分子鎖で終端した短針先端を用いた原子間力顕微鏡と走査型トンネル顕微鏡による単分子レベルの表面化学の研究、主にグラフェンナノリボン(GNR)の最新の研究成果についてご報告頂き、原子レベルでホウ素原子や窒素原子をドーピングする内容や、超潤滑性の発現など原子レベルでの構造制御から物性発現まで、プローブ顕微鏡の最先端を垣間見る内容であった。会員一同大変興味を持つ内容であり、活発な討論が行われた。次に、千賀氏から、最先端の電子顕微鏡に関する研究が報告された。透過型電子顕微

鏡用のモノクロメーターが開発されたことで、電子エネルギー損失分光 (EELS) のエネルギー分解能が飛躍的に向上したことにより、今までアクセスが困難であった赤外～可視光領域の吸収ピークを高空間分解能で得ることが可能になり、カーボンナノチューブや二次元材料の欠陥におけるエキシトン寿命の変化などを定量的に評価することに成功したとの結果が報告された。また、赤外領域で電子線の照射条件を調整することで角度分解能を向上させ、グラフェン一枚のフォノン分散関係の取得に成功した最新の結果も報告された。最新計測の名に相応しい発表に、会員から活発な質疑討論が行われた。

後半のパートは、各会員からコロナ禍における近況報告を頂いた。各自、コロナ禍においてどのような問題に直面しているのか、特に教育・研究活動の現場における様々な問題が報告された。久しぶりの研究会であったこともあり、お互いの無事と近況を語り合うことで、一層の連帯感が芽生えたように感じた。しかし、研究活動に関しては多少なりともコロナが陰に陽に影響し始めていることは否めない事実であると感じた。今後は、若手研究者のモチベーションを如何に向上するのか、が重要であるとの認識が共有された。

第2回 2021年3月24日

開催方法：オンライン

テーマ：界面ナノ科学研究会総括 -未来を語る-

内容：各会員から推薦頂いた以下の気鋭の若手ナノ計測研究者からナノ界面計測に関する最新研究トピックスをご紹介頂いた。また、これまでの総括を行った。

講師 (敬称略)

- ・西野智昭 (東京工業大学)
- ・野村光 (大阪大学)

まず前半の講演パートでは、2020年度に企画した講演会で予定していた講師をお招きして、最新の界面計測研究のお話を伺った。西野氏からは、STMによる単一分子電気伝導計測に関する最新の状況について、ご紹介頂いた。DNAの二重鎖構造とその解離状態が、微弱な電気伝導計測によって計測できることや、その速度論的な解析により反応メカニズムの詳細が解明されはじめている現状をわかりやすく講演頂き、会員から活発な質疑討論が行われた。単一分子の反応場の理解に本手法が極めて有益な知見をもたらす可能性が示され、会員一同大変興味を持つ内容であった。野村氏からは、放射光XMCD法とAFMを組み合わせることで、ナノスケールの磁化状態を計測する挑戦について紹介頂いた。装置のセッティングの難しさや微弱な信号計測の難しさを克服しながら、ナノスケールの磁化が見え始めた状況をご紹介頂き、大変参考になった。会員からも活発な質疑が行われた。

後半のパートは一杉会員から話題提供があり、①マテリアル DX について、②博士課程進学者の減少について、③ATI 委員会横断的な議論の場を作る案について、報告頂いた。これらの内容について、会員および講演者全員でフリーディスカッションを行った。①は今後のマテリアル研究を取り巻く環境が政府によるマテリアル革新力強化の方向性によって、どのように変容してくのかに関してわかりやすく説明頂き、マテリアル分野の研究者の多い本委員会にとって大変参考になるお話であった。今後は、マテリアル分野において世界的なヘゲモニー争いが激化し、DX化が待ったなしの状況になるという政策側の方針によって、MI、サーキュラーエコノミー、資源、製造プロセスなどが重要なキーワードになるとのことである。②と③に関しては、博士進学学生が毎年減少するという現状がデータとともに共有され、どのような対策を講じるかについて話し合った。来期の研究会を学生のモチベーションアップに活用する方法などが提案された。また、委員会を横断する議論の場を作ることにに関して前向きな意見が多く、界面ナノ科学研究会として積極的に参加する方針でまとまった。

3. 今期の総括

2020年度の活動に関しては、新型コロナウイルス感染症が収束せず、対面での研究会を希望していたが、結果的に2回ともオンラインであった。本委員会では、研究者同士の密接な交流も大切にしており、依然として対面開催が最も望ましい方法であると考えている。よって今後は、ハイブリッド開催なども随時検討していきたい。

研究会としては、コロナ禍になる前に対面での研究会を開催できたことにより、会員同士がお互いを良く知る関係をコロナ前に構築できていたことが結果として大きかった。このことが、オンライン委員会で活発な議論を行うための素地として極めて重要であったと考えられる。しかし、講師の先生に関しては、初対面の場合も多く、どのようにオンラインで初対面の研究者と胸襟を開いた議論を醸成できるのか、今後の検討課題である。本研究会では、多くの若手研究者を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することができ、各会員からも本研究会の継続を望む声を多数頂いている。次期の研究会においても、将来の共同研究や研究交流、サロン形成に繋がる参加者一同の糧となるような研究会が開かれることを切に願う。また、今日ほど研究者と社会の関わりを強く意識せざるを得ない時代は無いと思われる。素晴らしい研究とはなにかを問い続けると同時に、研究者とはいかにあるべきか、研究者の責任とはなにか、についても絶えず問い続ける姿勢が重要であろう。自戒して纏める。

研究会開催記録

【第1回】2020年12月15日（火） オンライン開催

「最新ナノ計測」

1. 「超高分解能走査型プローブ顕微鏡を用いた表面化学」

物質・材料研究機構 先端材料解析研究拠点

川井 茂樹*

2. 「電子顕微鏡を用いた低次元材料の局所物性評価」

産業技術総合研究所

千賀 亮典*

3. 研究会員報告

参加者 14名（会員10名、外部4名）

【第2回】2021年3月24日（水） オンライン開催

「界面ナノ科学研究会総括 ―未来を語る―」

1. 「電気伝導度計測に基づく単一分子化学」

東京工業大学理学院 化学系

西野 智明*

2. 「ナノXMCD/走査型プローブ顕微鏡複合装置の開発」

大阪大学大学院 基礎工学研究科

野村 光*

3. ディスカッション「今期（3年間）の最終年度の総括」

参加者 12名（会員10名、外部2名）

※印は外部の講演者

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	大阪大学 産業科学研究所 界面量子科学研究分野	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
沙川貴大	東京大学大学院 工学系研究科	教授

2021年3月現在

最後のハードル

委員長 片浦 弘道

産業総合研究所 ナノ材料研究部門 特命上席研究員

1. はじめに

ナノカーボン研究会では、少なくとも1次元方向の大きさが100ナノメートル以下の主として低次元材料に着目し、その魅力的な物性を探査している。特に炭素 sp^2 ネットワークは構造柔軟性が高く、フラーレン（0次元）、ナノチューブ（CNT：1次元）、グラフェン（2次元）等、多彩な材料群が構築されている。基本骨格となるグラフェンの電子は、K点近傍に線形分散を持ち、驚くほど高い移動度が実証されている。特に1次元バンド構造となるCNTでは、Siと類似のバンドギャップを有する半導体型が存在し、その電子デバイスへの応用が期待されている。本研究会では、これら魅力的なナノカーボン材料に焦点をあわせ、その基礎物性の理解から応用技術展開まで、広く調査研究を行い、科学・技術の発展への貢献を目指している。

これまで、ナノカーボン材料の物性研究は順調に進んできたと言える。理論的予測も多く実証されている。しかし、極めて高い移動度を利用した電子デバイスは未だ実現には遠い状態である。有効質量ゼロの電子が見せるはずのずば抜けた性能の片鱗がなかなか見えてこない。そこには材料的に超えなければならない最後の大きなハードルがあるようだ。

2. ナノカーボン研究会 2020 年度活動報告

ナノカーボン研究会では、毎年夏に若手研究者を中心としたオープンな研究会と、冬にメンバーのみでクローズドな研究会の2回の研究会をそれぞれ蔵王温泉と福島温泉で行っている。2020年度は新型コロナの感染拡大とともに始まったため、夏の研究会の開催は見送ることにした。しかし、これまでの感染症のパンデミックの例から、年が明ける頃には終息し、冬の研究会は通常通り開催可能では無いかと漠然と期待していた。しかし、実際には新型コロナの猛威が収まることは無かった。そこで仕方無く、年度末の3月中旬にオンラインで研究会を開催することになった。個人的には気が進まなかったのだが、ATIが事前にオンライン会議の準備を入念にしておかげで、何の苦労も無く開催できた。実際にやってみると、少人数の研究会のためか思いのほか具合が良く、通常よりも議論も盛り上がった。長時間の移動を伴わない会議はメンバーの日程調整が容易であり、通常開催の研究会よりも多数の参加者が集えるだけでなく、各

自良好なネットワーク環境からの参加となるため、質問者が参考論文を即座に画面共有するなど、情報密度の高い濃密な議論が可能となるという利点があった。もちろん、このような会議が可能なのは、これまでに構築した信頼関係があればこそで、ベースとなる信頼関係の構築には、温泉における濃密な関係形成が重要である事は変わらない。



オンラインで記念撮影（湯田坂先生すみません）

第一回研究会：「コロナ禍でも進むナノカーボン研究」

さて、研究会の内容にも触れよう。東北大の齋藤先生は、細い金属円筒中で電場が増強される計算を示した。円筒構造に依存し、表面プラズモンの周波数とは異なる周波数で、円筒内部で外部から加えた電場の増強が生じる。条件によって、10倍程度の電場が増強されることが示された。光散乱の強度は、電場の4乗に比例することから、ラマン散乱であれば1万倍の増強が期待できる計算になる。金属円筒内に分子を内包させれば、孤立分子のラマン散乱が測定できるかも知れない。金微粒子などを用いた表面増強ラマン散乱と類似の実験手法になり得ると期待される。円筒内に閉じ込めるため、不安定な分子にも適用できるなどの優位性がある（参考文献 M. S. Ukhtary, R. Saito, Carbon, 167, 455, (2020)）。

細い金属円筒といえば、金属型のCNTも候補になりうるかも知れない。CNTには半導体型と金属型があり、これまでは物性探査や応用研究は半導体型が中心であり、金属型CNTの詳細な研究はあまり多くなかった。実は、金属型CNTの構造分離は半導体型に比べるとかなり難しく、高純度の単一構造試料を得るのが困難であった事もその一因である。そんななか、我々のグループで最近金属型CNTの構造分離が可能になったので、報告させていただいた。これまで不可能だった分離が可能になったのだから、そこにはどれほどのブレークスルーがあったのかと思うかも知れないが、実際には単に「それが可能であることに気が付いた」という事だけである。分離手法は半導体型と全く同じであり、何の工夫も無い。我々はこれまで何度も経験しているが、「可能であるということ

を知る」事は、非常に強力なブレークスルーになりうる。たとえそれが誤解から始まっているとしても、可能であると思えば、いつの間にか実現するという事も起こりうる。C₆₀の合成も誤解から始まっているという説もある。一旦可能になれば、それをさらに上手にやるのは比較的容易である。こうしていつの間にか、高度な技術が形成されていく。不思議なものである。

本丸の半導体型 CNT のデバイス応用に関して、名大の大野先生から斬新な話題提供をしていただいた。絶縁膜を2層のCNTの薄膜でサンドイッチした構造を構築し、そこに複数の電極を形成すると、ニューラルネットワークとして機能するというのだ。ネットで検索すると、2018年に大阪大学のグループからも類似の成果がリリースされている (H. Tanaka et al. *Nat. Commun.* **9**, 2693 (2018))。既存の Si デバイス上にニューラルネットワークを模した動作をプログラムするのではなく、素子自体がニューラルネットワークとして動作するというのは、SFの世界では見かける話題だが、実際にそのような素子が期待通りに、しかもCNTを用いて動作するというのは、わくわくする話題である。大野先生は、いつもあっと驚くような話題を提案していただいております、そのたび私のニューラルネットワークも刺激されている。

グラフェンの研究も熟成の域に達している。ナノ材料の研究開発では、高品質材料の合成が不可欠である。東京理科大の本間先生からは、Ni 結晶表面にグラフェンを成長させた際のステップ形成の詳細な解析の話題が提供された。平坦な Ni 表面にグラフェンを成長させると、結晶面に大きな段差が発生する。この段差の形成プロセスを追った。その結果、格子整合性の高い Ni 結晶面上で成長を始めたグラフェンが高整合面を拡大して成長し、周囲の微小ステップが押し出され、次々集積されて大きな段差が形成されるためであると、詳細な実験と結晶学的考察から丁寧に導いた。このようなまじめな取り組みは、一見地味だが非常に重要で、次の大きなステップアップには不可欠となる。こういった研究ができる環境を維持する事が重要である。

さて、同じグラフェンでも、有機分子を基板上で熱分解してグラフェンのナノリボン合成するボトムアップ手法が開発されている。こういった手法で合成されるグラフェンは、幅が極めて狭いため、バンドギャップが形成され半導体となるため、デバイス作製に適していると期待されている。特に、長辺がアームチェア型のエッジを持つナノリボンは熱心に研究されており、短辺に並ぶ炭素原子数が何個かで、物性が変化するシステムとして、スピントロニクス等への利用が期待されている。しかし、ボトムアップで合成したナノリボンの実際の伝達特性を調べるのは容易ではない。そこで登場するのが、第一原理計算である。富士通の大淵先生には、幅の異なるアームチェアナノリボンの接合に関して、そのトポロジカルな物性を第一原理で計算した話題を提供していただいた。反強磁性状態が安定するには、最低単位格子8個の長さが必要であるとか、電子状態に影響を及ぼさないエッジの終端法などの結果が得られたという (M. Ohfuchi and S. Sato, *J. Appl. Phys.* **129**, 064305 (2021))。私は数値計算に関しては素人だが、最近

の計算機資源の進歩がすごいのか、昔に比べて大規模な計算が容易になっている印象を受ける。デバイスのシミュレーションまでできると、新規材料開発はかなりやりやすくなると期待される。

第一原理計算といえば、東工大の斎藤晋先生だが、今回も新物質合成に関する計算結果の話題を提供していただいた。ダイヤモンドと言え、通常は立方晶だが、隕石からは Lonsdaleite と呼ばれる微細な 6 方晶のダイヤモンドが見つかっているという。6 方晶ダイヤモンドは、立方晶よりも硬いため、合成できればその利用価値は高い。斎藤先生の計算によれば、(16, 0) や (8, 8) の構造の CNT を高圧で圧縮すると 6 方晶ダイヤモンドや 6 方晶と立方晶の複合した複雑な結晶構造ができる可能性が高いという。以前はこういった単一構造の CNT の集合体は入手困難であったが、現在では分離精製が可能になりつつあるので、夢物語では無くなってきた。さらに、Si においても 6 方晶の結晶が存在する。バンド構造が異なるため、新たな素子構造構築の可能性もあるという。計算機内部では、どんな困難な実験も可能であり、それは現実世界を遙かにリードして、研究を牽引する力がある。

ナノカーボン研究会では、カーボン系以外にも遷移金属カルコゲナイド系などの低次元系も議論している。関西学院大学の若林先生には、光誘起スピン流の話題を提供していただいた。難しい事はわからないが、単層の NbSe₂ に光を照射すると、純粋なスピン流を生成することが理論的に予測されるという。純粋なスピン流なので、電流は流れない。こういった材料を利用すれば、光—スピントロニクス of 新しい機能を持った素子を構築できる可能性がある。材料は存在すると思うので、後は検証するだけである。スピントロニクスは、究極の省電力デバイスとなり得るので、わくわくする話題である。

都立大学の宮田先生からは、2 次元よりもさらに低次元の 1 次元ナノワイヤーの話題を提供していただいた。2 次元材料は、基板上に成長すれば安定なので、比較的取り扱いが楽だが、1 次元材料は、基板上でも束になったり絡まったりする自由度が残るため、研究対象として難しい。しかし、今回の結果では、WTe のナノワイヤーを束にして基板上にランダムに成長させる、あるいは薄膜状に制御することも可能だという。一本のナノワイヤーの太さは 3 原子程度で、ほぼ 1 次元材料と言える。これがファンデルワールス力で束になった糸状もしくは単層や 2 層の薄膜状態で大量に生成される (Lim et al., Nano Lett., **21**, 243 (2021))。このように純粋で、形状の制御性の高い材料はこれまで無かったので、今後これらの材料を用いた物性研究が大きく進展するものと期待される。

さて、ナノカーボン材料と遷移金属カルコゲナイド系の話題について報告したが、最後の話題は、その複合系である。東京大学の丸山先生は、これまで CNT 表面へ他の二次元材料を成長させ、同軸のヘテロ接合を作製するのに成功しているが、今回、デバイス応用についての話題提供をいただいた。基板上に配置した CNT の外層に異種物質の成長を行うと、CNT—基板間に成長させる事が難しく、CNT の全周囲をカバーするのが困難

である。そのため、まず空中に浮かした状態でCNT（半導体）を成長させ、そのままその外周にBN（絶縁体）、MoS₂（半導体）と成長させて半導体—絶縁体—半導体の3層構造とした。これを基板上に転写して、そこに電極を装着してデバイスとした。Pd電極をCNTとMoS₂に装着し、それらの間にはBNの絶縁層が挟まっている構造となっている。CNTには大気中酸素から自然なホールドープが生じ、MoS₂にはPd電極から電子ドープが生じるため、pin接合のトンネルダイオードとして機能するという（Y. Feng et al. ACS NANO 15, 5600 (2021)）。円筒構造を巧妙に使うことで、CNT一本分のサイズで電子素子を実現できた事になる。まさに、凄い。

以上、ナノカーボンおよびその遷移金属カルコゲナイド系などの低次元系の新材料の研究は、理論・実験が巧妙にタッグを組んで驚くほどの進展を日々続けており、新型コロナウイルスの感染拡大でもこの勢いを止めることはできない事がわかる。

3. 第9期を振り返って

ナノカーボン研究会の第9期でもっとも印象に残ったことと言えば、蔵王温泉で開催されたバーベキューにつきる。最初は、いつもの宿が満室のため、同系列の別の宿に変更したところ、「バーベキューができますよ」との事で、それではと、東北大の齋藤先生が一肌脱いでくださって、バーベキュー大会が盛大に開催された。研究会、温泉、そしてバーベキュー、これは最高である。これに気を良くしたメンバーは、次の年もぜひバーベキューをと、同じ宿を選択し、再び齋藤先生のご努力で盛大なバーベキューが行われた。これも前年同様に大好評だったのだが、なんとブヨ（ブユ）に刺されるメンバーが続出した。刺された直後は気がつかず、しばらくしてから猛烈にかゆくなる。この虫刺されは結構怖いようで、発熱したメンバーも出た。しかし、これくらいでへこたれる食欲では無く、次の年も当然バーベキューを！と熱望したわけだが、残念ながら新型コロナの感染拡大のせいで、3回目の蔵王のバーベキュー大会は中止となった。さて、次回バーベキューができるのはいつになるのか。



蔵王温泉でのバーベキュー 肉だらけだ！

もちろん、冬の野地温泉も素晴らしかった。野地温泉は、お湯の加減がちょうど良いのだ。研究会をやって、温泉に浸かり、夕食を食べて、温泉に浸かり、齋藤先生が準備して下さった仙台の名酒を堪能すると、こちらも濃厚な時間が過ぎていく。特に温泉に浸かりながらの議論は、血流が上がるからだろうか、なかなか熱を帯びることも多い。オンライン会議も効率が良いのだが、写真を見ていただければ一目瞭然。こういった時間がメンバーの結びつきを強め、深い議論へと発展して行く。しかしながら、世知辛い昨今では、なかなかこういう時間を共有する事ができない。ATI 主催の研究会はこれが実現できる、数少ない貴重な存在となっている。



野地温泉で部屋飲み（温泉堪能後）

4. 終わりに

おかげさまで、第8, 9期のナノカーボン研究会の委員長をさせていただいた。途中定年を迎え、委員長を継続するかどうかでご迷惑をおかけしたが、どうにか最後までたどり着くことができた。冒頭で示した、ナノカーボン材料の最後のハードルとは、実は欠陥制御の事である。すべての炭素原子が表面に存在するCNTでは、表面の原子は外部からの刺激で比較的簡単に飛び出して、原子空孔を形成する。しかも、3次元結晶と異なり、欠陥を修復する事が困難である。そのため、ほとんどすべてのCNTには深刻な欠陥が多数存在し、それが移動度の低下を招いていると考えられる。実用化に向けては、この欠陥問題の解決が最後に残されたハードルとなる。幸いにも皆様のご協力のおかげで、この研究課題は科研費基盤Sに採択され、私の最後に成すべき仕事となった。ATIならびにナノカーボン研究会にこの場を借りて深く感謝するものである。

研究会開催記録

【第1回】2021年3月22日(月) オンライン開催

1. 「金属円筒内部の電場を増強する方法、メリット」
東北大学大学院 理学研究科 齋藤 理一郎
2. 「カルコゲナイド原子細線の合成と評価」
東京都立大学 理学部 宮田 耕充
3. 「ランダムなCNT薄膜による脳型コンピューティングの可能性」
名古屋大学 未来材料・システム研究所 大野 雄高
4. 「Energetics and magnetism of topological graphene nanoribbons」
(株) 富士通研究所 大淵 真理
5. 「グラフェン被覆に伴うニッケル表面の構造変化の解析」
東京理科大学 理学部 本間 芳和
6. 「Optical induced Spin Current of Monolayer NbSe₂」
関西学院大学 理工学部 若林 克法
7. 「sp³混成軌道を取る元素の結晶多形」
東京工業大学 理学院 齋藤 晋
8. 「金属型単一構造CNTの分離」
産業技術総合研究所 ナノ材料研究部門 片浦 弘道
9. 「1次元ヘテロ構造のデバイスへ」
東京大学大学院 工学系研究科 丸山 茂夫

参加者 15名 (会員 14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	特命上席研究員 研究会委員長
齋藤 理一郎	東北大学大学院 理学研究科	教授
遠藤 守信	信州大学	特別荣誉教授
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	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	嘱託教授
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/ 産業技術総合研究所	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	東京都立大学 理学部	准教授
田中 丈士	産業技術総合研究所 ナノ材料研究部門	グループ長
大淵 真理	(株) 富士通研究所	特任研究員

2021年3月現在

スピントロニクス科学のたゆまぬ進展を

委員長 齊藤 英治

東京大学大学院 工学研究科 教授

1. 研究構想

スピントロニクスは、主に電子の持つスピン角運動量を利用した次世代エレクトロニクス実現のための基礎・応用研究分野である。本研究会は、スピントロニクス研究を牽引する国内の中心メンバーが集い、角運動量保存則に基づくスピン変換現象を実験と理論の両面から統一的に理解することを目的としている。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。また、周辺研究分野の最新成果や、めまぐるしく変化する社会課題への対応も適切に取り入れていくことが時として研究の飛躍的な進展を促す。以上を念頭に、本研究会では、最新の研究成果を深く理解する場を提供し、その知見に基づいた自由闊達な議論を通じてスピン流など角運動量を軸とする物質科学「スピントロニクス」を建設するとともに、これまでにない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. 2020 年度活動の概要

2020 年度は、新型コロナウイルスの世界的な流行と、それに対応するための社会全体の変容が大学・研究機関にも多大な影響を及ぼした。国内外のほぼ全ての研究会・学会活動が延期され、大学での教育活動を含めてオンライン開催に移行する状況下、本研究会も活動の継続を模索し、次のテーマについてオンライン形式の研究会を開催した。

・第 1 回：2021 年 2 月 18 日（木）14:00～18:00

会場：オンライン（Webex Meetings）

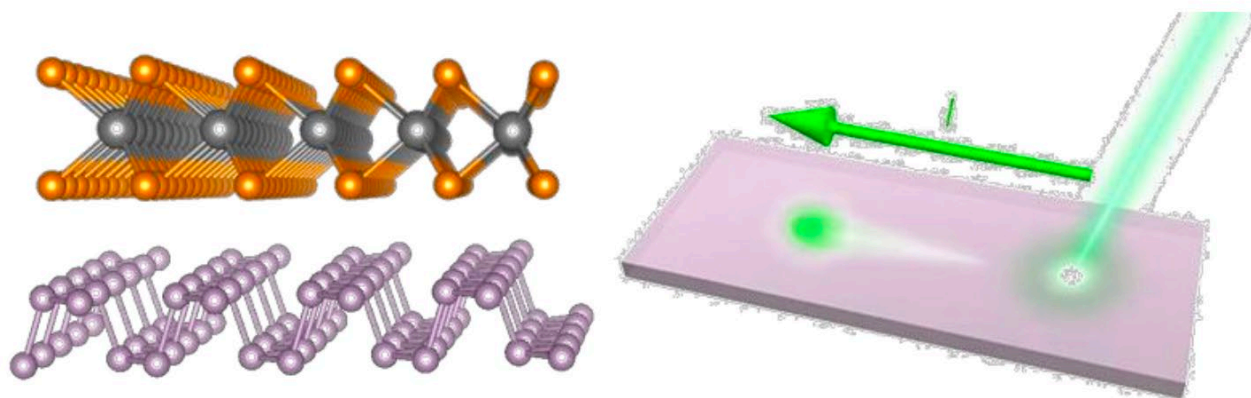
テーマ：「創発スピントロニクス」

スピントロニクスでは、これまで微小領域磁性体とそれを含む複合構造におけるスピン流と磁化ダイナミクスを主な研究対象として発展してきた。近年これに加え、固体中の磁気構造（実空間）及びエネルギーバンド構造（運動量空間）の非自明なトポロジーに依存して創発する様々な現象とその応用に注目が集まっている。本年度、研究会のテーマは「創発スピントロニクス」とし、その実験と理論的側面に関して 4 名の講演者から最新成果の紹介がなされた。

講演①「ファンデルワールス結晶界面における対称性制御と物性開拓」

東京大学大学院 工学系研究科 井手上 敏也先生

井手上氏は、薄膜・2次元化することで、元々の3次元層状バルク結晶にはない様々な量子物性や機能が創発するファンデルワールス結晶の実験成果を紹介した。最近著しく発展した、ナノチューブや2次元物質界面といった特徴的な構造や対称性を有するナノ構造やファンデルワールス結晶界面では、並進対称性の破れにより特異な量子輸送特性が観測される。モアレ超格子二層グラフェン、ツイスト遷移金属ダイカルコゲナイド、ツイスト 30° 二層グラフェンといった新しい物質系における対称性制御と物質開拓に関して最近の研究動向を概観した後、鏡像対称性のみを有するファンデルワールス結晶 (WSe_2 、黒燐) における電気分極やバルク光起電力効果に着目した近年の研究成果について解説がなされた。界面における対称性制御が光電荷輸送特性や波動関数の幾何学・トポロジ的性質に与える影響を考察するとともに、周期性を持たないファンデルワールス結晶界面における物性開拓の将来展望についても議論がなされた。



ファンデルワールスヘテロ界面 (左) とバルク光起電力効果の模式図 (右)

講演②「創発インダクタの実験」

東京大学大学院 総合文化研究科 横内 智行生

横内氏は、無線回路や電源回路で用いられる基本素子である「インダクタ」を量子力学的な原理によって置き換える「創発インダクタ」の最新研究成果について紹介された。通常インダクタは電磁誘導を原理としており、小型化に原理的な制約を有している。これに対し、創発インダクタは量子力学的な位相 (ベリー位相) により生じる「創発電磁場」を利用するものであり、素子の断面積を小さくするにつれて大きなインダクタンスが得られる従来とは全く異なるサイズ依存性を示すと予言されていた。このことをらせん磁性体 $\text{Gd}_3\text{Ru}_4\text{Al}_{12}$ による実験によって実証し、世界で初めて創発インダクタンスの観測に成功した成果が紹介された。実験に用いた素子は、従来型の小型インダクタンスと同等の数百ナノヘンリーのインダクタンスを 100 万分の一程度の素子サイズで実現している。電流密度や周波数・磁場に対する依存性から、観測されたインダクタンスは、非自明な非共線的磁気構造の電流駆動により生じた創発インダクタンスであることが強く示

唆されており、小型化するほどインダクタンスが増大する特徴的なサイズ依存性も確認された。質疑応答では、本成果によってスピントロニクス現象の新しい応用の可能性が切り拓かれたという認識のもと、活発な意見交換が行われた。

講演③「らせん磁化における創発インダクタの理論」

理化学研究所 創発物性科学研究センター 紅林 大地先生

紅林氏は、横内氏の実験方向をうけ、らせん磁気構造のダイナミクスに起因する創発インダクタンスに関する理論研究の現状を紹介した。電子系の電磁応答で誘起される磁気ダイナミクスと磁化ダイナミクスによって誘起される電流応答の両者を微視的に導出し、自己無撞着に解くことによって磁気ダイナミクスの効果を組み込んだ電気伝導度を導出した。このとき、らせん磁化系の磁気励起として位相励起であるフェイゾンと一様磁化励起を考慮し、インダクタンスの解析的表式をこの二つの自由度によって与えることに成功した。その結果より、らせん磁化における創発インダクタンスはフェイズンの励起ギャップの有無によって質的に異なることを明らかにした。すなわち、フェイゾンが励起ギャップを持つときは、一様磁化励起とフェイズンの両者が異符号で創発インダクタンスに寄与することから、インダクタンスの符号は両者の競合により決定される。一方、フェイゾンがギャップレスであるときは、どちらの励起も正の創発インダクタンスに寄与する。これらの結果から、温度や印加している電流密度などの外的要因でフェイズンのデピンニング転移を制御できれば、インダクタンスの符号変化が可能であることを指摘した。

講演④「空間反転対称性の破れた磁性薄膜における創発インダクタンス」

東北大学 学際科学フロンティア研究所 山根 結太先生

山根氏は、実空間における磁気構造のダイナミクスに起因する創発インダクタンスに加え、スピン軌道相互作用の効果により導入される運動量空間におけるスピン運動量結合の構造が創発インダクタンスに寄与するという理論提案を行った。薄膜界面等の空間反転対称性の破れた系では、ラシュバ型スピン軌道相互作用がスピン軌道トルクやラシュバ効果によるスピン起電力を導く。これらの効果を組み合わせることで、らせん磁化などの実空間磁化構造を伴わない伝導性の一様磁化膜においても磁化運動によってインダクタンスが生じ、創発インダクタンスと同様のサイズ依存性（断面積の逆数にインダクタンスの大きさが比例）を示す。典型的な界面ラシュバスピン軌道相互作用の大きさを用いると、長さ 0.1 mm、断面積 $100 \times 10 \text{ nm}^2$ の素子サイズにおいて数百ナノヘンリーものインダクタンスが得られるという見積もりが提示された。

3. 2021 年度活動の構想

当面オンライン形式の開催が予見されるなか、この状況を逆手に取り、普段参加が難しい研究者を巻き込んだ研究会の企画を検討している。スピン変換現象に関わる物理現象の普遍性の解明や、

スピントロニクスのさらなる異分野融合の可能性、近未来の社会的要請に対する貢献などの将来像などを領域外の専門家を交えて議論することで本研究会を、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】2021年2月18日(木) オンライン開催

テーマ：「創発スピントロニクス」

1. 「ファンデルワールス結晶界面における対称性制御と物性開拓」
東京大学 工学系研究科 井手上 敏也[※]
2. 「創発インダクタの実験」
東京大学大学院 総合文化研究科 横内 智行[※]
3. 「らせん磁化における創発インダクタの理論」
理化学研究所 創発物性科学研究センター 紅林 大地[※]
4. 「空間反転対称性の破れた磁性薄膜における創発インダクタンス」
東北大学 学際科学フロンティア研究所 山根 結太[※]

参加者 25名（会員 15名、外部 10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	教授

2021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、あるものは運動し、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、ナノスケールで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に対して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進められている。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、設置から 10 年の節目を迎え、ユーザーによる実験が順調に進んでおり、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きている。

2020 年度には J-PARC の加速器出力が 600kW に到達し、最高到達予定出力：1000kW への増強も目前に迫ってきている。病因タンパク質や各種有用酵素とその基質との複合体を始めとしたタンパク質について、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、さらなる成果を創出し、学术界及び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。

iBIX により科学的意義、波及効果、革新性のある中性子の長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ネーショ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ことが本研究会の目的である。

2. 2020 年度の研究活動の概要

2020 年度は新型コロナ感染拡大の影響により、例年通り 2 回の研究会開催を計画することができず、年度末に 1 回の研究会を実施した。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主催する iBIX 研究会 2 回、及び iBIX-JAXA-KEK 物構研-QST 合同研究会 1 回を共催にて実施した。

2.1 第 1 回水和ナノ構造研究会

(2021 年 4 月 15 日 (木)、オンライン開催)

2020 年度第 1 回水和ナノ研究会はオンライン (Webex meeting) にて行われた。外部講師 4 名をお迎えし「プロトン・電子移動と生体分子ナノ水和構造」というテーマで開催した。2019 年度の第 2 回研究会が新型コロナ COVID-19 の感染が拡大しつつあったため、残念ではあるが講師及び委員の安全に配慮して延期したが、2020 年度になりオンラインによる研究会開催の目処が立ったため、その際に企画したテーマのまま外部講師も同じ方々にお越し、延期した研究会を 2020 年度に実現する形となった。2020 年度の後半での開催を計画していたが新型コロナ感染拡大の影響もあり、日程の調整が難しかったため、特例として 2021 年の 4 月に開催させていただいた。

1 人目の外部講師は、東京大学 生産技術研究所の河内泰三氏をお迎えし、「 μ SR 法を用いたアモスファス氷の研究」というタイトルでご講演をいただくことを予定していた。中性子とは異なる手法であるミュオンを用いてどのように水を見ることができるのか非常に興味深い内容であったが、残念ながら当日の講師の方のやむを得ざるご都合により、発表は中止となった。

2 人目の外部講師は大阪大学大学院 薬学研究科の福田庸太先生をお招きし、「銅含有亜硝酸還元酵素の反応機構解明を目指した構造生物学的取り組み」というタイトルでご講演いただいた。肥料として土壌や水中へと過剰流入した窒素化合物が、自然の持つ窒素循環の均衡を脅かしている。土壌中や水中の窒素酸化物は主に、微生物がおこなう脱窒という働きによって分子状窒素にまで段階的に還元され、大気中へと戻さ

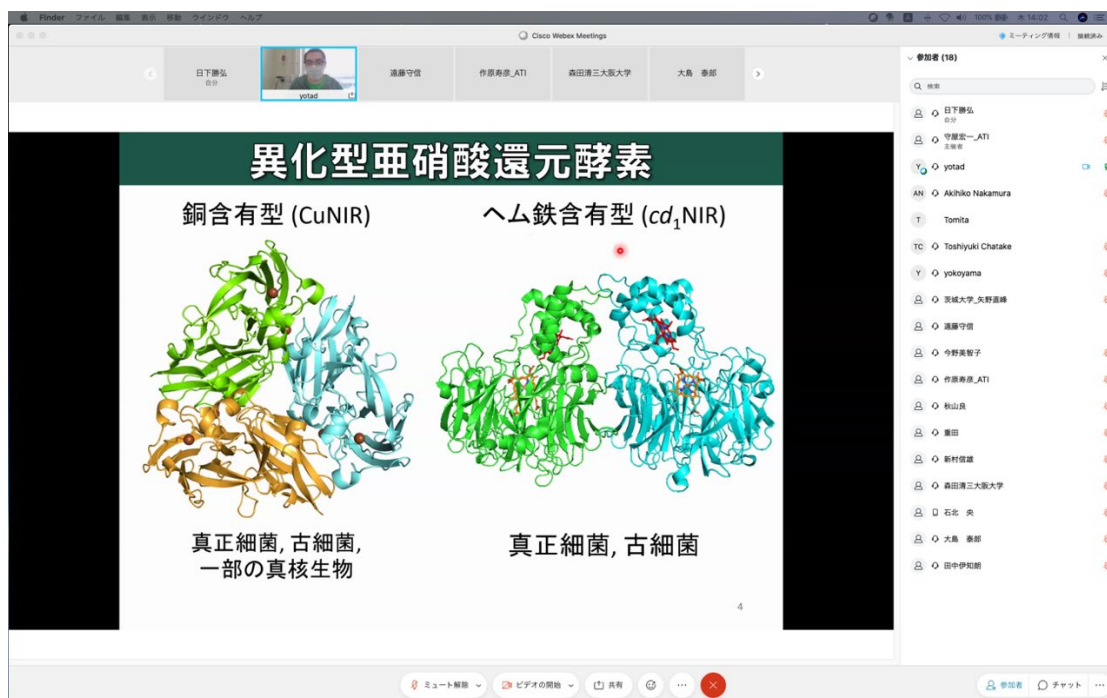
れているため、脱窒過程に関わる化学反応について深く理解することは、大気/水質/農業環境の改善につながると期待されている。亜硝酸イオン(NO_2^-)を一酸化窒素(NO)に変換する亜硝酸還元酵素(NIR)は、脱窒過程における鍵酵素であり、本反応の制御が地球環境にとって極めて重要だと目されている。本講演では、NIRのひとつであり、反応中心に銅イオンを持つ銅含有亜硝酸還元酵素(CuNIR)の基質へのプロトン移動が密接にかかわる反応機構の完全な解明のため行われた中性子線結晶構造解析の結果についてお話しいただいた。発表者らはiBIXを用いて、CuNIRの活性中心の水素原子を含めた中性子線結晶構造を1.5 Åという高分解能で決定し、触媒残基のプロトン化状態についての情報を得るとともに、活性中心に存在する銅イオンに水酸化物イオンが配位した構造を可視化することに成功した(Fukuda *et al.* PNAS. 2020)。この結果は、これまでX線結晶構造に基づいて実験科学者たちが提案してきた反応機構ではなく、量子化学計算が支持していた別の反応機構が正しい可能性を示していた。さらに、気質との複合体の中性子回折実験にも取り組んでおり、さらなる反応機構の詳細解明を精力的に進めておられ、iBIXを用いたさらなる成果の創出を期待できるお話であった。

3人目の外部講師として、九州大学工学研究院の楊井伸浩先生に講演をお願いした。「トリプレット超核偏極の材料化学」というタイトルで発表頂いた。核磁気共鳴分光法(NMR)は、分子の構造や運動性を非破壊的に分析できる有力な手法の一つであり、磁気共鳴画像法(MRI)としても応用されている。しかし室温における核スピンの偏極率が低いため、NMRやMRIの感度は非常に低い。この問題を解決する方法として、より大きな電子スピンの偏極を核スピンへと移行する動的核偏極法(DNP)がある。中でも励起三重項電子を偏極源として用いるtriplet-DNPは、室温付近でNMRやMRIを高感度化できるとして注目を集めている。このトリプレットDNP分野に材料化学を導入することにより、ターゲット分子への偏極移行を可能にする表面積の大きなナノ材料や、生体分子との親和性の高い水溶性偏極源の開発についてご紹介いただいた。iBIXグループではこのDNPを応用し、タンパク質内の水素原子を偏極することで水素原子の中性子散乱長を増大させ、かつ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飛躍的に増大させるという手法に着目してきた。しかしながら、タンパク質の大型単結晶全体を安定して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る。これに対してトリプレットDNP法は生体高分子にやさしい条件(室温付近、低磁場下)で核偏極の増大ができる可能性のある手法である。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ハードルがいくつもあると思われるが、タンパク質単結晶試料のより安定的な核偏極の方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人目の外部講師は横浜市立大学生命ナノシステム科学研究科の橘勝先生をお招きし、「タンパク質結晶の完全結晶と微小ねじれの観測」というタイトルで発表いただ

いた。良質なタンパク質結晶はX線回折や中性子回折によるタンパク質の精密構造解析において重要である。特に、中性子回折ではミリメートルサイズの大型で良質な結晶が必要である。これまでも良質な結晶の育成のために、様々な結晶育成法が開発されてきた。得られた結晶の完全性や結晶欠陥のキャラクタリゼーションは、より高品質な結晶の育成に向けて重要である。本講演では、シリコンなどの半導体結晶の欠陥評価に広く用いられてきたX線トポグラフィを、タンパク質結晶の品質評価に応用した、欠陥、特に転位のキャラクタリゼーションの研究についてお話いただいた。この研究で、シリコンやダイヤモンドのような完全性の高い結晶でしか観察されないX線による動力的回折現象が、タンパク質結晶の一つであるグルコースイソメラーゼ(GI)結晶においても明確に観察されることが世界ではじめて明らかとなっている。また、GI以外の理想的な晶癖面が見られるような良質な多くのタンパク質結晶においては、結晶全体にわたった微小なねじれが存在していることも明らかとなっている。我々はiBIXを用いた中性子構造解析において、データ処理の精度のさらなる向上の可能性を常に考慮しているが、タンパク質結晶の完全性を解析に考慮する必要があるものも存在するということが分かり、今後のデータ処理・解析手法の検討に有用な情報を与えていただける講演であった。

慣れないオンラインでの開催であったため活発な議論を交わすことができるか危惧されたが、問題なくすべてのご講演で委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回研究会オンライン開催のミーティング画面（大阪大学 福田先生講演時）

2.2 共催による研究会

その他、共催で開催された研究会の概要を以下に示す。

2.2.1 2020年度茨城県 iBIX 研究会:

第1回 iBIX 研究会 2020年12月16日(水) オンライン開催

「中性子結晶構造解析で明らかにするセルロース加水分解酵素の反応機構」

田中 秀明 (大阪大学蛋白質研究所)

第2回 iBIX 研究会 2021年3月24日(水) オンライン開催

「NADH-シトクロム b5 還元酵素反応系の高分解能立体構造解析」

平野 優 (量子科学技術研究開発機構(QST))

2.2.2 2020年度 iBIX-JAXA-KEK 物構研-QST 合同タンパク質研究会

令和2年11月9日(月)オンライン開催

「JAXA PCG 膜タンパク質プロジェクトの紹介」

成田 宏隆(JAXA)

「銅アミン酸化酵素の高分解能中性子結晶構造と触媒反応機構」

岡島 俊英 (大阪大学)

「高電位鉄硫黄タンパク質の高分解能 X 線結晶構造解析」

平野 優 (QST)

「放射光ビームラインにおける顕微分光装置の利用」

引田理英 (KEK 物構研)

「特別講演病原性微生物における金属動態の分子機構解析」

津本 浩平 (東京大学)

「Ni 結合型ルブレドキシンの物性・機能相関の解明」

庄村 康人 (茨城大学)

3. IX 期活動の総括 (成果)

本研究会の活動の目的の中心に据えられている J-PARC の中性子回折装置 iBIX は、建設から 10 年を迎え、第 1 期の設置契約期間が終了し、2017 年度に J-PARC、MLF への再設置申請を行い、実績評価及び次期計画評価調書を提出、ヒヤリングを経て 2018 年度から新たに 10 年間の再設置が認められた。現状の中性子によるタンパク質の構造解析においては、中性子源の出力が測定効率と直結しているが、2018～2020 年度にかけては J-PARC の加速器出力が 500kW～600kW と高い出力で安定的に運転されたことにより、着実に共用実験を進めることができ、タンパク質分野、材料分野共に中性子の長を生かした新たな成果が創出されており、2020 年度には 2 件のプレスリリースが行われる

に至った。本研究会においては、これらの iBIX を用いて得られたプロトン互変異性の観測をはじめとした中性子の特長を生かした研究成果を挙げられた方々にご講演をお願いし、iBIX のヘビーユーザー、計算科学、ソフトウェアの専門家である委員の方々と議論を行い、中性子の有用性を改めて認識し、他の手法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得ることができる可能を確認することができ、他分野の研究者の方々と議論してその思考回路や新たな手法に触れて新たなインスピレーションを得、自分と相補的なスキルを持つ研究者の方々とコラボレーションし、研究を進化・拡張する可能性を見出すことができた。

また、2019 年度には委員の方々を中心に日本生物物理学会年会のシンポジウム（タイトル：高感度水素検出による生体内化学反応の制御を目指して）を企画・実施し、国内の生物物理学の研究者の方々に対して、中性子による水和ナノ構造研究の有用性を示し、さまざまな実験分野の研究者及び計算科学の研究者と生体高分子中の水やプロトネーションについての議論を深め、関連する分野の相互の発展を目指すという本研究会の目的に沿った発表・議論の場を提供することができた。

水和ナノ構造研究会は前任の田中教授（茨城大学）から私が委員長を引継ぎ、その 2 期目（1 期：3 年）が 2020 年度で終わりを迎え、研究会自体が終了となる。iBIX はこれからも科学的意義、波及効果、革新性のある中性子の特長を生かした研究を展開し、学术界及び産業界に対して中性子による水和ナノ構造研究の有用性を示しつつ、成果の蓄積を継続して図っていかねばならない。これまでの研究会活動により、講演者と委員の間で行われた議論から生まれた知見は、今後の iBIX を用いた中性子構造生物学研究を進めていく上で有効に活用できるものであると考える。また、利用研究のみならず、中性子回折におけるハード・ソフト両面における技術開発についても、その知見を有効に生かしつつ進めていくことが重要である。さらには、委員の方々や講演者の方々の間で、異分野の研究者とのコラボレーションによる新たな学問的挑戦が進められることを期待するところである。

研究会開催記録

【第1回】2021年4月15日(木) オンライン開催

テーマ：「プロトン・電子移動と生体分子ナノ水和構造」

1. 「銅含有亜硝酸還元酵素の反応機構解明を目指した構造生物学的取り組み」
大阪大学大学院 薬学研究科 創成薬学専攻 福田 庸太[※]
2. 「トリプレット超核偏極の材料化学」
九州大学 工学研究院 楊井 伸浩[※]
3. 「タンパク質結晶の完全結晶と微小ねじれの観測」
横浜市立大学 生命ナノシステム科学研究科 橘 勝[※]
4. 「水和ナノ研究会第9期の総括」

参加者 20名（会員14名、外部6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 研究会副委員長
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 学術研究部 薬学・和漢系	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
中村 彰彦	静岡大学 農学部応用生命科学科	准教授

2021年3月現在

2020年度バイオ単分子研究会活動報告 —ナノバイオ研究の進展—

委員長 西野 吉則

北海道大学 電子科学研究所 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ふ、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状態に近い環境で、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。

2. 2020年度活動の概要

2020年度はATI研究会第9期の最終年度にあたり、西野が委員長を務める最後の年度でもあった。前年度の2019年度の研究会での委員との意見交換では、第9期最終年度のバイオ単分子研究会の活動として最後に際立った試みをしてみようと、研究会の海外開催も含め議論してきた。しかし、新型コロナウイルス感染症が2019年度末から世界的にまん延した影響で、海外開催はもとより国内での対面での研究会開催も困難な状

況となった。会員が所属する大学等では、オンライン授業への対応など、業務量が増大しているであろうことも勘案して、2020年度のバイオ単分子研究会は、オンラインで1回のみ開催することとした。

2.1 2020年度第1回バイオ単分子研究会（2021年3月30日）

2020年度第1回バイオ単分子研究会は、「バイオ単分子研究の近年の展開」をテーマに、オンライン（zoom）形式で、会員と森田清三副理事長のみで開催した。講演は、バイオ単分子研究会の委員の中から、佐々木裕次委員、平野美奈子委員、秋山修志委員に依頼した。講演に引き続き、第8～9期のバイオ単分子研究会を総括するディスカッションを行った。

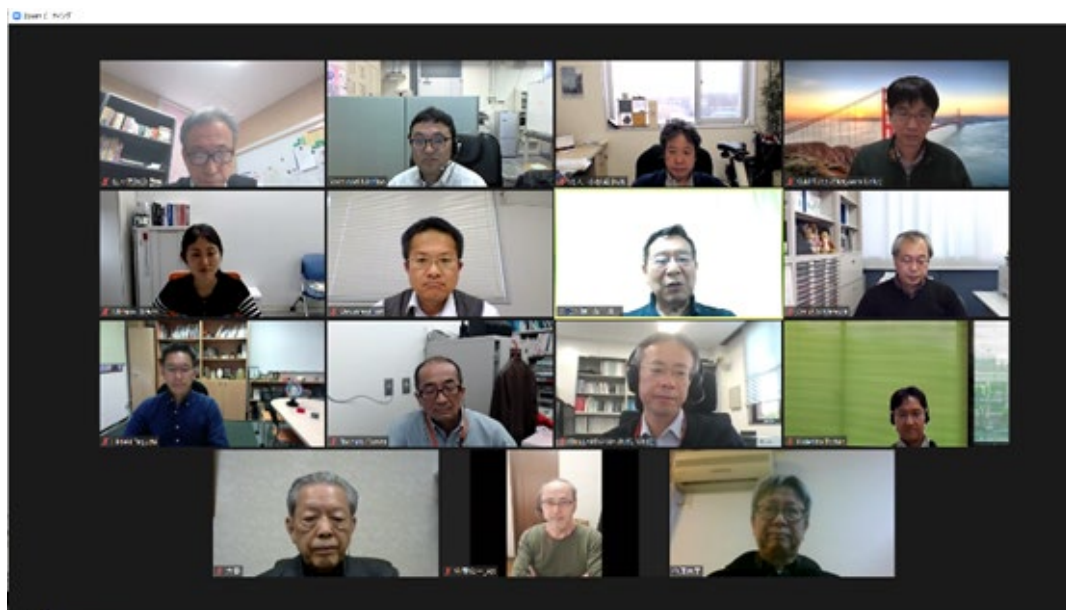
2.2 バイオ単分子研究の近年の展開に関する研究会

1人目の発表は、佐々木会員が「量子プローブを用いた分子内部動態計測の進展」という演題で行った。佐々木先生は1998年にX線1分子追跡法（Diffracted X-ray Tracking: DXT）法を考案した。DXT法では、ターゲットとなる分子等を、数十ナノメートルのサイズの金ナノ結晶で標識し、白色X線を照射して金ナノ結晶からのラウエ回折斑点の動きを時分割追跡することで、ターゲットの動態特性を評価する。0.1 mradオーダーの角度精度でDXT測定を行うことで、10ナノメートルほどのサイズのターゲット試料に対して、1ピコメートルオーダーの精度での動態評価が実現できるとのことである。DXT法を用いて、これまでに、生きた細胞内の機能タンパク質1分子のマイクロ秒動態計測や、生きた線虫内の着目タンパク質1分子の動態計測と線虫機能との相関研究などが行われた研究が紹介された。DXT法は白色の放射光X線を用いた計測であるが、実験室の単色X線でも計測が行えるよう拡張した手法として、佐々木先生は回折X線明滅法（Diffracted X-ray Blinking: DXB）法を2018年に提案した。DXB法では、大強度の白色放射光の照射による試料損傷を回避できるため、長時間観察や可視顕微鏡との同時観察も行えるようになった。DXB法により、無機・有機・高分子材料等を金ナノ結晶による標識なしに測定する取り組みも始めた。無標識でのDXB測定自体は、従来から広く行われている時間分解X線回折測定と同じであるが、X線回折強度の時間に関する自己相関関数から、回転拡散の情報を導出するデータ解析手法に独自性があるとのことである。単色X線が利用可能で、無標識で簡便に計測できるようになったことで、DXB計測の普及が進められている研究の進捗が示された。例として、東大柏IIキャンパス（つくばエキスプレス柏の葉キャンパス駅前）のAI計測研究拠点（産総研）におけるDXB測定装置の整備や、イギリスの放射光施設Diamond Light Sourceおよびドイツ・ハンブルクに所在するEuropean XFELでの測定が紹介された。European XFELでの測定は、コロナ禍で佐々木先生は参加できなかったが、電子メールでの指示のみで、測定を行うことができたとのことである。

2人目の発表は、平野会員が「イオンチャネルの基礎研究から生まれた新たな研究・開発」という演題で行った。イオンチャネルは細胞膜に存在し、特定の刺激に応じて細胞内外へのイオンの透過を制御する生体分子である。ヒトでは疼痛、てんかん、心疾患などの様々な疾患に関わり、創薬の標的分子として注目されているほか、農薬として用いられる殺虫剤が作用する分子としても重要視されている。一方、これら薬剤のイオンチャネルへの効果を効率的かつ正確に測定できる方法がないため、薬の開発が滞ってきた。この問題を解決すべく平野先生が進めてこられた、イオンチャネルの構造機能相関に関する研究から派生した技術開発と研究について紹介された。まず、自動イオンチャネル活性計測装置の開発についての発表があった。従来のアプローチとして、パッチクランプ法（1991年ノーベル生理学・医学賞）を自動化した技術がこの10年で広まってきたが、この方法は細胞を扱うため実験手法が煩雑で時間がかかる上、細胞毎のばらつきが大きいという問題点があった。このため、細胞膜を模倣した人工膜を用いた系で薬剤のイオンチャネルへの効果を測定する系の開発が進められてきた。平野先生らは、イオンチャネルを表面に固定した担体を用いることで、人工膜でのチャネル電流計測の効率を高める方法を開発した。また、開発した人工膜法を、ロボットを用いて自動化することで、8回のチャネル電流計測を連続して行うことが可能となったとのことである。次に、人工膜法を用いた、細胞内 cAMP 量の光制御のための光活性化アデニル酸シクラーゼ(PAC)の活性制御に関する研究が紹介された。青色光刺激により cAMP を産生する PAC という光タンパク質がオプトジェネティクスのツールとして利用されつつある。しかしながら、これまでに自然界から見つかっている天然の PAC は、非常に強いまたは弱い光量でないと活性化されず、限られた条件でしか利用できていないという問題があった。平野先生らは、シアノバクテリア *Oscillatoria acuminata* 由来の PAC (OaPAC) の活性に影響を与える部位を同定し、その構造-機能相関を調べた。さらに、同定した部位を改変することで、幅広い光量に対応できる変異体群を創製し、商品化を実現した(コスモバイオ(株)から販売中)。

3人目の発表は、秋山会員が「Cyanobacterial circadian clock system through the chemistry of rhythm, structure, and evolutionary diversity」という演題で行った。秋山先生は、概日時計(生物時計)の周期がどのように決定され温度補償が実現するのかという、時間生物学における長年の疑問に取り組んでいる。真核生物においては、時計遺伝子とタンパク質は負のフィードバックループ(時計遺伝子から翻訳された時計タンパク質が自身の発現を抑制)を構成して、転写・翻訳の振動を生じさせる(転写・翻訳振動モデル)と考えられてきた。転写や翻訳そのものは、分単位で起こる速い現象であるが、この速く動く生体高分子で構成される概日システムが、どのようにして非常に遅く安定しているのか長年の謎となっている。概日時計は、生物時計を持つ最も下等な生物であるシアノバクテリア(*Synechococcus elongatus* PCC 7942)をモデルシステムとして用いて研究が進められてきた。このシアノバクテリアの時計遺伝子(kai)が

1998年に発見され、その後、3種ある時計タンパク質（KaiA, KaiB, KaiC）とATPとを混ぜ合わせるだけで、試験管内でKaiCのリン酸化・脱リン酸化のサイクルが24時間周期の安定したリズムを作り出す（Kaiタンパク質時計）ことが2005年に示された。いずれも、近藤孝男・名古屋大学名誉教授らの研究成果である。このKaiタンパク質時計は、遅いが温度補償された概日時計のダイナミクスを実験的に調べるのに極めて有効であり、秋山先生らは、KaiCの周期変異体を用いて、X線結晶構造解析、X線溶液散乱や、物理化学的手法等により研究を進めてきた。KaiCは、自分自身をリン酸化・脱リン酸化する反応をする他に、ATPを加水分解する活性（ATPase）を有している。ATPase活性は非常に低く、1日に12個のATPしか加水分解されず、また、温度の影響をほとんど受けない。このATPase活性の遅さが、空間スケールの異なる多重の階層を越えて伝播され、最終的には細胞レベルにおける遺伝子の転写・翻訳のリズムを規定していることを示した研究などが紹介された。KaiCのATPase活性は、遅さに加えて温度補償性を有する。一般の化学反応では、遅い反応は大きな活性化エネルギーを有し、温度上昇に従って著しく加速される。互いに排他的となる「遅い反応」と「温度補償性」を統一的に説明することが残された課題とのことである。



(図2) 2019年度第1回バイオ単分子研究会（オンライン）の様子

2.3 第8～9期バイオ単分子研究会の総括ディスカッション

第8期からのバイオ単分子研究会の委員長を伊達理事長から西野に依頼された際に、伊達理事長より、研究会活動を新たな学術の創成に結び付け、科研費新学術領域研究等の大型の研究資金の獲得にもチャレンジして欲しいとの期待が伝えられた。その後も折を見て、ATIよりそのような期待が西野に示された。これを受け、第8期の研究会の懇

親会等を通じて委員の間で議論を進め、第9期が始まった2018年度に、バイオ単分子研究会の委員を中心としたメンバー構成で、「環境」と「1分子/1細胞解析技術」をキーワードにした、科研費新学術領域研究への申請を試みた。しかし残念ながら、採択には至らなかった。

ディスカッションでは、まず、バイオ単分子研究会を契機とした研究の進展について語った。2015年度第2回のオプトジェネティクスに関する研究会が契機となり、ご講演された山中章弘教授(名大)が研究代表者、研究会の座長を務めた須藤雄気委員が主たる共同研究者としたCREST課題「ファイバーレス光遺伝学による高次脳機能を支える本能機能の解明」(2016~2021年度)が開始された。オプトジェネティクスに関する同研究会に関しては、上記の2020年度の研究会の講演にもあった。平野美奈子会員の研究の展開にも寄与したことが述べられた。また、複数の委員が参画した研究プロジェクトとして、科研費新学術領域研究「高速分子動画」(領域代表:岩田想, 2019~2023年度)がある。同課題には、古田寿昭会員が計画研究の研究分担者に、城地保昌会員、西野が研究協力者として加わっている。また、西野、城地保昌会員、大島泰郎会員らがX線自由電子レーザー施設SACLAで行った時間分解イメージングでは、ケージド化合物に関して古田寿昭会員にアドバイスを仰いだ。新学術領域研究・学術研究支援基盤形成「先端バイオイメージング支援プラットフォーム(ABiS)」(研究支援代表:狩野方伸, 2016~2021年度)には、古田寿昭会員、宮澤淳夫会員が分担者として加わっている。古田会員には、ケージド化合物やABiSについて、2016年度にATI国際フォーラムとして開催したthe 17th RIES-Hokudai international symposium on “柔”でご講演頂いた。2019年度よりバイオ単分子研究会に加わった田口英樹会員が領域代表となり、2018年度よりバイオ単分子研究会に加わった渡邊力也委員が計画班代表として加わった科研費学術変革領域研究(A)「マルチファセット・プロテインズ」(2020~2024年度)が開始された。

第8期からのバイオ単分子研究会の立ち上げに当たり、委員の人は、バイオ単分子の探求に向けて独自の革新的な技術開発を進めている研究者のうち、特に、当時PIに成りたての若く活力のある方々を中心に西野からお声掛けを行った。小松崎民樹会員からは、バイオ単分子研究会の委員の多くが現在の生物物理学会の主要メンバーとなり、須藤雄気会員と小松崎民樹会員が副会長を、秋山修志会員と飯野亮太会員が理事を務めていることが紹介され、優れた人材が集まった研究会であったとの感想が述べられた。

その後、「ATI研究会の意義とは?」という、より広い視点での議論が行われた。全ての委員から共通して、自由な議論が研究者にとって如何に重要かが語られた。自身の研究から離れた分野の研究者と、興味の赴くまま、じっくりと議論することで、“明日の研究を進める上での活力が得られた”“物事を見る幅が広がった”という意見が、研究者の素直な思いを表した言葉として述べられ印象的であった。また、ATI研究会は、大型資金の獲得や共同研究などの近視眼的な視点から離れて、自由な議論ができる希有な

場であるので、この伝統を是非続けて欲しいとの意見もあった。これらの意見は、2016年に行われたATI 創立30周年式典で伺った、和田昭允最高顧問の講演でのATI 設立の経緯に通じるものと感じ、共感した。最終年度はコロナ禍でオンライン開催となってしまったが、良き仲間を支えられ、6年間心を躍らせ研究会活動を行うことができ感謝している。

3. その他

3.1 ATI 研究会 web ページの刷新

第8期冒頭の委員長懇談会(2016年4月7日)で研究会毎のweb ページを作ることを西野より提案させて頂いた。それまでは、全研究会を一つに纏めたweb ページしかなく、委員長の名前はあるが、会員の名前は無い状態だった。2017年度に研究会毎のweb ページを立ち上げて頂き、委員の名前や研究会活動も掲載して頂いた(図3)。ATI 研究会の活動の歴史を可視化することは重要であり、歴史の積み重ねこそが、ATI 研究会の成果と捉えている。

3.2 謝辞

第8~9期の活動を通じて、ATI 事務局の皆様には大変お世話になりました。青木郁さん、守屋宏一さん、作原寿彦さん、佐藤由紀さん、OGの高瀬正江さん、色野美和子さん、佐川暁子さんをはじめ、関係者の皆様方に感謝いたします。



(図3) 第IX期(2018~2020年度)のバイオ単分子研究会のweb ページ
(<http://www.ati.or.jp/research09>)

研究会開催記録

【第1回】2021年3月30日(火) オンライン開催

テーマ：「バイオ単分子研究の近年の展開」

1. 「量子プローブを用いた分子内部動態計測の進展」

東京大学大学院 新領域創成科学研究科 佐々木 裕次

2. 「イオンチャネルの基礎研究から生まれた新たな研究・開発」

光産業創成大学院大学 光産業創成研究科 平野 美奈子

3. 「Cyanobacterial circadian clock system through the chemistry of
rhythm, structure, and evolutionary diversity」

自然科学研究機構 分子科学研究所 秋山 修志

4. ディスカッション「第8～9期のバイオ単分子研究会の総括」

参加者 14名（会員13名、外部1名）

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 研究会幹事
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
田口 英樹	東京工業大学 科学技術創成研究院	教授

2021年3月現在

ロボティクス技術と力触覚、そして五感へ

委員長 都甲 潔

九州大学 高等研究院 特別主幹教授

1. 設立経緯

新世代研究所の新たな研究会として、「ナノメカニクス研究会」が2019年4月に正式発足し、活動を開始した。新世代研究所では、10年以上もの間、新規の研究会が発足されていないとのことで、今回、基礎から社会実装までを視野に入れた研究会の発足となった。

ナノメカニクス研究会設置の経緯

10年から20年先の将来社会を予想し、その社会的課題を解決する



図1 ナノメカニクス研究会設置の経緯 (2021年加筆修正)

2018年4月から新研究会設置のための準備を開始し、2018年11月に研究会メンバー候補が集まって議論した準備会、そして2019年2月の長野でのコア会議を経て、3月の理事会で研究会設置が承認された。他の5研究会と同じく2018年度から2020年度の3年間の活動を第9期とした(正確には2018年度は準備期間)。委員長を九州大学 都甲潔、副委員長を信州大学 脇若弘之特任教授が務め、研究会メンバーにはセンサ、アクチュエータ、制御、MEMS、材料、微細加工、メカトロニクス、振動解析、生体機構

など幅広い専門分野からなる計 13 名の研究者が参加している。

ナノメカニクス研究会は、10 年から 20 年先の将来社会を予想し、その社会的課題を解決するために設立されたものであり、Society5.0 のロボティクス技術に注力する。具体的には、微小な寸法の 3 次元構造がもたらす機械特性と機能を探究し、高性能化や新機能を付加したセンサ、アクチュエータ応用の基礎科学技術を構築することを最初の目標とする。「力触覚」や「ナノ振動」をキーワードの一つとして、生体機構など複数に渡る分野の科学技術を融合し、従来にない高度集積・知能システムを創成し、最終的には、研究成果の社会実装という形の社会貢献を目指す。

2. 研究構想：力触覚について

力触覚に関する研究では、表面の質感や硬さ、弾力、動きといった力触覚のセンシングと伝達、アクチュエータによる再現がまだ可能となっていない。もし、これが可能になると、柔らかいもの、形状が不定なものなどに対しても微妙で多様な作業を安全、安心、確実かつ迅速に実行できる。つまり、人間の手を超える究極の「手」の機能が実現することになる。



図2 人間の手の機能を超える試み

本研究会組織は、前述の通り、多岐に渡る専門家が、この研究開発にチャレンジする。本研究会の特徴は出口指向にあり、社会貢献を目指す。その目的達成のために、異分野の研究者が忌憚のない意見交換をすることで、世界初の技術を創出する。研究会メンバ

一と審議の上、まずはメカニカル機構などを利用したハプティクス機能に関する情報収集と議論から進めることとした。

3. 2020 年度の研究活動の概要

2019 年度に続き、講演を中心とした研究会を開催したが、本年度はコロナ禍で、リアル開催が不可能であったため、オンライン開催とした。結果、10 月に立命館大学小西聡教授、ならびに慶應義塾大学大西公平特任教授にそれぞれ「マイクロアクチュエータで動き、マイクロセンサで感じるソフトマイクロフィンガーロボット」「ハプティクスが拓く未来社会」の講演を賜り、活発な意見交換がなされた。

小西講師からはマイクロマシン技術の紹介に始まり、マイクロエレクトロニクス、マイクロアクチュエータ、ケミカルやバイオを加味したバイオセンサ、そして生化学分析チップや細胞培養チップについて豊富な話題が提供された。小さく（マイクロ）、柔ら

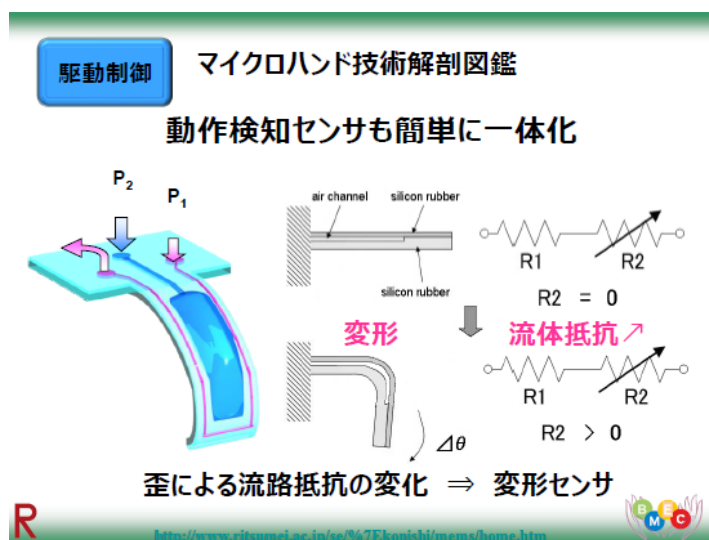


図3 マイクロハンド技術（小西講師）

かく（ソフト）、安全を可能とするマイクロフィンガーに触覚を持たせたマイクロフィンガーロボット開発への取組成果についても、体内のように人の手では入れない様々な小さな空間への人の能力拡張を目指しているとのことで、とても興味深い紹介がなされた。

大西講師からはハプティクスの定義から始まり、人工機械に力触覚を付与する技術であるリアルハプティクスを搭載したロボットは人間の運動や行為の記録と再生を行

い、人間並みの作業を可能とすることが期待され、社会に与えるその影響等の説明が詳しくなされた。慶應義塾大学にはハプティクス研究センターが設置、リアルハプティクス技術協議会が運営され、将来はインターネットを介して遠隔化技術とデータ化技術の開発で人間の能力を伝えることを支える基盤技術等、様々な応用研究が展開されていると紹介された。

リアルハプティクス技術とは・・・

- 人間の五感の一つである力触覚を通信して、(遠方にある) 接触対象の硬さ、軟らかさを操作者に伝える技術をリアルハプティクス技術 (RH技術) という
- 手元側(マスタ)と遠隔側(スレーブ)の間を有線・無線等で通信することで、あたかも面前の対象を操作するように遠隔側の対象を操作することが可能 ([遠隔化技術](#))
- また、対象を操作する操作者の行為をすべてデータ化し記録することが可能で、この記録されたデータを用いて操作者の行為を忠実に再現することが可能 ([データ化技術](#))

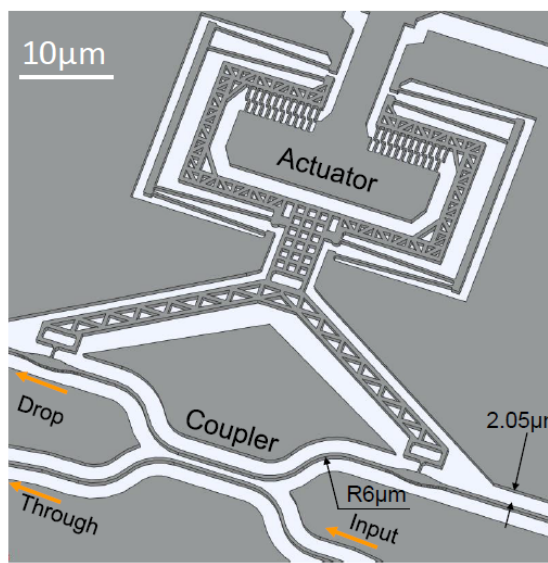
© 2020 All rights reserved Keio University

図4 リアルハプティクス技術 (大西講師)

明くる年3月には東北大学 羽根一博教授 (金森義明教授と共著)、ならびに電気通信大学 下条誠名誉教授にそれぞれ「MEMS/NEMS 技術によるナノシステム光学」「触覚センサとロボットハンド:触覚・すべり覚・近接覚センサのハンドへの適用」の講演を賜り、活発な意見交換がなされた。

羽根講師からはマイクロ電気機械システム (MEMS: Micro Electro Mechanical Systems) 技術や光 MEMS 国際会議等の傾向の一般的紹介に始まり、光通信および集積回路の分野で、ナノワイヤー導波路と呼ばれるシリコン導波路を用いた回路の研究の説明がなされた。ナノ光学としてよく知られる研究分野は走査型近接場顕微鏡であること、波長より小さい周期の深溝構造を形成して材料屈折率の平均値を変え目的の光学特性を得る方法も微細加工で実現できることなどが豊富な事例と写真を活用して分かり易く紹介された。

Variable-gap Si waveguide coupler switch



- Y. Akihama, Light 1,e15(2012)
- Freestanding waveguide
 - width: 400nm
 - height: 260nm
 - Coupling length: 10µm
 - Gap: 20-1000nm
 - Voltage: ~30V
 - * Response time ~10µsec
 - * Energy consumption <1pJ per switching
 - * Actuator < 60µm square
 - * Symmetric coupler arrangement
 - * Uniform air clad in coupler region

図5 光スイッチ (羽根講師)

下条講師からは触覚センシングのロボットハンドへの実装とその応用に焦点をあて研究開発例について紹介がなされ、触覚センサの種類と動作原理、すべり覚センサ、近接覚センサ等の説明が丁寧になされた。ロボティクス分野においては、例えば壊れやすいものの把持や、精密な部品の組み立てなど、より高い機能や安全性を実現するためには、触覚はなくてはならないもので、さらにヒューマンインタフェースの手段としても、タッチ패드などでの操作が当たり前となったように、より直感的で使いやすい情報機器の利用には触覚は必要不可欠となりつつある。これら期待の大きい分野の豊富な事例が紹介された。

内 容

1. 触覚の概要
 - ① 触覚の特徴 (五感の中の触覚)
 - ② 触覚センサに求められる機能・特性
 - ③ 触覚センサの分類
2. 触覚センサの種類と動作原理
 - ① 触覚センサの基本構成
 - ② 触覚センサの動作原理
 - ③ ロボットハンドでの利用実例(ビデオ)
3. すべり覚センサ
 - ① すべりとは? 初期すべりとは?
 - ② すべり覚の分類・動作原理
 - ③ ロボットハンドでの利用実例(ビデオ)
4. 近接覚センサ
 - ① 視覚・触覚の問題点
 - ② 近接覚からの情報と利用場面
 - ③ 近接覚の分類と動作原理
 - ④ ロボットハンドでの利用実例(ビデオ)
5. 触覚&ハンドの展望

図6 講演内容 (下条講師)

4. 第9期成果

本研究会は、10年から20年先の将来社会を予想し、その社会的課題を解決するために設立されたものであり、Society5.0のロボティクス技術に注力する。本研究会の特徴は出口指向にあり、社会貢献を目指す。その目的達成のために、有識者による講演の場を設け異分野の研究者が忌憚のない意見交換をすることで、世界初の技術を創出する。まずは2020年度までの2年間で、課題の探索と研究開発状況の調査を行った。今期は実質2年間の運営であり、かつ2年目にはコロナ禍であったものの、オンラインも含め計4回の研究会を開くことができた。講演者や委員の皆様と忌憚のない活発な意見交換を通じ、この方面のますますの発展を確信すると同時に、次期は対象とする学術領域を拡張し「感性」と「五感」をキーワードに含めることとした。第9期同様、講演を中心とした情報収集と意見交換、そして本メンバーを核として国家プロジェクトの獲得を目指す。最終的には、これらの成果の社会還元を可能とする。

研究会開催記録

【第1回】2020年10月1日(木) オンライン開催

1. 「マイクロアクチュエータで動き、マイクロセンサで感じる
ソフトマイクロフィンガーロボット」
立命館大学 理工学部
R-GIRO/バイオメディカルエンジニアリング研究センター 教授
小西 聡[※]
2. 「ハプティクスが拓く未来社会」
慶應義塾大学 名誉教授
ハプティクス研究センター 特任教授
大西 公平[※]
3. ディスカッション

参加者 17名 (会員 12名、外部 5名)

【第2回】2021年3月8日(月) オンライン開催

1. 「触覚センサとロボットハンド」
電気通信大学 名誉教授
下条 誠[※]
2. 「MEMS/NEMS 技術によるナノシステム光学」
東北大学大学院 工学研究科 機械知能系 教授
羽根 一博[※]

参加者 18名 (会員 12名、外部 6名)

※印は外部の講演者

ナノメカニクス研究会員名簿

都甲 潔	九州大学 高等研究院 五感応用デバイス研究開発センター	特別主幹教授 特任教授 研究会委員長
脇若 弘之	信州大学 工学部	特任教授 研究会副委員長
相原 建人	法政大学 理工学部機械工学科	准教授
土方 亘	東京工業大学 工学院機械系	准教授
川戸 佳	順天堂大学医学部泌尿器外科学 東京大学	客員教授 名誉教授
竹村 泰司	横浜国立大学大学院 工学研究院	教授
大岡 昌博	名古屋大学大学院 情報科学研究科	教授
古谷 克司	豊田工業大学 工学部先端工学基礎学科	教授
植田 敏嗣	早稲田大学 情報生産システム研究センター	名誉教授
中本 裕之	神戸大学大学院 システム情報学研究科	准教授
式田 光宏	広島市立大学 情報科学研究科医用情報科学専攻	教授
中本 高道	東京工業大学 科学技術創成研究院	教授
山岡 悦二	KOA株式会社	取締役
重城 幸一郎	セイコーウオッチ株式会社 商品開発本部	部長
飯野 朗弘	セイコーインスツル株式会社 精密デバイス事業本部	課長

2021年3月現在

発行：公益財団法人 新世代研究所

Foundation Advanced Technology Institute

〒104-0031

東京都中央区京橋 1-4-10 大野屋京橋ビル 3 階

電話：03-3516-3327

ホームページ：<http://www.ati.or.jp>

