

# 研 究 報 告 書

—2019 年度研究会活動—

2020 年 7 月 6 日



## - 目 次 -

|                                                                |    |
|----------------------------------------------------------------|----|
| (1) 『界面ナノ科学研究会(第9期)の2019年度活動報告』<br>柴田 直哉 (界面ナノ科学研究会 委員長)       | 1  |
| (2) 『うまくいかないからこそ面白い?』<br>片浦 弘道 (ナノカーボン研究会 委員長)                 | 8  |
| (3) 『スピン科学-新しい展開に向けて-』<br>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』<br>日下 勝弘 (水和ナノ構造研究会 委員長)       | 26 |
| (5) 『2019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-』<br>西野 吉則 (バイオ単分子研究会 委員長) | 34 |
| (6) 『ロボティクス技術と触覚・力覚』<br>都甲 潔 (ナノメカニクス研究会 委員長)                  | 43 |



## 界面ナノ科学研究会(第9期)の2019 年度活動報告

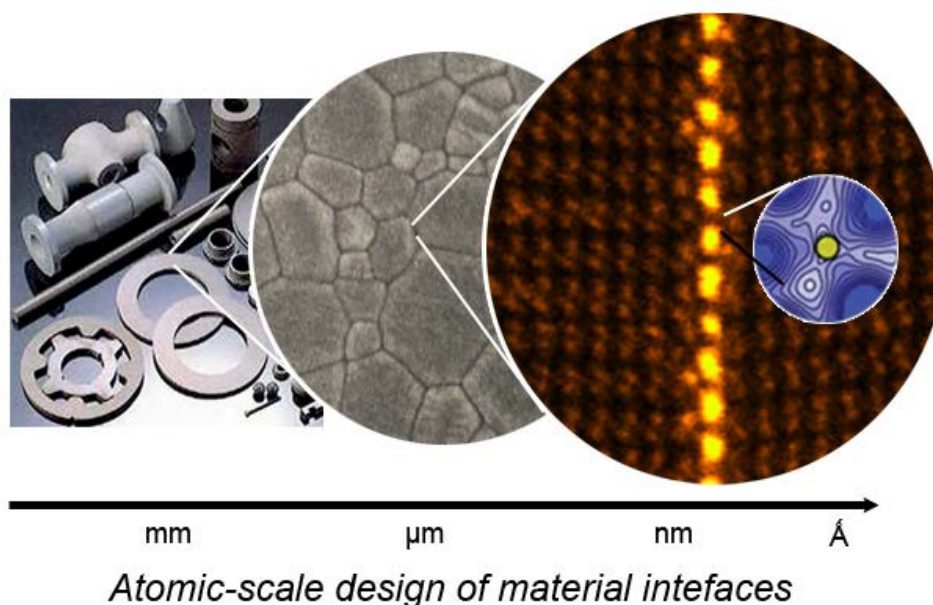
委員長 柴田 直哉

東京大学 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。2019年度からは東京大学の沙川貴大氏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た。

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・創薬などの現代社会に不可欠な科学技術領域において、「ナノ界面」は極めて重要な科学的課題である。つまり、「ナノ界面」現象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、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。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



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！

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、これからのあるべき科学者像についても議論したいと考えている。

昨年度から発足した本研究会であるが、2019年度においても以下の運営方針をもとに活動を行った。

#### 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。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. 2019 年度活動の概要

2019 年度は、1 回の研究会を開催した。2 回目の研究会は 3 月末の開催を予定していたが、新型コロナウイルス感染拡大の影響で残念ながら中止（2020 年度に延期予定）と判断した。以下に研究会の概要を説明する。まず、第 1 回は 2019 年 10 月 11 日に「ナノ界面、欠陥を高度に利用した材料・デバイス開発の最前線」と題して研究会を開催した。第 2 回目は、2020 年 3 月 30-31 日の一泊二日で、「最新ナノ計測」と題して研究会を予定していた。

以下に 2 つの研究会の内容を説明する。

第1回 2019年10月11日

会場：新世代研究所 会議室

テーマ：「ナノ界面、欠陥を高度に利用した材料・デバイス開発の最前線」

内容：本年度第一回目の研究会は、昨年度決定した方針に従い、ナノ界面、欠陥などを応用した材料・デバイス創製の最新のトピックスを取り上げた。各委員から推薦頂いた以下の先生方のご講演を拝聴し、活発な議論を行った。

講師（敬称略）

- ・松永 克志（名古屋大学）「無機化合物結晶における転位のナノ構造と機能」
- ・早水 裕平（東京工業大学）「バイオナノ界面のダイナミックな挙動 ～自己組織化ペプチドでナノ材料界面の電子状態を制御する～」
- ・小野 堯生（大阪大学）「界面近傍で生じる生化学反応の 2 次元ナノ材料を用いた計測」
- ・高山 あかり（早稲田大学）「電子状態・輸送特性・構造解析から探るグラフェン系超伝導」

松永先生からは、最近発見された無機化合物結晶（ZnS）における光塑性現象に関する最新トピックスをご紹介いただいた。塑性変形のようなマクロな現象が光照射によって劇的に変化することが報告され、参加者の驚きとともに活発な質疑応答が行われた。早水先生からは、ご自身の研究経歴とともに、自己組織化ペプチドを用いた最新の研究成果についてご紹介頂き、2 次元材料と生体分子とのナノ界面がバイオセンサなどへの応用展開に向けて極めて重要な課題であることをご報告頂いた。小野先生からは、グラフェンを感染に伴う生体界面近傍での反応を高感度計測

する技術開発における最先端の研究内容をご紹介いただいた。インフルエンザウィルスの識別やウイルス薬の薬効評価などへの応用に関するトピックスもあり、感染症問題が顕在化した今となつてはより一層研究開発の進展が期待される研究内容であった。高山先生からは、グラファイト層間化合物における超伝導現象に関する最新トピックスをご紹介頂き、様々な計測手法を駆使したメカニズム解明に向けた取り組みについて活発な議論が行われた。総じて、ナノ界面の応用という意味では、2次元材料に関する研究が活発に行われている印象を受けた。2次元材料自体が界面のようなものでもあるため、これまでの界面科学の知見を総動員した応用展開が期待される分野であろうと考えられる。

また、第2回研究会のテーマ案としては、界面計測の最前線についての研究会を行うことが決定した。具体的な講師の先生方の選定については、各メンバーから推薦頂くこととなった。昨年同様、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た。

第2回 2019年3月25-26日（来年度に延期）

会場：水上温泉ホテル 200（群馬県水上温泉）

テーマ：界面ナノ計測

内容：各委員から推薦頂いた以下の気鋭の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き、本分野の新たな展望について議論を行うことを意図した研究会を企画した。

講師（敬称略）

- ・川井 茂樹（物質・材料研究機構）
- ・西野 智昭（東京工業大学）
- ・千賀 亮典（産業技術総合研究所）
- ・野村 光（大阪大学）

また、界面ナノ科学分野に近いATI 研究助成採択者の講演を企画した。

- ・飯浜 賢志（東北大学）
- ・塚本 孝政（東京工業大学）

研究会メンバー一同、大変楽しみにしていた研究会であり直前まで開催の可能性を模索したが、新型コロナウイルス感染拡大を受けてやむを得ず中止（来年度延期）と判断した。2020年度は基本的に同じ講師をお招きして研究会を開催する予定である。

### 3. 2020年度活動の構想

2020年度の活動に関しては、現状新型コロナウイルス感染症の収束が見通せず、どのように研



研究会を開催していくかという具体的な案は詰められていない。少なくとも、ATI 及び各大学、研究機関等の活動方針を踏まえ、注意深く判断する必要があると考えている。Web 会議システムなどを利用した研究会開催も検討しているが、現時点では対面開催が最も望ましい方法であると考えている。その際には3密防止や消毒など、感染拡大防止策を徹底する必要がある。また、講師選定に関しては、プライベートな事情や職場の方針を勘案する必要があるため、選定に難航する可能性もある。その場合は、内部の委員からの話題提供も検討する。

研究会の内容としては、昨年度から延期した「界面ナノ計測」の研究会を開催するとともに、最終年度の総まとめとしての「界面科学の将来展望（仮）」をテーマとする研究会を開催したいと考えている。これらの研究会では、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にしたい。

## 研究会開催記録

【第1回】2019年10月11日(金) 御茶ノ水

「ナノ界面、欠陥を高度に利用した材料・デバイス開発の最前線」

1. 「無機化合物結晶における転位のナノ構造と機能」

名古屋大学 工学部、JFCC ナノ構造研究所

松永 克志 ※

2. 「バイオ-ナノ界面のダイナミックな挙動

～自己組織化ペプチドでナノ材料界面の電子状態を制御する～」

東京工業大学 物質理工学院

早水 裕平 ※

3. 「界面近傍で生じる生化学反応の2次元ナノ材料を用いた計測」

大阪大学 産業科学研究所

小野 堯生 ※

4. 「電子状態・輸送特性・構造解析から探るグラフェン系超伝導」

早稲田大学 理工学術院 先進理工学部

高山 あかり ※

参加者 15名 (会員 10名、外部 5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<br>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<br>機能材料コンピュ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                         | 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                       | 准教授          |

2020年3月現在

## うまくいかないからこそ面白い？

委員長 片浦 弘道

産総研ナノ材料研究部門 首席研究員

### 1. はじめに

これまでポスドクには何度も言っているのだが、自分で凄い成果だと思う研究ほど論文にはしにくいものだ。凄い成果だと思うため、当然一流雑誌を狙うことになる。しかし、自分が思うほど世界はその事に注目していないものだ。しかも凄い成果ということは、既存の概念を超えていたり、通常予測される数値を大幅に超えていたりするわけで、にわかには理解し難い、もしくは信じ難い結果であることも多い。従って、査読者はその成果が真実であるのか執拗に確認しようとするため、なかなかOKが出ない。もしくは、ライバル研究者とおぼしき査読者から、非現実的な追加実験が要求されたりする事もある。このような壁を突破して、一流ジャーナルに画期的な結果を報告するのは容易ではない。一方、あまり面白い結果では無いが、一応新規性があり、真面目に解析されていれば、論文は結構すんなり掲載される。(一流ジャーナルに通るかどうかは別だが。) だから、ただ論文数を増やしたいなら、派手さの無い、地味で真面目な研究をしるとポスドクには言うことにしている。日頃そんな風に言っている私だが、本年度はちょっと興奮する成果があり、思わず独善的な論文を書いてしまい、査読者から手痛いコメントをいただき、恥ずかしながら未だに出口が見えていない。しかしこんな事があるのも、ある意味研究がうまくいっている証拠でもあり、だからこそ、この仕事(趣味?)がなかなかやめられない。

### 2. ナノカーボン研究会 2019 年度トピックス

新型コロナウイルスの感染拡大のため、年度末にはテレワークが多くなり、そのストレスからか teams のチャットでグループ内の初心者にも、カーボンナノチューブの基礎物性などの講釈をしてみた。昔を思い出しながら説明するうちに、研究開始当時のエキサイティングな時間がよみがえって来て、思わず熱が入ってしまった。と同時に、積み残した研究課題がまだいくつもあったことを思いだした。しばらくナノチューブの分離技術に没頭していたせいで、分離したナノチューブを使ってやるべき研究に進む余力が無かった。テレワークのおかげで、課題を再認識したのはうれしいのだが、学生時代、試験前に無性に小説が読みたくなったのと同じように、ただの現実逃避なのかも知れない。まあ、分離技術開発も一区切りというところなので、ちょうど良い気もする。ナノチューブの精密構造分離は可能になったが、その分離原理の詳細は実は良くわかっていなかった。それがこの1年の間にいろいろと謎が解け、ほぼ分離原理を理解するに至った。これが前書きで触れた興奮する成果

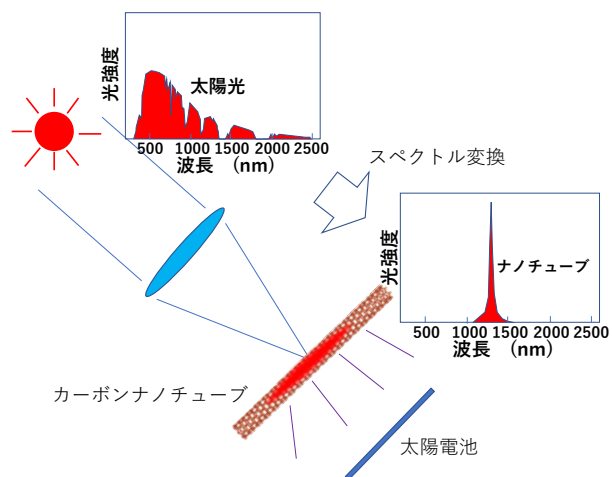
だ。我々の提案する分離原理は間違っていないと確信しているのだが、非常に複雑なプロセスであり、その証拠を明確に示すのは困難である。こういった怪しさ満載の論文を如何に世に送り出すか、世の大先生の中には、こういったご託宣論文をいくつも出している方々がいらっしゃるし、その意義もあると思うのだが、残念ながら私はまだ修行が足りないようである。

さて、2019年度のトピックスだが、夏に開催の蔵王の研究会では、京都大学の宮内先生を招待させていただき、最近始められたCRESTのプロジェクトに関する話題提供をしていただいた。現在、我が国に限らず化石エネルギーから再生可能エネルギーへの転換が精力的に進められている。なかでも、エネルギーペイバック（製造に必要なエネルギーを発電で回収する期間）が2年足らずで完了する太陽光発電はその主戦力といえる。我が家の屋根にも太陽電池が設置されており、昼間は3~4kWで発電している。米国NRELによれば、シリコン太陽電池の発電効率のチャンピオンデータは、現在26%程度だが、実はこの値はほぼ理論限界値に達している。これ以上の効率を望むなら「原理的に」大きなブレークスルーが必要となる。宮内先生の研究課題は、それを実現できるかも知れないのが、カーボンナノチューブだという夢のある話である。この新技術の核となるのが、近赤外発光（蛍光）である。カーボンナノチューブでは、1次元エキシトンによる極めてバンド幅の狭い蛍光が近赤外に観測される。通常は光励起で観測するが、宮内先生は高温にして熱的にエキシトンを励起しても同様に蛍光が観測される

事を見いだしたのである。これは、熱エネルギーを単一波長の光源に変換することができることを意味する。紫外から赤外までブロードな放射スペクトルを持つ太陽光を、一旦ナノチューブに集光して加熱する事により、ナノチューブ固有の単一波長の光に変換できるというのである。ナノチューブ発光波長は、その構造で調整できるので、太陽電池のバンドギャップに合わせることが可能で、その場合、既存のシステムでは不可能

な高効率太陽光発電が可能になるという提案である。これは凄い！ナノチューブの応用に、このようなスケールの大きな発想があるとは、大いに感銘を受けた。

詳しくは、Nat. Comm. **9**, p. 3144 (2018) (DOI: 10.1038/s41467-018-05598-3)を参照されたい。



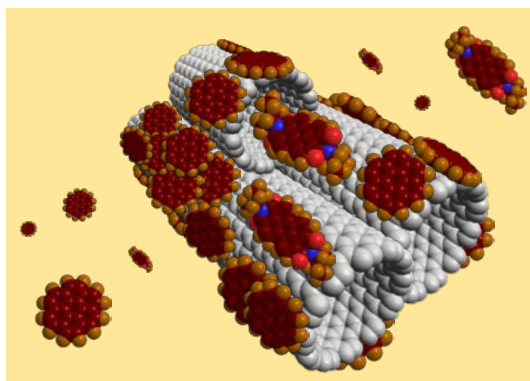
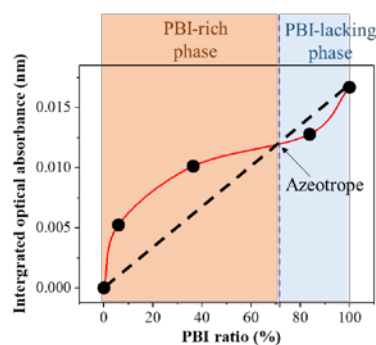
カーボンナノチューブによる太陽光のスペクトル変換を用いた高効率太陽電池（片浦画）

このスケール感に比べるとくすんでしまうのだが、蔵王では私のところの Wang 君も発表した。内容はナノチューブへの分子内包である。分子内包自体はずいぶん古いネタで、単にナノチューブに分子を入れただけでは全く新規性は無い。しかし、ナノチューブの電子デバイス応用に不可欠な、大気中で不安定な n 型ドーパントによるキャリア制御の場合、大気を遮断できる分子内包によるキャリア注入は悪くない手法である。ただし、この手法でキャリア密度を精密に制御するのは容易ではなかった。そこで、ひらめいたのがダミー分子の添加である。化学ドーパントに寄与しない中性の分子（ダミー）をドーパント分子と混ぜて内包させることで、ドーパント量を正確に制御しようと試みた。実際には、有機溶媒に 2 種類の分子を溶かして、環流法で内包させた。その結果、ドーパント分子とダミー分子の比率を変える事で、ドーパント分子の内包量を制御する事に成功した。

しかし、ここで一つ不思議なことがわかった。ドーパント量は分子の混合比に比例せず、大きく S 字型に曲がるのだ。この結果を発表したところ、丸山先生からご指摘があった。「そのカーブ、良く見る関係ですよねえ？（もちろん英語でだが）」え、そうなの？というわけで、それからポスドクが慌てて調べたところ、2 液系の共沸現象の蒸気圧カーブに酷似している事がわかった。混合液を熱すると片方だけ多く蒸発する、要するに蒸留である。環流法では、溶質の沸点までは昇温しないので共沸？という感じであるが、ドーパント分子とダミー分子が気化する先がナノチューブの中の 1 次元空間と考えると、ありそうな話である。ただし、このような現象が観測されるためには、ドーパントとダミー分子が高密度の凝集状態で相互作用しなければならない。

つまり、両分子は、希薄な溶液中から

ナノチューブに直接侵入するのではなく、一旦ナノチューブ表面に凝集してから、ナノチューブ表面に沿って移動して開放端から内包されるというプロセスを踏むことを示唆しているのである。共沸現象の S 字カーブは、分子間の相互作用が引力か斥力かで逆転する。今回の結果は斥力を示しているのだが、この手法を使うと、他の

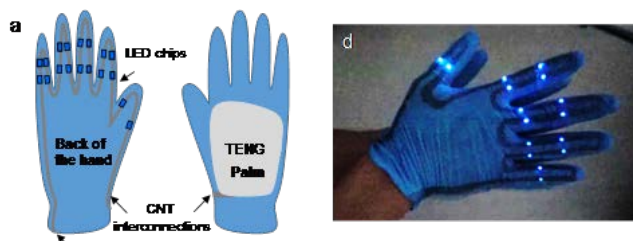


混合比とドーパント量の関係（上図）とドーパント分子（PBI）とダミー（コロネン）のナノチューブへの内包行程の模式図（下図）

G. Wang *et al.*, Appl. Phys. Express, **23** (2020) 065003

分子の分子間の相互作用を調べる事も可能かも知れない。おかげでちょっと面白い仕事になった。

野地温泉で開催した第二回ナノカーボン研究会では、名大の大野先生から新しい発電技術の話題提供があった。大野先生の CREST 事業では、ナノチューブ薄膜に水滴を落として発電する素子の開発を行っていたが、その派生技術で、ナノチューブ薄膜を叩いて発電する



叩くと光る手袋:

M. Matsunaga et al., *Nano Energy* **67**, 104297 (2020)

技術である。水滴発電は、その発電機構そのものが新しい技術であったが、叩いて発電する技術は摩擦エネルギーを利用しており、その原理自体は新しいものではない。しかし、実際にナノチューブ薄膜をシリコンゴムシートで挟み込む構造を構築すると、驚くほど発電し、 $13.4 \text{ W/m}^2$ を達成した。例えばこのシートをゴム手袋に仕込む事により、拍手すると LED がピカピカ光る手袋ができあがる。これは面白い。おもちゃやイベントグッズとして採用される可能性もあり、ナノチューブ応用の起爆剤になる可能性もある。実際、この叩くと光る手袋はインパクトが大きかった様で、単なるニュースでは無く、全国ネットのテレビ番組の一枠を使って紹介された。私も録画したのだが、運悪く HDD が故障して消えてしまった。大野研究室の松永助教を紹介する形で放送されたが、ずいぶん格好良く写っていて驚いた。いや、あれが真実の姿かも知れない。

丸山先生からは、カーボンナノチューブの上に衣を着せるように BN 層や  $\text{MoS}_2$  層など、2 次元層状物質を成長させた、ヘテロ構造の合成と物性の話題が提供された。これはまさに、カーボンナノチューブと原子層物質の研究の融合成果である。最新の電子顕微鏡技術により、一層一層、組成を詳細に分析されており、その構造の動かぬ証拠が提供されている。そしてその成果は、ついに *Science* に掲載された。丸山先生がこの構造を初めて発表されてから、ずいぶん時間が経ったと認識している。さすがに論文の内容は盛りだくさんで、著者の顔ぶれを見ると、オールスターキャストである。やはり、このような画期的な成果を一流ジャーナルに発表するのは大変だったのだろうと、想像される。興味のある方は、R. Xiang et al., *Science* **367**, 537 (2020), DOI: 10.1126/science.aaz2570 を参照されたい。

### 3. 2019 年度 活動報告

2019 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 回開催となった。毎年代わり映えしないので、毎年少しは新しい試みをと



考えているのだが、なかなか難しい。さて夏の蔵王の研究会は、“Further leaps in nanocarbon and atomic layered materials research” というタイトルで開催した。これは、本年度の研究進展から、私が盛り上がっていたため、少し気合いの入ったタイトルである。京都大学から宮内先生をご招待した。会場は、昨年度いつもの宿泊施設が満室だったため姉妹店を利用したところ、そこで開催したバーベキューが非常に好評だったことから、今年度も昨年度と同じ宿泊施設を利用し、待望のバーベキューを開催した。齋藤先生による一層入念な準備により、非常に豪華なバーベキューパーティーとなり、参加者全員、大いに盛り上がったのだが、予期しない出来事は起こるものである。なんと今年度は、ブヨが猛威を振るった。そもそも尋常で無い猛暑だったのだが、そのせいなのかブヨが例年よりも多かった様で、多くの参加者がブヨの餌食になってしまった。中には帰宅後ひどく発熱した参加者もいたようである。ネット情報によれば、5カ所以上かまれると死に至る事もあると言うことで、ブヨは注意が必要だ。私も少しかまれたが、たいした事にならなかった。私はブヨには強いようだ。さて、肝心の研究会であるが、これも猛暑のため、エアコンを全開でかけても部屋が暑く、もはや熱中症か脱水症状かというサバイバルゲームの様相であ



蔵王 19 研究会：猛暑の中の研究発表（左）、気づかぬうちにブヨに襲われたバーベキュー（右）

ったが、さすがに若手のメンバー主体の研究会のため、皆さん思いのほか元気で、活発な議論が交わされた。なお、例年通り若手中心の英語によるオーラル発表形式で、若手参加者の旅費は各メンバーの予算から出していただいている。発表件数は26件、このうち若手は17件であった。発表内容は、ナノカーボン関係が7件、原子層関係が9件、ナノカーボンと原子層の複合材料が3件、その他が7件であった。やはり、新たな材料の魅力は大きいようだ。特に、複合材料が徐々に増えており、新たな構造の構築が今後期待される。

冬の第二回ナノカーボン研究会も、例年通り福島野地温泉で開催した。テーマ



は「思い通りにならない事／思った以上にうまく行った事」とした。これはまさに冒頭に書いたとおり、なかなか論文がうまく通らない私自身を振り返ってのタイトルだ。しかし、このタイトル良く読むと、どちらにしても思い描いた通りにはなっていない事に気がついた。まあ、(研究) 人生とはそういうものだ。さて、開催時期が2月であったため、中国ではすでに新型コロナウイルスが大騒ぎになっていた時期であったが、日本国内ではまだ大きな問題にはなっていなかったため、通常通りの開催が可能であった。参加者は9名のメンバーであった。参加者がやや少ない方が、議論の時間が十分とれて私としては好ましいと考えているのだが、ATIとしては、より多くのメンバーが参集することを望んでいるのかも知れない。もちろん、最大限努力して日程調整しているのだが、最近の大学の先生は忙しい様で、日程調整は毎年悩ましい。この研究会は、完全クローズドで開催されるため、ほとんどのメンバーが未発表の最新データを披露してくれる。参加者はお互いに刺激されて、議論も白熱し、会議の開催意義は非常に高いのだが、毎年報告書作成に困ってしまう。ほとんど公開できないためである。本年度も、例えば湯田坂先生からナノチューブを用いた細胞観察などの最新データが示され、大いに盛り上がったのだが、これも報告できない。謎めいたメッセージを残すとすれば、「いちど壊した方が綺麗になる」である。これは議論が白熱した。公開されるのを楽しみに待っているところだ。研究会後の懇親会では、新型コロナウイルスの話もずいぶん話題に上った。そのときは、これほど大きな問題になるとは思っていなかったが。2020年度の研究会の予定を立てなければならないのだが、今後コロナ感染がどうなるか予想が難しく、いまのところ予定が立っていない。



第二回ナノカーボン研究会@野地温泉：理事長のお隣は…

## 研究会開催記録

【第1回】2019年8月8日(木)－9日(金) 山形県山形市蔵王温泉

8月8日(木)

Invited talk:

1. Multiscale hydrophobic interactions in SWCNT-Gel-Surfactant system  
Hiromichi Kataura, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology
2. Paradoxes in nano-devices  
Riichiro Saito, Tohoku University
3. Topological phases in graphene nanoribbons  
Mari Ohfuchi, Fujitsu Laboratories Ltd.
4. Two-dimensional materials and their heterostructures  
Ryo Kitaura, Nagoya University
5. Thermal-optical and mechanical properties of structure-defined carbon nanotubes  
Yuhei Miyauchi, Kyoto University

Contributed talk:

6. Edge plasmon in rectangular antenna  
Maruoka Masato, Tohoku University
7. First order resonant Raman spectra of TaP  
Pang Xiaoqi, Tohoku University
8. Why does helicity of a phonon mode change in Raman Spectroscopy of MoS<sub>2</sub>  
Wang tong, Tohoku University
9. Preparation and transport properties of superconducting NbSe<sub>2</sub> Films  
Chisato Ando, Tokyo Metropolitan University
10. Circular-polarized luminescence from monolayer semiconductor heterojunction  
Naoki Wada, Tokyo Metropolitan University
11. Theoretical study on circularly polarized light absorption in triptycene molecular membrane  
Masashi Akita, Kwansei Gakuin University
12. Restoring intrinsic optical properties of CVD-grown MoS<sub>2</sub> monolayers and their heterostructures  
Kana Kojima, Tokyo Metropolitan University

13. The Hall conductivity and the circular dichroism

Pratama Fenda Rizky, Tohoku University

14. Enhancement of electric field by surface plasmon on hollow cylinder

Tian Yuan, Tohoku University

8月9日(金)

Invited talk:

15. One dimensional van der Waals hetero-nanotubes based on single-walled carbon nanotubes

Shigeo Maruyama, Tokyo University

16. First-principles electronic-structure study of doped atomic layers

Susumu Saito, Tokyo Institute of Technology

17. MoS<sub>2</sub> growth at metal-insulator interface

Yasumitsu Miyata, Tokyo Metropolitan University

18. Application of single-wall carbon nanotubes for biological electrodes

Takeshi Tanaka, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

19. Manipulating Fluid Behavior for Material Assembly and Crystallization

Yan Li, Tokyo University

Contributed talk:

20. Polymer as an electrode of sodium-ion battery

Nguyen Tuan Hung, Tohoku University

21. Edge plasmon in graphene ribbon

Muhammad Shoufie Ukhtary, Tohoku University

22. Synthesis of 1D Transition Metal Chalcogenides

Yusuke Nakanishi, Tokyo Metropolitan University

23. Controlled Encapsulating Donor and Acceptor Molecules for the Carrier Density Control of SWCNTs

Guowei Wang, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

24. Optical characterization of BN-wrapped single-walled carbon nanotubes

Feng Ya, Tokyo University

25. Dimensional Crossover of Topological Edge States in Su-Schrieffer-Heeger Model

Daichi Obana, Kwansei Gakuin University

26. STM visualization of carbon impurities in sandwich structures consisting of hexagonal boron nitride and graphene

Taishi Haga, Tokyo Institute of Technology

参加者 27 名（会員 9 名、外部 18 名）

【第 2 回】2020 年 2 月 14 日（金）－15 日（土） 福島県福島市野地温泉

テーマ：「思い通りにならない事／思った以上にうまく行った事」

1. 「マルチスケール疎水性相互作用の詳細」

産総研 ナノ材料研究部門

片浦 弘道

2. 「2 次元物質における 3 回回転対称性と並進対称性」

東北大学理学研究科

齋藤 理一郎

3. 「グラフェン／多結晶 Ni 基板界面への Au のインターカレーションの計測」

東京理科大学 理学部

本間 芳和

4. 「ホタルの発光酵素を用いたカーボンナノチューブの近赤外発光」

産総研 ナノ材料研究部門

田中 丈士

5. 「褐色脂肪組織のコラーゲンネットワークの迅速な秩序化」

産総研 ナノ材料研究部門

湯田坂 雅子

6. 「一次元カルコゲナイドの成長と評価」

首都大学東京 物理学教室

宮田 耕充

7. 「欠陥のある場合のカーボンナノチューブと分子の相互作用の第一原理計算」

富士通研究所

大淵 真理

8. 「低次元材料による微小エネルギーの利用と超低消費電力センサシステムの検討」

名古屋大学 未来材料・システム研究所

大野 雄高

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<br>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                      | 特別栄誉教授          |
| 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  | 首都大学東京 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        | 上級主任研究員         |
| 大淵 真理  | (株) 富士通研究所                | シニアマネージャー       |

2020年3月現在

## スピン科学 –新しい展開に向けて–

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

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。2018年4月より本研究会は、委員長の交代と共に新たに4名の会員を加えた体制で再出発した。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。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「スピン科学」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. 2019年度活動の概要

2019年度は、次の3テーマについて研究会を計画し、新型コロナウイルス蔓延のため中止となった第3回を除く2回の研究会を開催した。

- ・第1回（2019年8月22日）「反強磁性スピントロニクスの展開」
- ・第2回（2020年1月21日）「マヨラナ計算」
- ・第3回（中止）「スピンを用いた確率的情報処理と熱力学」

各テーマを牽引する講演者を招き、未発表情報を交えた白熱した意見交換が行われた。反強磁性体はスピントロニクスの機能性新材料として大きな可能性を秘めており、トポロジカル量子計算を実現するマヨラナ計算はスピントロニクスの新しい機能発現の場となりうる。また、確率的情報処理と熱力学は情報処理分野の最もホットな話題となっている。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2回の研究会の概要をまとめる。

- ・第1回：2019年8月22日（木）14:00～17:40 + 意見交換会

会場：御茶ノ水 ATI 会議室

テーマ：「反強磁性スピントロニクスの展開」

スピントロニクスの主要な舞台は、ナノ構造磁性体であり、特に強磁性体がその中心的研究対象であった。近年、これに加え、反強磁性体に新材料としての注目が集まっている。本年度、第1回研究会のテーマは「反強磁性スピントロニクスの展開」とし、その実験と理論的側面に関して3名の講演者から最新成果の紹介がなされた。

#### 講演①「反強磁性体を用いたスピントロニクス操作」

京都大学 化学研究所 森山 貴広先生

森山氏は、はじめに反強磁性体をスピントロニクスに応用する際の利点を概観し、研究の動機付けを以下のようにまとめた。反強磁性体は、磁気的な秩序状態でありながら原子スケールでスピン方向が打ち消しあい、平衡状態で磁化が消失する。このため、その工学的な応用は困難であるという「固定観念」が支配的であった。しかし、スピントロニクスの実験技術が進展することで、その新しい応用の可能性が拓かれつつある。特に、伝導電子のスピンと反強磁性体の局在磁化の相互作用が存在することが、実験的に明らかになった。この成果を糸口として、反強磁性体を用いた超高密度の磁気メモリやテラヘルツデバイスなども考案されている。以上を踏まえ、金属反強磁性体 FeMn や酸化物反強磁性体 NiO 等と電子スピンの相互作用の定量評価、電子スピンの流れを利用した反強磁性磁化方向の制御および反強磁性体を用いたメモリ素子の実証、反強磁性磁気ドメインの磁気線二色性光電子顕微鏡(XMLD-PEEM)による観測、さらに反強磁性体の THz ダイナミクスによるスピンプンピング効果、など最近の研究成果について紹介された。





## 講演②「SPINTRONICS THEORY WITHOUT SPIN CURRENT」

理化学研究所 創発物性科学研究センター 多々良 源先生

多々良氏は、冒頭からこれまでスピントロニクスを理解する上で中心的な概念であったスピン角運動量の流れ「スピン流」の定義に曖昧な点が残ることに大きな不満を感じていることを表明され、研究会の場を大いに盛り上げた。そして、スピン流を直接取り扱わずに、様々なスピン-電荷変換現象を捉える理論的枠組みを提供することを目指す一連の研究成果を紹介された。理論設定としてはランダムなスピン軌道相互作用を含む金属の模型を用い、電場やスピン蓄積といった実際に測定される物理量に対する線形応答理論を構築した。そして、スピンホール効果、逆スピンホール効果、スピンポンピング効果等の典型的なスピン-電荷変換現象における輸送係数の計算結果を提示された。特に、本研究会のテーマである反強磁性体におけるスピン輸送現象に関して詳細な検討結果を紹介し、実験で観測された反強磁性絶縁体を長距離伝搬するスピン輸送は、反強磁性磁化ダイナミクスで生じた強磁性成分の相関関数（帯磁率）によって表されることを示した。質疑応答では、対象となった非一様系の輸送現象に対して、長波長の自由度に着目した流体力学的なアプローチが有効であることが議論された他、活発な情報交換が行われた。



## 講演③「ノンコリニアスピンドイナミクス」

日本原子力研究開発機構 先端基礎研究センター 家田 淳一先生

家田氏は、磁気構造の電氣的制御がスピントロニクス研究を牽引してきた点を踏まえ、未開拓の磁気構造—「ノンコリニア（非共線的）反強磁性磁気構造」—のスピンドイナミクスについて、その研究の意義と数値解析結果について紹介された。従来のコリニア（共線的）磁性材料（強磁性体・フェリ磁性体・反強磁性体）をベースとしたスピントロニクスに新たな展開をもたらし、既存技術における様々な制約要素を克服する試みの一つが、 $\text{Mn}_3\text{Sn}$  等のノンコリニア反強



磁性磁気構造を用いた高効率磁化反転である。スピンホール効果を用いたスピン注入(スピン軌道トルク)によりノンコリニア磁気構造に生じるスピンドYNAMICSを数値計算によって解析し、磁化反転機構の特徴について議論した。また、ノンコリニア反強磁性体を磁気デバイスに応用するための条件として、ノンコリニア磁気構造に対する実効的な磁気異方性制御の重要性を指摘された。



意見交換会にて。

・第2回： 2020年1月21日(火) 14:00～17:40 + 意見交換会

会場：御茶ノ水 ATI 会議室

テーマ：「マヨラナ計算」

意見交換会会場：Terrace 8890 (ワテラストワー コモン 3階)

マヨラナ粒子とは、粒子と反粒子が同一状態のフェルミ粒子であり、ある種の固体物質中の素励起にその存在が見いだされ注目を集めている。さらに、このマヨラナ粒子の性質を利用した量子コンピュータの構成方法が提案され、その実現を目指す試みが進められている。第2回研究会では、マヨラナ量子計算の分野で活躍する3名の外部講演者を招き、研究背景から最新成果までをご紹介いただき意見交換を行った。

講演①「マヨラナ粒子によるトポロジカル量子計算」

大阪大学大学院 基礎工学研究科 藤本 聡先生

藤本氏は、トポロジカル超伝導体やキタエフ・スピン液体で実現するマヨラナ粒子のペアを用いたトポロジカル量子計算の基礎と最近の理論研究成果について紹介された。マヨラナ粒子には、粒子交換に対して非可換であるという性質がある。この非可換統計性により、マヨラナ粒子のペアは空間的に離れていても非局所相関をもち、局所的な乱れや熱揺らぎ等の擾乱に対して強い耐性のある量子ビットとして用いることができる。講演では、量子計算の主要な構成要素「クリフォード量子ゲート」が、このマヨラナ量子ビットに対する組紐操作でどのように実現されるかについて詳しく解説された。さらに、ユニバーサル量子ゲートを構成するために必要な要素や、読み出しを含めた物理的実装方法、その他のトポロジカル量子計算の提案であるマヨラナ表面コードなどについてその基本的アイディアの紹介がなされた。トポロジカル物質そのものは、本スピントロニクス研究会でもこれまでたびたび取り上げられてきた題材であったが、その量子計算への応用に関しては多くのメンバーが初めて触れる内容であったため、講演中から多くの質問が寄せられ、質疑応答も予定を大幅に延長して議論が続けられた。

#### 講演②「トポロジカル量子計算に向けた物質・物性の開拓」

東京工業大学 フロンティア材料研究所 笹川 崇男先生

笹川氏は、トポロジカル量子計算の実現に向けた物質・材料開発の現状について紹介された。まず、最近のブレイクスルーとして、単独の超伝導体Fe(Te, Se)において観測された量子化磁束芯にマヨラナ準粒子が見いだされた点に触れ、このマヨラナ準粒子間の多体効果を解明することの重要性について指摘がなされた。それを踏まえ、最も有望なマヨラナ量子ビットとして $n$ 個のクーパー対+1個の電子という状態に着目した研究戦略を示された。また、具体的にトポロジカル量子計算を実現する物質・材料開発のアプローチとして、異種物質の界面、及び単独物質の表面に発現するトポロジカル状態のそれぞれについて、豊富な実験データを元に紹介がなされた。さらに、Microsoft 社などを含む、量子コンピュータの国際開発競争の現状についても解説がなされた。

#### 講演③「半導体ナノ細線を用いたマヨラナ粒子実現の試みと展望」

理化学研究所 創発物性科学研究センター 松尾 貞茂先生

松尾氏は、はじめにマヨラナ粒子の兆候が実験的に初めて観測された単一半導体ナノ細線と超伝導体の接合系の研究動向について紹介された。その実現には、強磁場とフェルミエネルギーの制御が必要とされるが、この二つの条件を満たすのは実験的な困難を伴うことに加え、強磁場の影響でマヨラナ粒子の利点であるトポロジカル保護の性質が失われる懸念がある。これを回避するアイディアとして、無磁場下でのマヨラナ粒子を実現する「超伝導体と二重ナノ細線の接合」に関する実験結果の紹介がなされた。二重ナノ細線の超伝導接合では、磁場に代わって高効率のクーパー対分離が必要となるが、Y型接合デバイスを用いて量子ドットを介した分離現象の実証と、ジョセフソン接合デバイスにおいて二つの1次元電子系への分離現象の観測結果が示された。これらの結果に加えて、半導体ナノ細線と超伝導体の接合で実現されたマヨラ

ナ粒子を用いて、量子計算に必要な非可換統計性がどのように実証されるかについても議論がおこなわれた。



第2回研究会参加者と伊達理事長。

・第3回：（中止）

テーマ：「スピンを用いた確率的情報処理と熱力学」

確率的情報処理と熱力学の関わりは情報処理分野のホットな話題である。第3回は滞在型の研究会として、「スピンを用いた確率的情報処理と熱力学」に関わる研究でそれぞれ著名な業績を上げている講演者3名の登壇を予定していたが、新型コロナウイルスに関わる事態の悪化に鑑み開催中止となった。本テーマに関しては、機を見て再度企画を行いたい。

### 3. 2020年度活動の構想

2019年度に開催できなかった研究テーマ「スピンを用いた確率的情報処理と熱力学」の研究会を、再調整して開催する。その他、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】2019年8月22日(木) 御茶ノ水

テーマ：「反強磁性スピントロニクスの開拓」

1. 「反強磁性体を用いたスピントロニクス操作」

京都大学 化学研究所

森山 貴広※

2. 「SPINTRONICS THEORY WITHOUT SPIN CURRENT」

理化学研究所 創発物性科学研究センター

多々良 源

3. 「ノンコリニアスピンドYNAMICS」

日本原子力研究開発機構 先端基礎研究センター

家田 淳一

参加者 12名 (会員9名、外部3名)

【第2回】2020年1月21日(火) 御茶ノ水

テーマ：「マヨラナ計算」

1. 「マヨラナ粒子によるトポロジカル量子計算」

大阪大学 大学院基礎工学研究科

藤本 聡※

2. 「トポロジカル量子計算に向けた物質・物性の開拓」

東京工業大学 フロンティア材料研究所

笹川 崇男※

3. 「半導体ナノ細線を用いたマヨラナ粒子実現の試みと展望」

理化学研究所 創発物性科学研究センター

松尾 貞茂※

参加者 15名 (会員10名、外部5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<br>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      |

2020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。iBIX が設置されている J-PARC においては 2019 年度に 500KW の出力を維持し、2020 年度には 1MW の運転が視野に入っている。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。

本研究会は、iBIX により科学的意義、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、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。委員は昨年度から全ての方に継続をお願いしている。

## 2. 2019 年度の研究活動の概要

2019 年度は2回の水和ナノ構造研究会開催を予定した。しかしながら、新型コロナの影響により、第2回の研究会は残念ながら延期となっている。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て行っている iBIX 研究会3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。また、水和ナノ構造研究会の委員を中心に生物物理学会の年会にてシンポジウムを企画し、開催に至った。

### 2.1 第1回水和ナノ構造研究会

(2019 年 9 月 9 日 (月) ~10 日 (火)、群馬県利根郡 水上高原ホテル 200)

2019 年度の第一回水和ナノ研究会は群馬県利根郡 水上高原ホテル 200 にて行われた。「ラジカル移動と生体分子ナノ水和構造」というテーマで外部講師3名をお迎えし、開催した。

1 人目の外部講師は、日本原子力研究開発機構の中川洋先生をお迎えし、「タンパク質構造の硬さ・柔らかさと水和水ダイナミクス」というタイトルでご講演頂いた。タンパク質は溶液中で揺らいでおり、そのダイナミクスが生物機能に重要であると考えられている。このように、従来のタンパク質ダイナミクス研究では、構造の柔らかさが強調されてきたが、例えばタンパク質と DNA との相互作用では、タンパク質よりも DNA の方が大きく構造変化し結合することが多い。タンパク質の構造の硬さも機能に関係していると考えられる。硬さ・柔らかさという表現は相対的なものであり、タンパク質構造の硬さ・柔らかさの両側面をバランス良く考えることが必要であると言える。タンパク質の揺らぎ、水和、温度、圧力など周囲の環境の影響を強く受ける。本公演では、中性子非弾性散乱実験や分子シミュレーションの結果から、タンパク質の構造とダイナミクスの関係について、周囲の環境応答という観点から考察した結果をお話しいただいた。中性子回折では水素原子を含むタンパク質の構造を観測することができるが、あくまでも結晶試料に含まれるタンパク質の時間・空間的な平均としての構造であるので、静的な情報でその反応機構を類推することとなるが、実際には常にタンパク質は運動しているので、反応を議論する上でダイナミクスの情報も非常に重要であることがよく理解できるご講演であった。今後、同じ中性子を利用しながらも、静的、および動的なことになる情報を得ることができる中性子回折と非弾性散乱の相補的利用による研究推進が期待される非常に興味深いお話であった。

2 人目の外部講師は佐賀大学農学部の中谷正樹先生をお招きし、「ラジカル SAM 酵素におけるラジカル反応機構 ~自然界はどのようにしてラジカルを安全に利用しているか~」というタイトルで発表いただいた。ラジカル SAM(*S*-アデノシルメチオニン)酵素はヒトを含む高等生物からバクテリアまで全生物が保有していることが知られている自然界最大の酵素スーパーファミリーである。ラジカル SAM 酵素は活性中心に特異な 4Fe-4S クラスターを持ち、反応第一段階で 4Fe-

4S<sup>+</sup>クラスターから 1 電子が SAM へ伝達され、S-C5' 結合の還元的開裂により高反応性 5' - dAdo<sup>•</sup> (5' -デオキシアデノシル) ラジカルが産出すると考えられている。すべてのラジカル SAM 酵素はこの高反応性ラジカルを用いて基質の水素原子引き抜き反応を行い、多様な酵素反応を触媒している。ところが、どのようにしてこのような高反応性ラジカル種を安全に、かつ多種多様な生体内反応に利用しているか明らかになっていない。本講演では、ラジカル SAM 酵素の持つ反応特異性を解き明かすため、ピルビン酸ギ酸リアーゼ活性化 酵素 (PFL-AE) について、基質である SAM と PFL との反応において高速混合凍結 (rfq) 法 による反応中間体の捕捉を試み、さらに捕捉された中間体について電子・核スピン 2 重共鳴 (ENDOR) 法を用いて構造解析を行った結果についてお話しいただいた。その結果は、これまで予想されていなかった Ω 中間体の捕捉に成功し、ENDOR 法より Ω 中間体は 5' -dAdo の C5' と鉄硫黄クラスターが直接共有結合した有機金属反応中間体であると結論付けられるものであり、ラジカル SAM 酵素が高反応性ラジカルをより安全な有機金属反応中間体へ変換することで利用していることを示唆しているものであった。さらに SAM アナログを設計・合成し、rfq 法では捕捉されなかった 5' -dAdo<sup>•</sup> ラジカル反応中間体アナログの捕捉に成功しており、この反応中間体における構造解析からは、5' -dAdo<sup>•</sup> ラジカルが基質より水素原子の引き抜きを行う際、副反応を起こさないために近接した炭素原子とファンデルワールス結合を形成し、適切な位置の水素原子を引き抜いていることまで明らかとなっている。中性子とは異なる手法で、反応中間体の構造を捉えた非常に興味深いご講演であった。ダイナミクスと同様に中性子と相補的な利用を含めた新たな研究の形を考えさせられる内容であった。

3 人目の外部講師として、東京大学・物性研究所の井上圭一先生に講演をお願いした。「光受容型膜タンパク質微生物型ロドプシンの多様な機能メカニズムと内部結水」というタイトルで発表頂いた。海洋や湖沼、河川、土壌などをはじめとする地球上の様々な環境中には、莫大な数の細菌や藻類などの微生物が棲息しているが、近年のゲノム研究の発展により、その多くが細胞内に「微生物型ロドプシン」と呼ばれる光受容型膜タンパク質を持つことが明らかとなってきている。これら微生物型ロドプシンは、我々ヒトを含めた動物の網膜中に存在する「動物型ロドプシン」と極めてよく似た 7 回膜貫通型構造を持ち、さらに同じビタミン A の誘導体であるレチナールを発色団としてタンパク質内部に結合している。そしてレチナールが光を吸収すると、全トランス型から 13 シス型への異性化反応を起こし、細胞内外へ輸送する光駆動型イオンポンプや、電気化学勾配に沿って双方向にイオンを輸送する光ゲート式イオンチャネル、走光性センサーなど非常にバラエティに富んだ生理機能が発現される。本講演では、これまでにこれら微生物型ロドプシンが 7 回膜貫通型構造および発色団レチナールからなる共通構造をもとに、どの様にして多様な生理機能の発現を達成するのか、その分子メカニズムについて、過渡吸収法や赤外分光法などの分光学的手法を用いて行った物理化学的研究、特に新奇分子を含めた微生物型ロドプシンの多様な機能発現メカニズムと、それに関わる内部結水の役割についてご紹介いただき、その結果それぞれの機能を持つロドプシンに特徴的に保存されたアミノ酸とともに、タンパク質内に存在する内部結水が機能の発現に重要な役割を持つことが明らかとなっていることをお示し頂いた。タンパク質における結水の役割の重要性を改めて理解することができる非常に興味深



い研究結果であった。中性子による構造解析には、まだまだハードルの高い分子ではあるが、将来的に中性子源、光学系、検出器の発展により、中性子回折がこれらの物質の研究にも寄与できるようになることが望まれる。

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回研究会の様子

## 2.2 第2回水和ナノ構造研究会（延期）

（2020年3月23日（月）、東京都御茶ノ水トライエッジカンファレンスセンター）

2019年度の第二回水和ナノ東京御茶ノ水トライエッジカンファレンスセンターにて、「プロトン・電子移動と生体分子ナノ水和構造」というテーマで外部講師3名をお迎えしての開催を予定していた。しかしながら、新型コロナCOVID-19の感染が拡大しつつあったため、残念ながら講師及び委員の安全に配慮して延期する事と決定した。現時点では、延期された研究会の日程を再調整するには至っていないが、COVID-19の感染が終息し次第、お願いしていた外部講師の方々と調整し、開催したいと考えている。

## 2.3 共催による研究会

その他、共催で開催された4研究会と水和ナノ構造研究会委員で応募し開催した生物物理学会シンポジウムについて示す。

### 2.3.1 2019年度茨城県 iBIX 研究会:

#### 第1回 iBIX 研究会 2019年6月5日(木)

抗関節リウマチ薬メトトレキサートと新規標的タンパク質の複合体結晶構造解析

松村 洋寿 (秋田大学大学院理工学研究科)

XFEL と中性子ビームを用いたニトリルヒドラーゼ触媒反応の遷移状態構造の解明

尾高 雅文 (秋田大学大学院理工学研究科)

#### 第2回 iBIX 研究会 2019年12月4日(水)

銅含有亜硝酸還元酵素の反応機構解明に向けた高分解能中性子線結晶構造解析

福田 庸太 (大阪大学薬学研究科)

#### 第3回 iBIX 研究会 2020年2月26日(水)

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

立岡 美夏子 (国立研究開発法人海洋研究開発機構)

### 2.3.2 2019年度 iBIX-JAXA-KEK 物構研-QST 合同研究会

2019年10月30日(水) 13:00-17:00 エッサム神田ホール1号館401号室

「きぼう」利用した高品位タンパク質結晶化とオーファンドラッグの分子設計への応用

有竹 浩介 (第一薬科大学)

クライオEM構造解析の長所と限界

守屋 俊夫 (KEK 物構研)

「高速分子動画法」-自由電子レーザーを用いたX線結晶構造解析-

岩田 想 (京都大学)

中性子結晶構造解析の長所と限界

今野 美智子 (茨城県)

X線・中性子散乱による構造・揺らぎ解析の長所と限界

松尾 龍人 (QST)

イオンポンプの構造生物学: 脂質二重膜からプロトンまで

豊島 近 (東京大学)

### 2.3.3 日本生物物理学会年会 シンポジウム

「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」

2019年9月24日(火) 13:40~16:20 宮崎県、シーガイアコンベンションセンター

オーガナイザー: 田中伊知朗 (茨城大学)、石北央 (東京大学)

単結晶中性子回折計 iBIX の現状と将来展望

日下 勝弘 (茨城大学)

中性子結晶構造解析で明らかになるセルラーゼの加水分解メカニズム

五十嵐 圭日子 (東京大学)

フェレドキシン依存性ビリルジン還元酵素の機能と基質のプロトン化状態

海野 昌喜 (茨城大学)

創薬標的タンパク質の中性子結晶構造解析

横山 武司 (富山大学)

Liquid properties and chemical reactions in 100 nm nanochannels

Kazuma Mawatari (Univ. Tokyo)

光合成水分解反応におけるプロトンおよび水分子の赤外分光検出

野口 巧 (名古屋大学)

## 研究会開催記録

【第1回】2019年9月9日(月)－10日(火) 群馬県みなかみ町

テーマ：「ラジカル移動と生体分子ナノ水和構造」

9月9日(月)

1. 「タンパク質構造の硬さ・柔らかさと水和水ダイナミクス」

日本原子力研究開発機構

中川 洋※

2. 「ラジカル SAM 酵素におけるラジカル反応機構

～自然界はどのようにしてラジカルを安全に利用しているか～」

佐賀大学 農学部

堀谷 正樹※

9月10日(火)

1. 「光受容型膜タンパク質微生物型ロドプシンの多様な機能メカニズムと内部結合水」

東京大学 物性研究所

井上 圭一※

参加者 15 名（会員 11 名、外部 4 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<br>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<br>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                | 准教授           |

2020年3月現在

## 2019 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 教授

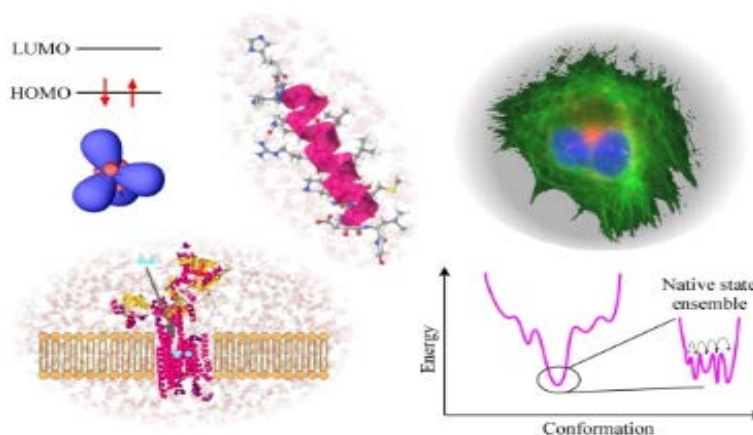
### 1. 研究構想

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. 2019 年度活動の概要

バイオ単分子研究会では、2019 年度に新たに田口英樹先生（東京工業大学・科学技術創成研究院）に委員に加わって頂いた。2019 年度は、研究会を 2 回開催したほか、2018 年度に引き続き「環境」に焦点を当てた大型研究費への申請についても検討を行った。

### 2.1 2019 年度第 1 回バイオ単分子研究会（2019 年 9 月 13～14 日）

2019 年度第 1 回バイオ単分子研究会は、新たに委員に加わった田口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、田口委員からの提案に基づき「知られざるタンパク質の世界」とした。田口委員は、科研費新学術領域研究「新生鎖の生物学」（2014～2018 年度）の領域代表を務められた。研究会は、この新学術領域研究に深く関連した内容であった。講演は、田口委員に人選を依頼し、田口委員の他、斉尾智英先生（北海道大学大学院・理学研究院）、稲葉謙次先生（東北大学・多元物質科学研究所）、田中元雅先生（理化学研究所・脳神経科学研究センター）に行って頂いた。いずれも、田口委員が領域代表を務めた新学術領域研究に参加した研究者である。

また、研究会の翌日は、バイオ単分子研究会が中心となって検討を進めている大型研究費への申請に関する議論を行った。このため、前日の研究会には、大型研究費への申請に関する議論に加わるバイオ単分子研究会の委員以外の研究者も複数参加した。

参加者が従来の研究会と比べ多かったこともあり、研究会の会場は東京近郊とし、クロス・ウェーブ幕張を選んだ。なお会場は、ATI に全面出資するセイコーインスツル(株)の本社のほど近くであった。また、翌日の大型研究費への申請に関する議論は、ATI で開催した。

#### 2.1.1 知られざるタンパク質の世界に関する研究会

田口委員が領域代表を務める科研費新学術領域研究「新生鎖の生物学」は、2001～2007 年度に吉田賢右先生が代表となり行われた科研費特定領域研究「タンパク質の一生」の流れを汲む研究である。この特定領域研究に参加した永田和宏先生が著された「タンパク質の一生 一生命活動の舞台裏」（岩波新書）に研究の全体像が分かり易く記されている。タンパク質の一生には、誕生、成長、輸送、輪廻転生（死）、品質管理（その破綻としての病態）などの様々な過程がある。これら各過程に関わる発表が行われた。

1 人目の発表は、田口委員が「非典型的な翻訳動態から拓がるタンパク質の世界」という演題で行った。田口委員は、バイオ単分子研究会の大島委員が東工大の教授であったときに、大島研に大学院生として在籍（1989～1993 年度）していたとのこ

とである。大島研で、当時助教授だった吉田賢右先生とともに、タンパク質の一生に深く関わるシャペロンに関する研究を始め、以来 30 年間にわたり、この分野の研究を牽引している。

タンパク質は、DNA の遺伝情報にもとづいて mRNA 上に転写された読み枠（ORF: Open Reading Frame）がリボソームで翻訳されて新生ポリペプチド鎖（新生鎖）が合成される。タンパク質の誕生段階である翻訳伸張における新たな動態が、田口委員らの研究で明らかになってきた。大腸菌の 1000 種類以上の遺伝子を調べたところ、80%以上の遺伝子では翻訳途上で一時停止することが見出された。新生鎖の中には自らを翻訳しているリボソームを不安定化させて、翻訳を途中終了する場合があること、またその途中終了のしくみを細胞内の環境モニターに使っている例も見出された。さらには、不連続な二つの ORF から一本のポリペプチド鎖が翻訳される翻訳バイパス現象が発見されたことが紹介された。

2 人目の発表は、斉尾先生が「立体構造とダイナミクスから明らかにする分子シャペロンの機能とメカニズム」という演題で行った。タンパク質の成長や輸送の過程において、シャペロンは変性状態の新生鎖と相互作用し複合体を形成するが、このような複合体の立体構造解析は、従来手法では極めて困難であった。斉尾先生らは、メチル基選択的標識などを用いることにより、従来の溶液 NMR では適用外であった高分子量のシャペロンの動的複合体解析を可能にした。弱く折りたたみを促進するトリガーファクター(TF) および強力に折りたたみを阻害する SecB という 2 種類のシャペロンを対象とした研究の結果、シャペロンは半特異的認識によって多様な配列の基質タンパク質を認識することや、シャペロンの活性がシャペロンー基質タンパク質間の結合・解離速度と基質タンパク質のフォールディング速度のバランスによって規定されることが見出されたことなどが紹介された。さらに、アミノ酸組成が数種類に偏った低複雑性ドメインによって形成される液ー液相分離の制御についての最新の研究についても紹介された。

3 人目の発表は、稲葉先生が「構造生物学が明らかにする細胞内タンパク質品質管理機構」という演題で行った。小胞体内に構造異常タンパク質が蓄積すると小胞体ストレスを引き起こし、神経変性疾患や糖尿病などの疾病の原因となることが知られている。そこで、哺乳動物細胞の小胞体にはタンパク質の品質を厳密に管理するため、ジスルフィド結合の形成・異性化・開裂を触媒する酵素群として 20 種類以上もの Protein Disulfide Isomerase (PDI) ファミリータンパク質及び数種類の PDI 酸化酵素が存在し、それらが効率的なジスルフィド結合形成のためのネットワークを形成している。基質の酸化的フォールディングの触媒過程における PDI の構造ダイナミクスの高速原子間力顕微鏡による観察や、小胞体中で生じたミスフォールドタンパク質中の誤ったジスルフィド結合を還元し、その分解を促進する PDI family 酵素 ERdj5 の作用機序に関する研究などが紹介された。



4人目の発表は、田中先生が「タンパク質の異常凝集に着目した精神・神経変性疾患の病態解明」という演題で行った。プリオンは、タンパク質からなる感染性因子であり、タンパク質の異常型立体構造が正常型を自己触媒的に構造変換させて伝播する。プリオンの異常型立体構造は、線維状の凝集体であるアミロイドを生じる。アミロイドは組織に蓄積しやすく、狂牛病やクロイツフェルト・ヤコブ病などのプリオン病の原因ともなる。異種間での感染はまれであり「種の壁」として知られている。稀に起こるプリオンの異種間感染においては、アミノ酸配列が異なるタンパク質どうしであっても、ある程度の特異性をもって両者が共凝集（クロスシーディング）することがある。遠縁酵母種由来の Sup35 プリオンタンパク質を用いた NMR や MD 等による、異種間でのプリオン感染に関わる研究が紹介された。

## 2.2 2019 年度第 2 回バイオ単分子研究会（2019 年 11 月 24～25 日）

2019 年度第 2 回バイオ単分子研究会は、西野が座長を務め、「ナノバイオ研究の進展」をテーマに開催した。ATI の主な事業には、研究会と研究助成があるが、これらの相互の関係を深める試みとして、講演者のうち 3 名は、近年 ATI の研究助成に採択された若手の研究者の中から、西野がこれらと思う方々を選んだ。ご講演頂いた 3 名は、安井隆雄先生（名古屋大学大学院・工学研究科、2019 年度 ATI 研究助成採択）、西村勇哉先生（神戸大学大学院・科学技術イノベーション研究科、2016 年度 ATI 研究助成採択）、寺尾京平先生（香川大学・創造工学部、2015 年度 ATI 研究助成採択）である。また、シニアな研究者から、科研費新学術領域研究「新光合成：光エネルギー変換システムの再最適化」（2016～2020 年度）の領域代表を務められている皆川純先生（基礎生物学研究所）にご講演頂いた。

ATI 研究会第 8～9 期のバイオ単分子研究会では、第 6～7 期の研究会を踏襲して、1 日目は温泉地等での合宿形式での密な議論を行い、2 日目は見学・視察などを行う活動を継続している。第 2 回研究会では、2 日目に国立天文台・野辺山宇宙電波観測所を見学した。これに合わせ、1 日目の研究会は、Royal Hotel 八ヶ岳にて行った。

### 2.2.1 ナノバイオ研究の進展に関する研究会

1 人目の発表は、安井先生が「ナノ空間制御と尿中 microRNA の網羅的解析」という演題で行った。細胞外小胞の一つであるエクソソームは、内包する microRNA を介して細胞間の情報伝達に使われている。がんの転移、再発などとも関連し、近年注目を集めている。安井先生は、尿 1 mL からがん関連 microRNA を抽出し、非侵襲的にがんを検知する手法の開発を進めている。尿中 (pH=6-8) で表面が正に帯電しているナノワイヤが、負に帯電している microRNA とその関連物質を静電相互作用により高効率に回収可能であることを見出した。従来は尿中から 300 種類しか検出できなかった microRNA を、この新たな技術により 1300 種類以上検出できることを実証し

た。また、ナノワイヤを用いてがん患者の尿解析を行い、肺・肝臓・膀胱・前立腺・膵がん患者で特異的に発現している microRNA を同定することにも成功し、採血よりも低侵襲である尿 1 mL から 5 種類のがん検知が実現可能であることも実証した。安井先生は、これら研究で令和 2 年度科学技術分野の文部科学大臣表彰若手科学者賞を受賞された。

2 人目の発表は、西村先生が「ナノ粒子と X 線の併用による放射線増感治療の開発」という演題で行った。ポリアクリル酸で修飾した過酸化チタンナノ粒子 (PAATiOx) を放射線増感剤として用いた。がんの放射線治療について紹介された。放射線増感剤をがん組織に投与もしくは集積させることができれば、放射線が周囲の組織に与える影響を軽減させ、低線量な治療を可能にする。二酸化チタンに過酸化水素を反応させると、過酸化水素が吸着し、粒子表面に活性酸素種が安定に存在する。この効果を利用して、マウスの担癌腫瘍に局所投与した粒子と X 線照射の併用治療によって抗腫瘍効果を確認した。また、薬剤を封入したリポソーム (LP) の表面に B 型肝炎ウイルスの表面抗原 L タンパク質から成るバイオナノカプセル (BNC) を融合することで、複合粒子 (BNC/LP) を形成させ、標的のがん細胞に特異的に薬剤を送達させることに成功した。

3 人目の発表は、寺尾先生が「微細構造デバイスを利用した単一細胞・単一分子操作」という演題で行った。半導体微細加工技術で作製した数 10 nm から数 100  $\mu\text{m}$  サイズの微小な機械構造物を用いて、1 細胞あるいは 1 分子を顕微鏡下で液中操作する技術について紹介された。具体的には、マイクロ流体デバイスにより制御された流体運動環境下で 1 細胞を微細構造にトラップし細胞動態をイメージングする技術を開発し、この技術を、微小血管狭窄を模倣した血管モデルによる血中がん細胞の動態解析や、膵  $\beta$  細胞の薬剤応答と極性誘導や、細胞クラスター内における薬剤応答の伝搬計測に応用した研究が紹介された。また、光ピンセットで駆動された微小構造物を用いて、顕微鏡下で DNA 1 分子を非侵襲に操作 (展開・収納・移動) する技術と、DNA を特定位置で切断加工する技術について紹介された。寺尾先生は、これら研究で平成 30 年度科学技術分野の文部科学大臣表彰若手科学者賞を受賞された。

4 人目の発表は、皆川先生が「環境の中で姿を変える光合成」という演題で行った。光合成は、光エネルギーを使って電子を流し、プロトンをつめて ATP を作り、 $\text{CO}_2$  を取り込んで炭水化物を作る反応である。光合成器官は反応に光エネルギーを必要とする一方で、利用しきれないほど強い光エネルギー



(図 2) 研究会の様子 (Royal Hotel 八ヶ岳)

を受けた場合には光化学系に傷害（光障害）が起きないように、qE クエンチングなどの防御機構が備えられている。講演では、皆川先生らが単細胞緑藻クラミドモナスを用いて行われた qE クエンチングに関する研究が紹介された。まず、緑藻がいかに関与しているのかについて、新たに解明された qE クエンチングを引き起こすタンパク質 LHCSR の発現誘導機構をもとに紹介された。また、分子量 166 万の光化学系 II-集光装置超複合体 C2S2M2L2 の立体構造をクライオ電子顕微鏡で決定した研究が紹介された。皆川先生は、自然科学研究機構アストロバイオロジーセンター（ABC）の運営委員でもあり、翌日見学する野辺山宇宙電波観測所とも関連した、アストロバイオロジーに関しても短く触れて頂いた。系外惑星に光合成生物が存在すると、青色から赤色までの可視光を吸収し、光合成に利用されない近赤外線を反射するため、惑星からの反射光スペクトルの波長 700 nm 辺りに「レッドエッジ」と呼ばれる構造が現れることが予想されている。このレッドエッジが唯一の強力なバイオマーカー（生物存在の証拠）となることが紹介された。

### 2.2.2 国立天文台・野辺山宇宙電波観測所の見学

研究会の翌日は、国立天文台・野辺山宇宙電波観測所を見学した。元所長で国立天文台名誉教授の井上允先生にご案内頂いた。1982 年に開所した歴史ある観測所で、45 m 電波望遠鏡（図 3）が主要装置である。開所当時、西野は中学生で、科学雑誌でよく観測所の記事を読み、一度は訪れたいと思っていた。45 m 電波望遠鏡は宇宙からのミリ波を捉え、新たな星間分子の発見や世界初となるブラックホ



（図 3）国立天文台・野辺山宇宙電波観測所の見学の際の集合写真。背景に見えるのは、45 m 電波望遠鏡。

ールの証拠（高速回転するガスの円盤）の発見など重要な成果を出してきた。ミリ波観測は、大気中の水蒸気の少ない 12~5 月頃とのことで、見学時は観測開始に向けた最終調整中だった。45 m 電波望遠鏡やミリ波干渉計のパラボラが高大な敷地に並ぶ眺めは壮観だった。開所から 38 年を経て現在は深刻な財政難に陥っているとの報道もあり、年月の経ったことを感じる。

見学後に井上先生を交えたディスカッションを、望遠鏡に隣接する観測室で、電

波を出さぬよう携帯電話の電源を切って行った。皆川先生より、物理学者は地球外生命の存在を楽観的に考えている人が多い一方で、生物学者は悲観的な人が多いという話題が挙がった。見学の参加者でも、同様の傾向がみられた。研究分野の違いに依る、考え方の違いを興味深く感じた。

### 3. 2020 年度活動の構想

ATI 研究会第 9 期の最終年度に当たる 2020 年度は、近年発展目覚ましい機械学習等の情報科学とバイオ単分子研究との融合についての研究会を検討している。また、西野が委員長を務めた第 8～9 期を総括して、これまでの研究会での議論が契機となり広がった共同研究などについても委員の方々と話し合いたい。一方で、今後の新型コロナウイルスの推移を注視していく必要があり、研究会の実施の可否を含め検討していきたい。

## 研究会開催記録

【第1回】2019年9月13日(金) 千葉市美浜区

テーマ：「知られざるタンパク質の世界」

1. 「非典型的な翻訳動態から拓がるタンパク質の世界」

東京工業大学 科学技術創成研究院

田口 英樹

2. 「立体構造とダイナミクスから明らかにする分子シャペロンの機能とメカニズム」

北海道大学 大学院理学院

斉尾 智英<sup>※</sup>

3. 「構造生物学が明らかにする細胞内タンパク質品質管理機構」

東北大学 多元物質科学研究所

稲葉 謙次<sup>※</sup>

4. 「タンパク質の異常凝集に着目した精神・神経変性疾患の病態解明」

理化学研究所 脳神経科学研究センター

田中 元雅<sup>※</sup>

参加者 16名（会員11名、外部5名）

【第2回】2019年11月24日(日)－25日(月) 山梨県北杜市

テーマ：「ナノバイオ研究の進展」

1. 「ナノ空間制御と尿中microRNAの網羅的解析」

名古屋大学 大学院工学研究科、JST さきがけ

安井 隆雄<sup>※</sup>

2. 「ナノ粒子とX線の併用による放射線増感治療の開発」

神戸大学 大学院科学技術イノベーション研究科

西村 勇哉<sup>※</sup>

3. 「微細構造デバイスを利用した単一細胞・単一分子操作」

香川大学 創造工学部 機械システム工学領域

寺尾 京平<sup>※</sup>

4. 「環境の中で姿を変える光合成」

自然科学研究機構 基礎生物学研究所

皆川 純<sup>※</sup>

11月25日(月) 見学

国立天文台野辺山宇宙電波観測所

参加者 13名（会員8名、外部5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   |
|        |                    | 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      |

2020年3月現在



## ロボティクス技術と触覚・力覚

委員長 都甲 潔

九州大学 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。

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3年間（2018－2020年度）の活動を予定している。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、精密機械設計、理論解析・シミュレーション、神経生理学、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。



図1. ナノメカニクス研究会設置の背景

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。生体の触覚・力覚の知見を集約・整理し、理工学的アプローチで人間の手を超える究極の『手』の機能を実現することにチャレンジする。その際、「ナノ振動」をキーワードとして、生体機構など複数に渡る分野の科学と技術を融合し、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：触覚・力覚について — 味覚と嗅覚と比較して

五感を有するロボットが近未来登場することは当然予測される。視覚や聴覚に関係したセンサは成熟した科学技術である。味覚についても、既に味覚センサが開発され、市場に投入され、全世界で使われている。匂いセンサについても、近年、開発が著しく、既に幾つもの製品が販売されているが、どれも「帯に短し、たすきに長し」状態で使い勝手の良いものはなかった。それは、味覚には 5 つの味質（酸味、苦味、塩味、甘味、うま味）という基本要素があるため、その基本要素に応答するセンサを開発すれば良かったのに対し、嗅覚には基本臭と呼ばれるものがなく、バラの香り、コーヒーの香り、ニラの匂い、石けんの匂い、体臭といった具体に、センサが匂い(臭い、香り)の個々を判定・識別しないといけないことに起因している。つまり、扱う対象が圧倒的に多いのである。しかしながら、昨今の人工知能（AI）の発達で膨大なデータを扱うことが可能となり、AI を活用した匂いセンサも登場しており、5 年以内には信頼性の高い匂いセンサが実用化されることが期待される。



図 2. 味覚センサ（味認識装置 TS-5000Z、インテリジェントセンサーテクノロジー製）

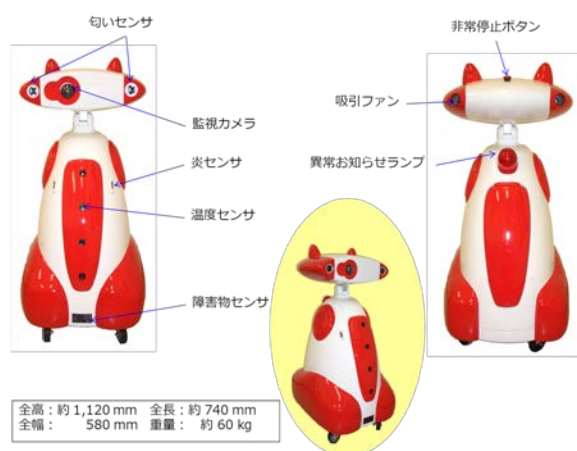


図 3. 匂いセンサ搭載ロボット



以上、五感の中で味覚と嗅覚に関するセンサ開発の現状に触れたが、実は触覚・力覚に関する研究が意外と遅れている。つまり、表面の質感や硬さ、弾力、動きといった触覚・力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のである。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。

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。研究会メンバーと審議の上、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. 2019 年度の研究活動の概要

6 月に第 1 回研究会を開き、インチュイティブサージカル社に da Vinci 手術支援システムについて講演を賜り、本システムによるロボット支援下手術が、1999 年の第 1 世代のダビンチスタンダードシステム上市後、現在までに約 600 万例が実施されているとの説明を受けた。また、そのコア技術としての 3 次元高解像度拡大画像、エンドリストと呼ばれる鉗子の多関節機能、インチュイティブモーションと呼ばれる手振れ防止機能及びスケーリング機能を活用し、術者は鏡視下手術でありながら、さながら開胸・開腹手術のような直感的な操作が可能になった旨、豊富な事例を基に紹介頂いた。なお、質疑応答で、現時点では触覚・力覚を使用していないことを確認した。

11 月に第 2 回研究会を開き、九州大学田原健二准教授と東北大学昆陽雅司准教授を講師にお招きし、それぞれ「多指ロボットハンドによる物体把持～視覚・触覚センサを用いた制御手法～」と「ヒト触覚知覚特性と触覚フィードバック技術」の講演を戴いた。

田原講師からは視覚・触覚センサ情報を用いた把持物体の目標位置・姿勢を実

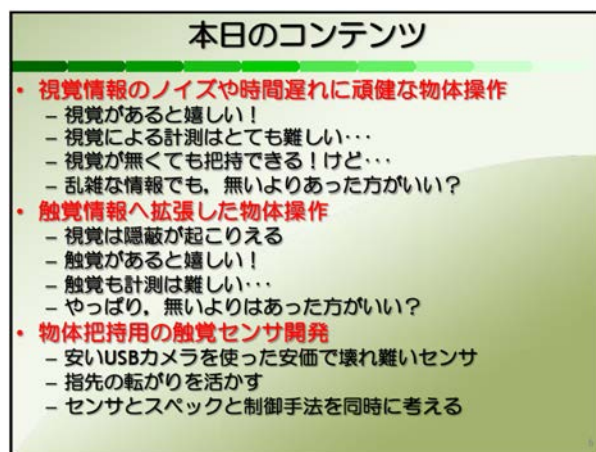


図 4. 田原講師の講演コンテンツ

時間で更新することにより、ノイズならびに時間遅れの影響を減らしロバストな物体把持と操作を実現した旨、豊富な実験データと共に説明頂いた。カメラを用いた安価で壊れにくい触覚センサとその情報を基にしたロバストな物体把持手法についても紹介がなされた。

昆陽講師からは、ヒトの皮膚で感じる触覚に関する技術に関して、触覚情報が得意とする高周波振動知覚と空間分布知覚に着目した、それぞれの知覚特性と応用技術の紹介がなされた。具体的に振動伝播再現によるリアリティの向上、建設ロボットの遠隔操作のためのフィードバック技術、バーチャルリアリティコンテンツ向けの物理モデルベースの衝突振動の自動生成技術、音楽や映画などの音響信号を触覚用に感覚等価変換する技術について詳細な説明を戴いた。

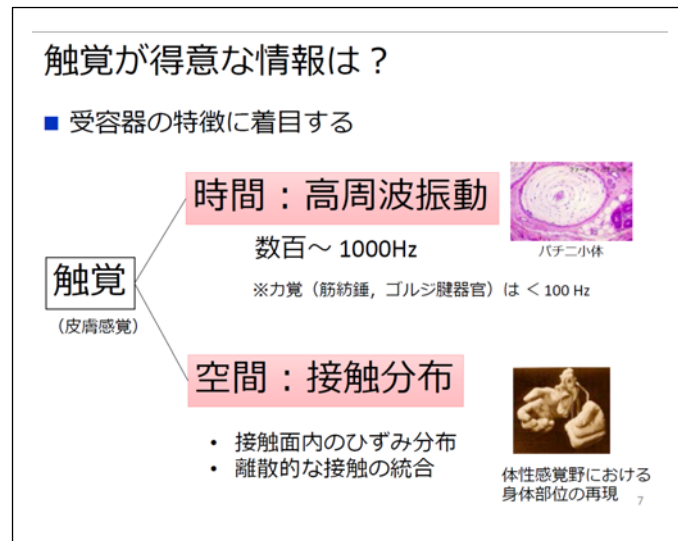


図5. 高周波振動知覚と空間分布知覚（昆陽講師）



図6. 第2回研究会風景

年明けて3月に第3回研究会として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の講演を予定していたが、新型コロナウイルス対応等による参加キャンセルの状況および社会情勢も踏まえて延期とした。第2回研究会にて、2020

年度も引き続き有識者に講演を依頼し、当該方面の知見を得るべく努力することで意見が一致した。

#### **4. 2020 年度活動の構想**

冒頭で述べたとおり、本研究会は、10 年から 20 年先の将来社会を予想し、Society5.0 で提示された社会的課題を解決するために設立されたものであり、ハブティクスを持つロボティクス技術開発に必要な課題把握や課題解決のためのアイデア創出に注力する。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、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、課題解決のためのアイデア創出を行う。2020 年度は、2019 年度に延期となった講演を含め、計 3 回の研究会を開催する予定である。

## 研究会開催記録

【第1回】2019年6月26日(水) 御茶ノ水

1. 「da Vinci Surgical System - Past, Present and Future-」

インテュイティブサージカル合同会社

クリニカルアプリケーションズマネージャー

金田 浩之※

2. 「研究会員自己紹介」

参加者 16 名（会員 12 名、外部 4 名）

【第2回】2019年11月18日(月) 御茶ノ水

1. 「多指ロボットハンドによる物体把持

～視覚・触覚センサ情報を用いた制御手法～」

九州大学 大学院工学研究院 機械工学部門

田原 健二※

2. 「ヒト触覚知覚特性と触覚フィードバック技術」

東北大学 大学院情報科学研究科

昆陽 雅司※

参加者 13 名（会員 11 名、外部 2 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<br>五感応用デバイス研究開発センター            | 特別主幹教授<br>特任教授<br><br>研究会委員長 |
| 脇若 弘之  | 信州大学 工学部                                  | 特任教授<br><br>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   | 帝京大学薬学部認知神経科学講座<br>順天堂大学医学部泌尿器外科学<br>東京大学 | 特任教授<br>客員教授<br>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  | K O A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                       | 課長                           |
| 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                           |

2020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>

