

# 研 究 報 告 書

—2022 年度研究会活動—



- 目 次 -

- |     |   |    |
|-----|---|----|
| (1) | 『界面ナノ科学研究会(第10期)の2022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) | 『1次元・2次元材料のヘテロ構造を中心に』<br>丸山 茂夫 (ナノカーボン研究会 委員長)                  | 7  |
| (3) | 『スピンと軌道、そして格子の角運動量へ』<br>齊藤 英治 (スピントロニクス研究会 委員長)                 | 16 |
| (4) | 『2022年度バイオ単分子研究会活動報告<br>—対面による研究会の再会—』<br>渡邊 力也 (バイオ単分子研究会 委員長) | 26 |
| (5) | 『ロボティクス技術と力触感、そして五感へ』<br>都甲 潔 (ナノメカニクス研究会 委員長)                  | 35 |



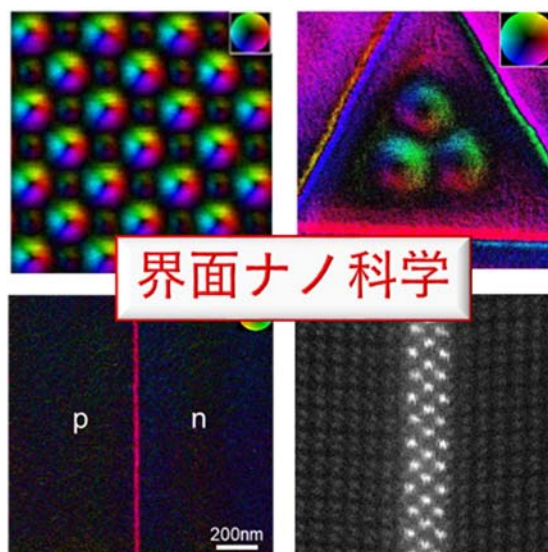
## 界面ナノ科学研究会(第10期)の2022年度活動報告

委員長 柴田直哉

東京大学 教授

### 1. 研究構想

界面ナノ科学研究会(第10期)は、2012年度から2017年度までの二期合計6年間、東工大の一杉太郎教授(現東大)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年度から第9期、2021年度から第10期に引き継いだ研究会である。メンバーは、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であり、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している。第10期は総勢15名のメンバーで研究会活動をスタートした。



ナノレベルの界面現象の本質的理解とその活用は、マテリアル、デバイス、バイオ、量子技術、エネルギーなど、未来社会の創造を根底から支える重要分野のキーテクノロジーである。計測技術や理論計算手法の進展とともに、界面現象に対する原子・電子レベルからの理解が急速に進んでおり、新奇な現象の発見や界面を積極的に応用したデバイスの開発など、精力的な研究が進められている。しかし、ナノ界面科学には未開拓の領域が数多くあり、幅広い分野の研究者にとってその魅力は尽きることがない。

本研究会では、ナノ界面科学をキーワードとして、多様なバックグラウンドを有する第一線の研究者を結集し、新たな研究分野の潮流を生み出すことを目指す。学際的なメンバーが異なる視点からナノ界面現象を深く議論しあうことで、一人一人の研究を大きく飛躍させる斬新な発想やアイデアを生むだけでなく、お互いを高めあうことで、行動力とチャレンジ精神溢れる集団を目指したい。また、研究者を目指す若手との交流も積極的に行い、科学分野の更なる活性化にも貢献したい。さらに、社会と研究者の今日的な関わり方についても議論を深め、これからのあるべき科学者像についても意見交換したい。

2022年度においては、対面での研究会を復活し、合計2回の研究会を開催した。久しく対面開催が出来なかったため、改めて対面開催での研究会の重要性と意義を認識した。

## 2. 2022 年度活動の概要

2022 年度は2 回の対面による研究会を開催した。以下に各研究会の内容を説明する。

第1回 2022年10月11日

会場：御茶ノ水トライエッジカンファレンス

テーマ：会員からの近況報告

内容：久しぶりの対面開催であるため、各会員から最近の研究活動などについて報告し、活発に議論を行った。

報告者

柴田会員、一杉会員、高橋会員、戸川会員、千葉会員、福間会員、塩見会員、沙川会員、川井会員、高山会員

各会員から、コロナ時期における研究教育活動などについて報告があり、更に最近の各自の研究や近況に関して報告があった。オンラインでの研究会は続けていたものの、対面での開催は久しぶりであり、やはり臨場感と一体感が全く異なることを再認識した。会員同士の交流と意見交換にまたとない機会となった。また、第2回に関しては年度末に温泉にて合宿形式で行うことを合意した。

第1回研究会集合写真（御茶ノ水にて）



第2回 2023年3月29日～30日

会場：ニューウェルシティ湯河原

内容： 3名の外部講師からの講演を聞き、活発に議論を行った。

講師（敬称略）

- ・金澤直也（東京大学）
- ・下志万貴博（理化学研究所）
- ・好田誠（東北大学）

まず、柴田委員長より、久しぶりの対面合宿への期待と喜びが述べられ、また委員会を代表して新世代研究所への感謝の念が表された。次に最初の講師として、東大の金澤直也氏から「FeSiにおける強磁性トポロジカル表面状態の発現と強スピン-軌道結合物性」と題して、最新の量子物質研究に関する講演を拝聴した。FeSi というこれまでも長年研究されてきた物質に対して、表面極近傍に形成される強磁性トポロジカル表面状態が最近発見された経緯とその応用可能性について極めて興味深いお話があった。発表中も質問が止まらないほど活発な質疑応答が続き、あっという間に講演時間が経過した印象であった。次に、理化学研究所の下志万貴博氏から「超高速時間分解電子顕微鏡による固体のナノスケールダイナミクス計測」と題して、最新の時間分解電子顕微鏡に関する講演を拝聴した。電子顕微鏡の高空間分解能にレーザーを駆使した超高時間分解能向上技術を組み合わせることで、材料中のナノスケールでの高速ダイナミクスを可視化する試みに一同感銘を受けた。また近年開発競争が加速している4D-STEMと呼ばれる試料各点からの電子回折図形を全て計測する計測研究分野に対して、時間軸を取り入れることで5D-STEMを新たに構想する点も印象的であった。会員から活発な質疑応答が行われた。最後に、東北大学の好田誠氏から「半導体ナノ界面におけるスピン軌道相互作用と電子スピン波物性への展開」と題して、電子スピン波を制御する研究に関する講演を拝聴した。化合物半導体量子構造を舞台として、有効磁場の起源となるスピン軌道相互作用から永久スピン旋回状態までの基礎概念、さらには電子スピン波物性についての概略を説明頂き、電子スピン波を生成・外部制御技術の最前線をご紹介頂いた。また電子スピン波を用いた演算回路への応用展開についても紹介頂き、大変興味深いお話であった。本講演も会員から活発な質疑応答が行われた。3名の講師のお話はいずれも界面・局所が物質科学の最前線・フロンティアであることを再認識させてくれるものであり、会員一同大きな刺激を受ける機会となった。講演会後の夕食・懇親会も大いに盛り上がり、旧交を温めつつ新たな研究連携の可能性を模索する上でも極めて有意義な研究会となった。

湯河原での合宿研究会の集合写真



### 3. 今期の総括

2022年度の活動は、新型コロナウイルス感染症の影響を社会が脱しつつある中で、研究者コミュニティの密な連帯を復活させるべく、対面開催にこだわった研究会を企画した。昨年度、オンラインによる研究会を定期的に行ってきたことで、会員同士のコミュニケーションが保たれた状態で、スムーズに対面研究会を行うことができた。素朴な感想として、やはり対面開催の方が議論の質・量ともに格段にレベルが違うことを実感した。今後も、対面開催を継続できることを期待したい。

3月の研究会では、主に物性分野の気鋭の研究者を招待して、最新のナノ界面研究を拝聴することができた。また、懇親会でも会員、講師の区別なく、皆が非常に打ち解けて白熱した議論を行っていたことが印象的であった。このような交流が、共同研究や研究交流、そして研究者サロンの形成に繋がり、いつの日か日本の研究力向上の一助になることを切に願う。今後は、さらに多くの若手研究者にも声がけし、本研究会を核とした大きな研究者コミュニティを構想して行きたい。そして、社会の目まぐるしい変化の中で見失いがちな「素晴らしい研究とは何か」、「研究者とは何か」、「次世代に継承すべき研究者の規範とは何か」について、問い続ける集団でありたいと思う。

最後に、研究会活動を積極的にご支援いただきました AT 関係者各位に、この場をお借りして深く感謝の意を表します。



## 研究会開催記録

【第1回】2022年10月11日（火） 御茶ノ水トライエッジカンファレンス開催

1. 「研究会会員報告」その1

柴田委員長、一杉会員、高橋会員、戸川会員、千葉会員

2. 「研究会会員報告」その2

福岡会員、塩見会員、沙川会員、川井会員、高山会員

参加者 11名（会員 10名、会員外 1名）

【第2回】2023年3月29-30日（水-木） ニューウェルシティ湯河原（宿泊）開催

1. 「FeSi における強磁性トポロジカル表面状態の発現と強スピン-軌道結合物性」

東京大学大学院 工学研究科 金澤 直也<sup>※</sup>

2. 「超高速時間分解電子顕微鏡による固体のナノスケールダイナミクス計測」

理化学研究所 創発物性科学研究センター 下志万 貴博<sup>※</sup>

3. 「半導体ナノ界面におけるスピン軌道相互作用と電子スピン波物性への展開」

東北大学大学院 工学研究科 好田 誠<sup>※</sup>

※印は会員外の講演者、敬称略

参加者 14名（会員 10名、会員外 4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	東京大学大学院 理学系研究科	教授
高橋 琢二	東京大学 生産技術研究所	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
松永 克志	名古屋大学大学院 工学研究科	教授
川井 茂樹	物質・材料研究機構	グループリーダー
高山 あかり	早稲田大学 先進理工学部	准教授

2023年3月現在

## 1次元・2次元材料のヘテロ構造を中心に

委員長 丸山 茂夫

東京大学大学院工学研究科 教授

### 1. はじめに

炭素材料としては、 $sp^3$ 固体のダイヤモンドと $sp^2$ 固体のグラファイトが古くから知られているが、20世紀末からフラーレン(0次元)、カーボンナノチューブ(1次元)、グラフェン(2次元)等、ナノカーボン材料の発見が相次いだ。これら、 $sp^2$ ネットワークを基本とする材料系では、ネットワーク次元の変化に伴う物性の質的な変化が実証され、重点的にその物性研究が進められてきた。近年では炭素材料にとどまらず、グラフェン様2次元物質として遷移金属ダイカルコゲナイド(TMD)など新たな原子層材料にも広がりを見せ、さらにそれら原子層を自在に組み合わせる1次元・2次元ヘテロ構造系では、無限ともいえる新材料系の構築が可能になりつつある。

ナノカーボン研究会では、これらナノカーボン材料をはじめとする魅力的な低次元ナノ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す。本分野のエキスパートである構成委員による議論だけでなく、若手研究者を交えた合宿形式の研究会を開催することにより、通常の学術集会では得られない熱い議論と深い理解の機会を提供するとともに、若手研究者育成を目指している。

ナノカーボンの研究の深化と実用化に向けた着実な展開とともに新たな1次元、2次元ヘテロ構造系の新たな材料開発が進んでいる。

### 2. ナノカーボン研究会 2022 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のクローズな研究会の2回の研究会をそれぞれ蔵王温泉と福島温泉で行うのが恒例となっていた。新型コロナの感染拡大によって2020年度の会合がオンラインになり、2021年度は、ぎりぎり少人数で少人数の対面会議を実現していた。2022年度は、若手研究者を含めたオープンな会議(第1回)とクローズな研究会(第2回)を両方とも対面で実現した。若手の皆さんが参加するオープンな対面会議は3年ぶりで、多くの博士課程学生などにとっては初めての対面の機会となった。委員の皆さんの多くが所属するフラーレン・ナノチューブ・グラフェン学会、応用物理学会、MRS、ECSなども含めて、対面会議の利点を実感する2022年度であった。それにしても、コロナの感染状況を見ながら、感染拡大防止のルールを守りつつの宿泊での会合であり、ATI事務局のご苦勞に感謝したい。

<p>【2022 1st Nanocarbon Study Group】  Schedule: August 23, 2022 (Tuesday) – August 23, 2022 (Wednesday)  Place: Atami City, Shizuoka Prefecture  August 23 (Tuesday)  Invited talks:  (Presentation 15min, Discussion 10min)  13:50-15:30  1. Synthesis and application of 1D heterostructures  Shigeo Maruyama, University of Tokyo  2. G/D of SWCNT solution  Hiromichi Kataura, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology  3. An investigation of photovoltaic effects in two-dimensional systems  Ryo Kitaura, National Institute for Materials Science  4. NIR Luminescence of SWCNTs by luciferin/luciferase reaction  Takeshi Tanaka, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology  15:30-15:40 Break Time  15:40-16:55  5. Composite system of nanocarbon materials and water molecules  Shohei Chiashi, University of Tokyo  6. Transfer of 2D materials using polyvinyl chloride  Momoko Onodera, University of Tokyo  7. Kinetic selectivity in catalytic growth of carbon nanotubes from carbon feedstocks and etching agents  Keigo Otsuka, University of Tokyo  16:55-17:25  Contributed talks:  (Presentation 10min, Discussion 5min)  8. Synthesis of one-dimensional van der Waals heterostructures  Yongjia Zhang, University of Tokyo  9. The experimental realization of NbS<sub>2</sub> based 1D van der Waals Heterostructures  Wanyu Dai, University of Tokyo  17:25-18:30 Free Time  18:30-20:00 Dinner  20:00-22:00 Free Discussion</p>		<p>August 24 (Wednesday)  Contributed talks:  (Presentation 10min, Discussion 5min)  9:20-10:35  10. Can triions exist at room temperature?  Xue Mengsong, Nagoya University  11. 1D Heterostructures grown on Semi-conducting Single-walled Carbon Nanotube Thin Film  Thin Film  Shuhui Wang, University of Tokyo  12. Development of Strain Application Method for Dynamic Control of Moiré Potential  Junpei Okuda, Nagoya University  13. Poly (triarylamine) wrapped carbon nanotubes as efficient electrodes for Li-TFSI free high-stability perovskite solar cells.  Bowen Zhang, University of Tokyo  14. Raman and IR spectra of BN nanotube  Ikuma Kohata, University of Tokyo  10:40 Dissolution</p>
---	--	--

図1. 第1回研究会プログラム

### 3. ナノカーボン研究会 2022 年度第1回研究会

3年ぶりに若手を含めた対面開催となった第1回の研究会はコロナの影響で個室宿泊が必須とのもこともあり、蔵王から熱海に会場を移しての開催となった。プログラムを図1に示すように、委員に加えて、助教2名、博士研究員1名、博士課程4名、修士課程2名の学生も参加してナノカーボン研究会らしい熱い議論を行った。

具体的には、丸山の話は、単層 CNT (SWCNT) を基にした一次元ヘテロ構造の合成と光学特性の議論であり、SWCNT の外側に窒化ホウ素ナノチューブ (BNNT) の CVD 合成、さらに遷移金属ダイカルコゲナイド (TMD) ナノチューブ合成、これらの光学特性の実験的な研究である。特に、片浦委員のカイラリティ選択 SWCNT の外側に作成した BNNT とその PL 発光については、合成は明らかであるが (図2)、PL のクエンチについては謎に包まれている。また、Esko フィルムと呼ばれる Dry deposition による SWCNT フィルムに合成した BNNT については、赤外吸収、ラマン分光による評価の方向が議論された。カイラリティ選択 SWCNT への BNNT 合成と PL 発光のクエンチングについては、博士課程の Wang 氏からも詳細な発表があった。

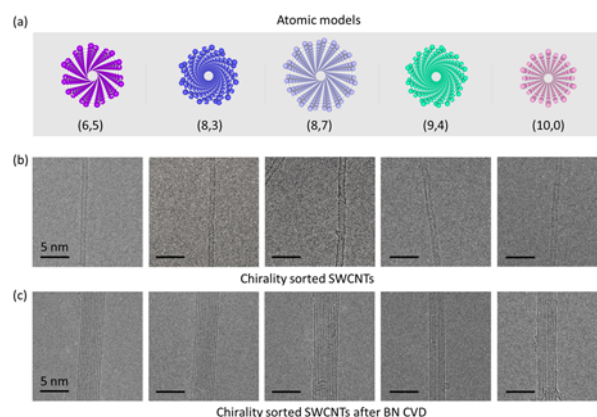


図2. カイラリティ選択 SWCNT に合成した窒化ホウ素ナノチューブ  
 [R. Zhang et al., Carbon, 199, 407, (2022)]

SWCNT-BNNT 外周に遷移金属ダイカルコゲナイド(TMD)ナノチューブ合成が合成できる。それぞれの TMD によって、最適な CVD 合成条件が異なり、大気中で不安定な TMD などの問題もある。博士課程の Dai 氏は、金属 TMD である NbS<sub>2</sub> のナノチューブ合成について講演した。従来の MoS<sub>2</sub> ナノチューブと異なり、容易に多層の NbS<sub>2</sub> ナノチューブが合成される。一方、大気中では時間のオーダーで酸化が進み、ラマンや光吸収で酸化プロセスが見て取れる。博士研究員の Zheng 氏は、WS<sub>2</sub> ナノチューブの CVD 合成を成功させるとともに、MoS<sub>2</sub> ナノチューブと WS<sub>2</sub> ナノチューブのダブルヘテロ構造を実現している。MoS<sub>2</sub> の CVD に引き続き WS<sub>2</sub> の CVD を行って MoS<sub>2</sub> と WS<sub>2</sub> が面内でつながる構造を TEM 観察している。このようなダブルヘテロ構造を含めると 1 次元ヘテロ構造の多様性はさらに大きく広がる。

さて、1 次元ヘテロ構造の基礎となる SWCNT についても内外の水分子の分光に関しての千足委員の発表、CVD 合成の Kinetics のモデリングとカイラリティ分布の制御合成についての大塚助教の発表があった。ペロブスカイト型太陽電池の電極として SWCNT フィルムを使うために PTAA によるドーピングの話題を Zhang 氏が、BNNT のラマンに関しては修士課程の小幡氏の発表があった。小幡氏の発表は丸山と齋藤委員の共同指導の下で第一原理計算を行ったものである。

2 次元系については、小野寺氏が PVC フィルムを用いた転写技術を様々に展開して 2 次元ヘテロ構造を目指している。高品質・大面積の転写に向けて、PVC フィルムの凝着力と 2 次元材料の edge の凝着など詳細な物理に迫っている。北浦委員は MoS<sub>2</sub> と WS<sub>2</sub> のヘテロ構造による光電流を観察し、東大の岩佐先生らが 2019 年に発表した WS<sub>2</sub> ナノチューブによるバルク光電効果[Y. J. Zhang et al., Nature 570, 349, (2019)]と比較している。応用の可能性も含めて、これからの展開が大いに気になる話題である。2 次元系で 2 層あるいはヘテロ系で期待が大きいモアレ

(Moire) については、名大の Okuda 氏から歪で Moire ポテンシャルを制御する試みが報告された。また名大 Xue 氏は、WS<sub>2</sub> のトリオンが室温でも存在しうることをゲート可変反射分光で示した。田中委員は蛍の発光物質として知られるルシフェリン (Luciferin)/ルシフェラーゼ (Luciferase) による SWCNT の E<sub>11</sub> 発光を確認し、生化学的なエネルギーによる SWCNT の赤外発光

の可能性を明らかとした。

以上、低次元系の展開、特にヘテロ系における新材料開発についての理論・実験の両面からの展開は、急ピッチで進んでおり、多くの課題が解決されるとともにさらに豊富な新たな可能性が生まれてきている。

#### 4. ナノカーボン研究会 2022 年度第 2 回研究会

第 2 回研究会は対面・クローズで、ニューウェルシティー湯河原で開催された。プログラムを図 3 に示す。

具体的には、丸山らによる 1 次元ヘテロ構造の実験的研究の進展について報告があり、ダブルヘテロ構造、電界効果トランジスタ応用などが議論され、特に、SWCNT の外側に合成された BNNT のラマン分光による計測と SWCNT に加わる歪について議論された。片浦委員は、SWCNT のカイラリティ選別とアニーリングによる欠陥修復の可能性とラマン G/D 比による欠陥の見積もりについて議論し、界面活性剤や励起波長により G/D 比が変わることから新たな挑戦を指摘している。齋藤委員は、北京大学 Tong らとの共同研究で、円偏向ラマン分光でカーボンナノチューブの鏡像異性体を測定する理論構築について議論した。大野委員は、カーボンナノチューブ薄膜トランジスタへのスマネン吸着とリザーバーコンピューティングへの応用の可能性について議論した。田中委員は、酵素-SWCNT の直接電子移動によるグルコースセンサ応用の可能性を示した。若林委員は、2 次元 HexNet (Hydrogen-Bonded Hexagonal Buckybowl Network) の対称性などの議論からトポロジカルな物性の可能性を議論した。

以上、委員だけのクローズな議論となると主に 1 次元系の物理についてのより深掘りした議論が中心となる。

## 第2回ナノカーボン研究会プログラム

日程：2023年1月23-24日（月、火）

場所：ニューウェルシティ湯河原（静岡県）

※湯河原駅からのホテルシャトルバスは12:15、13:15に出発します。（約10分）

### 1月23日（月）

研究会

13:40 - 13:50 開会挨拶 丸山委員長  
講演（敬称略）（発表30分、質疑10分）

13:50 - 14:30 丸山 茂夫

14:30 - 15:10 片浦 弘道

15:10 - 15:50 齋藤 理一郎

15:50 - 16:00 休憩

16:00 - 16:40 大野 雄高

16:40 - 17:20 田中 丈士

17:20 - 18:00 若林 克法

18:00 - 18:20 総合ディスカッション

18:20 - 18:30 閉会・夕食及び入浴の案内

18:30 - 19:30 休憩・入浴

19:30 - 21:30 夕食・懇親会

### 1月24日（火）

朝食

適宜解散

※ホテル発湯河原駅行のホテルシャトルバスは9:30、10:00、11:00に出発します。（約10分）

以上



図3. 第2回ナノカーボン研究会プログラム





図4. 第2回ナノカーボン研究会



図5. 第2回ナノカーボン研究会懇談会

## 5. おわりに

コロナ下で片浦さんから引き継いだナノカーボン研究会の委員長であるが、ナノカーボン研究会の独特の“文化”にこだわり、コロナの感染状況と見合わせながら対面での若手を含めた研究会とクローズな研究会をフルに実現できた。一次元や二次元材料の研究の進化は急激であり、理論と実験、一次元と二次元を対比した深い議論がさらに求められる。いつものことながら、低次元材料の研究の議論はエンドレスである。



## 研究会開催記録

【第1回】2022年8月23-24日(水-木)

亀の井ホテル熱海(宿泊)開催

1. Synthesis and application of 1D heterostructures  
Shigeo Maruyama, University of Tokyo
2. G/D of SWCNT solution  
Hiromichi Kataura, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology
3. An investigation of photovoltaic effects in two-dimensional systems  
Ryo Kitaura, National Institute for Materials Science
4. NIR Luminescence of SWCNTs by luciferin/luciferase reaction  
Takeshi Tanaka, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology
5. Composite system of nanocarbon materials and water molecules  
Shohei Chiashi, University of Tokyo
6. Transfer of 2D materials using polyvinyl chloride  
Momoko Onodera<sup>\*</sup>, University of Tokyo
7. Kinetic selectivity in catalytic growth of carbon nanotubes from carbon feedstocks and etching agents  
Keigo Otsuka<sup>\*</sup>, University of Tokyo
8. Synthesis of one-dimensional van der Waals heterostructures  
Yongjia Zhang<sup>\*</sup>, University of Tokyo
9. The experimental realization of NbS<sub>2</sub> based 1D van der Waals Heterostructures  
Wanyu Dai<sup>\*</sup>, University of Tokyo
10. Can trions exist at room temperature?  
Xue Mengsong<sup>\*</sup>, Nagoya University
11. 1D Heterostructures grown on Semi-conducting Single-walled Carbon Nanotube Thin Film  
Shuhui Wang<sup>\*</sup>, University of Tokyo
12. Development of Strain Application Method for Dynamic Control of Moiré Potential  
Jumpei Okuda<sup>\*</sup>, Nagoya University
13. Poly (triarylamine) wrapped carbon nanotubes as efficient electrodes for Li-TFSI free high-stability perovskite solar cells.  
Bowen Zhang<sup>\*</sup>, University of Tokyo

14. Raman and IR spectra of BN nanotube

Ikuma Kohata<sup>\*</sup>, University of Tokyo

※印は会員外の講演者、敬称略

参加者 14 名（会員 5 名、会員外 9 名）

【第 2 回】2023 年 1 月 23-24 日(月-火) ニューウェルシティ湯河原(宿泊)開催

1. Optical Properties Single-Walled Carbon Nanotubes Wrapped with Boron Nitride Nanotubes

東京大学大学院 工学研究科 丸山 茂夫

2. 完全構造 CNT 創製の困難：あれこれ

産業技術総合研究所 ナノ材料研究部門 片浦 弘道

3. ラマン分光で測るカーボンナノチューブの鏡像異性体

東北大学大学院 理学研究科 齋藤 理一郎

4. カーボンナノチューブ薄膜トランジスタへのスマネン吸着とその効果

名古屋大学 未来材料・システム研究所 大野 雄高

5. カーボンナノチューブと酵素を用いた研究の進展

産業技術総合研究所 ナノ材料研究部門 田中 丈士

6. 二階建て二次元六角ネットワーク HexNet の電子状態

関西学院大学 工学部 若林 克法

敬称略

参加者 6 名（会員 6 名、会員外 0 名）

## ナノカーボン研究会員名簿

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 研究会委員長
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
齋藤 理一郎	東北大学大学院 理学研究科	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	物質・材料研究機構 国際ナノアーキテクトニクス研究拠点 名古屋大学大学院 理学研究科	首席研究員・グループリーダー 准教授
湯田坂 雅子	名城大学 理工学部	特任教授
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
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	富士通（株） 量子コンピューティング研究センター	特任研究員
千足昇平	東京大学大学院 工学系研究科	准教授

2023年3月現在

## スピンと軌道、そして格子の角運動量へ

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。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. 2022 年度活動の概要

2022 年度は、スピン流の効果的な生成と制御を目指す取り組みのなかで、近年重要度を増している電子の軌道自由度や結晶格子が運ぶ角運動量に着目した研究会を 3 回開催した。これまでのサロニックな雰囲気を残しつつ、外国籍講師を招き関連研究室のスタッフや学生が多数参加する、よりオープンな形式で新概念の検討を行なった。全ての研究会を対面で、さらに懇親交流会を実現することができ、研究交流に日常が戻ってきたことを実感する機会となった。参加者の急増に対応した大きな会場の確保と予算のやりくりで、新世代研究所には格別のご支援を頂戴しましたことをここに感謝申し上げます。

・第 1 回：2022 年 10 月 12 日（水）13:30～19:30

会場：御茶ノ水トライエッジカンファレンス

テーマ：「軌道とスピンの科学」

固体中の電子は、電荷とスピンに加え、軌道の自由度をもつ。これら 3 つの電子内部自由度の織りなす現象は、主に銅酸化物の高温超伝導やマンガン酸化物の超巨大時期抵抗といった相関電子系物理の課題として研究がなされてきた。近年、スピントロニクス分野でも、電流、スピン流に加え、新たに軌道流を利用する試みに注目が集まっている。本研究会では、スピンと軌道の科学の研究を牽引する国内外の専門家を招き、最新の知見について意見交換を行った。

講演①「Orbitronics: Electron orbital angular momentum in solids」

Department of Physics, Pohang University of Science and Technology, Korea  
Hyun Woo Lee 先生（オンライン参加）

Lee氏は、最近注目を集めている固体電子の軌道角運動量の制御に関する理論と実験の研究動向について総合的な講演を行なった。反転対称性をもつ物質など、スピン軌道相互作用による従来のスピン流生成機構が適応できない系において、何らかの角運動量流の存在が示唆される実験結果を示しながら、電子の軌道自由度が担う角運動量を考慮することで矛盾なく現象の説明が可能となることを報告した。特に、3d金属系の平衡状態を理解する上で基礎となる「軌道の消失」が、非平衡状態では解かれ、軌道角運動流の担い手となり得ることを強調した。また、反転対称性の破れた系においては、スピン角運動量に関するラシュバ効果の軌道角運動量版が生じることを指摘した。さらに、この軌道ラシュバ効果を用いた軌道流生成と軌道・スピン変換、軌道角運動量の蓄積や軌道流による磁化操作など、これまでスピンで観測されてきた効果のさまざまな類似現象が実現可能であることを解説し、その実験的な検証方法についても紹介をされた。

講演②「非磁性金属における電流誘起磁気光学効果」

東京大学 大学院 理学系研究科 物理学専攻 林 将光 先生

林氏は、磁気光学効果を用いた軌道角運動量の蓄積を観測する研究について報告を行なった。非磁性金属に電流を流すと、それと直交する方向に軌道流が生じる。この軌道流がスピン軌道相互作用を通じてスピン流に変換され、隣接する強磁性層の磁化制御に用いることができる。このプロセスによって生じるスピン流の理論予測値は、実験で観測されている値と概ね一致しているという先行研究を紹介しながら、幾つかの非磁性金属で新たに観測された電流誘起磁気光学効果について説明された。実験的な手法としては、試料に電流を印加した状態で直線偏光を照射し、反射してきた光の偏光面の変化を測定することで、表面に蓄積したスピン磁気モーメントや軌道磁気モーメントを決定する。質疑応答では、時期光学効果に寄与するスピン成分と軌道の成分の分離方法や非平衡状態である軌道蓄積の緩和機構とそれによる軌道拡散長の見積もりに関する討論が行われた。

講演③「永久スピン旋回状態を用いたスピン空間制御と機能開拓」

東北大学 大学院工学研究科 量子科学技術研究開発機構 量子機能創製研究センター  
好田 誠 先生

好田氏は、III-V族半導体量子構造など Rashba および Dresselhaus スピン軌道相互作用が共存する系で実現される、永久スピン旋回状態を利用した新しい情報処理技術の最新研究動向を紹介された。永久スピン旋回状態では、スピンの長距離伝送と高い制御性が両立でき、非磁性状態に

において電子スピン波と呼ばれる新たな情報キャリアが利用可能となる。単一電子スピン波の時空間領域での生成・検出法の説明ののち、並列演算処理に重要となる多重化された電子スピン波が生成・制御できることが示された。特に、永久スピン旋回状態や電子スピン波の結晶方位依存性に関する詳細な実験研究成果を紹介され、磁気伝導における量子干渉効果からの電子スピン波検出など多彩な測定手法による物性開拓の可能性について展望を述べられた。

#### 講演④「スピンと軌道の計測と操作」

東京大学大学院 理学系研究科 附属スペクトル化学研究センター 岡林 潤 先生

岡林氏は、X線磁気円二色性(XMCD)、X線磁気線二色性(XMLD)、スピン分解角度分解光電子分光(ARPES)等の手法による電子・磁気状態の計測について講演を行なった。磁気光学総和則により軌道磁気モーメントを、ARPESにより運動量空間におけるスピン軌道結合をそれぞれ調べることができる。特に、薄膜界面では軌道角運動量の消失が解け軌道磁性が期待できる。また、オペランド磁気分光システムを立ち上げて、スピンのみでなく、軌道の操作に関する研究の現状についても紹介された。これらの実験手法によって明らかにされたもののうち、軌道の弾性効果、四極子異方性、Rashba界面の垂直磁気異方性といったトピックスについて解説された。



第1回スピントロニクス研究会「軌道とスピンの科学」集合写真

・第2回：2022年11月16日（水）14:30～19:10

会場：日比谷国際ビルコンファレンススクエア

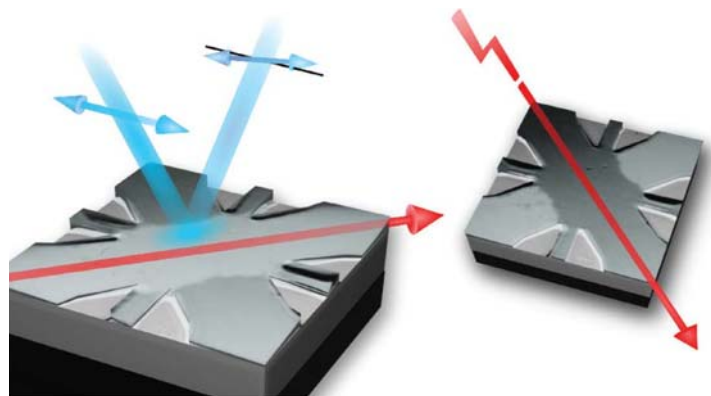
テーマ：「Topological Spin-orbitronics」

スピンと軌道の科学を研究する上で、スピン軌道相互作用の強い極限と見做せるトポロジカル物質は格好の舞台を提供する。本年度、第2回目の研究会は「Topological Spin-orbitronics」と題し、その実験と理論に関して5名の講演者から最新成果の紹介がなされた。学生を含め30名を超える参加希望の声が寄せられたため急遽大きな会場に変更することになるなど、研究会での自由討論と懇親交流会も大いに盛り上がりを見せた。

#### 講演①「Antiferromagnetic Spintronics」

Institute of Physics, Johannes Gutenberg University of Mainz Mathias Kläui 先生

Kläui 氏は、反強磁性体を用いたスピントロニクス研究について、要素技術の開発現状を紹介された。高速動作と外部擾乱に対する堅牢性を備えた磁気メモリのさらなる高密度化を実現する上で、反強磁性体はゲームチェンジャーとして期待されている。反強磁性体の秩序変数はネールベクトルと呼ばれ、強磁性体の磁化のように磁場と直接結合せず、外部制御が困難であったことから、これまで磁気記憶素子としての応用に不向きとされてきた。これに対し、スピン軌道相互作用を巧みに利用することでネールベクトルの方向を制御し、情報の書き込み、読み出しが実現された。また、反強磁性絶縁体中に磁気情報を長距離伝送することにも成功している。材料形態としてもバルクや薄膜試料に加え、ファンデルワールス結合した二次元反強磁性材料も盛んに研究されており、そのスピントロニクス応用における有用性についても語られた。



反強磁性情報記憶素子の状態読み出し（左）と書き込み（右）の概念図

#### 講演②「Exploration of various magnon states using magnetization state tomography」

東北大学 材料科学高等研究所 日置 友智 先生

日置氏は、マグノン状態トモグラフィと呼ばれる実験手法について解説された。磁性体中の素励起であるマグノンの状態分布（ウィグナー関数）を分析するために新しく開発されたこの手法は、AC スピンポンプとホモダイン検出法を用いて、マグノン数分布を定量化し、熱的に圧縮されたマグノン状態の観察を可能とする。この手法を用いて、従来 100 ナノ秒程度で失われると考えられていた強磁性薄膜ディスクの磁化歳差運動のコヒーレンスがマイクロ秒間保持されるパーシステント

コヒーレンスを状態が観測されており、その物理的起源について詳しく説明がなされた。

講演③「Chiral-spin rotation of antiferromagnetic Weyl semimetal  $Mn_3Sn$  by spin-orbit torque」

東北大学 材料科学高等研究所 竹内 祐太郎 先生

竹内氏は、反強磁性ワイル半金属  $Mn_3Sn$  の実験研究について紹介をされた。 $Mn_3Sn$  は、磁化が小さいにもかかわらず大きな異常ホール効果が現れるなど、トポロジ的に自明ではない現象により最近注目を集めており、スピン軌道トルク (SOT) による電氣的磁化制御が実現されている。特に、SOT によりカイラルスピン構造の回転が効率的に誘起されることが報告された。この他、反強磁性体の SOT 効率を決定する方法に関する最近の研究も紹介された。

講演④「Contribution of the thermoelectreic effects in the spin absorption method on a ferromagnetic Weyl semimetal  $Co_2MnGa$ 」

東京大学 物性研究所 一色 弘成 先生

一色氏は、強磁性ワイル半金属  $Co_2MnGa$  の実験研究について紹介をされた。 $Co_2MnGa$  では、運動量空間に生じるワイル点に起因したスピンホール効果の増強が期待できる。標準的な非局所スピン吸収法による実験と、有限要素法による数値シミュレーションを組み合わせることで、 $Co_2MnGa$  のスピンホール効果の変換効率を決定した。実験では、電流誘起の試料温度分布が発生することから、同時に熱による効果（異常ネルンスト効果）が重畳する。分析の結果、過去に報告された大きなスピンホール効果のうち 75%もの成分が、この熱由来の効果であることが報告された。この他、原子間力顕微鏡による局所異常ネルンスト効果検出と高分解能磁気イメージング法による  $Co_2MnGa$  の磁気ドメイン観察結果についても紹介された。

講演⑤「Theory of spin torques emerging from topological structures of electrons」

日本原子力研究開発機構 先端基礎研究センター 荒木 康史 先生

荒木氏は、電子のトポロジ的特性に由来した非散逸スピントルクに関する理論・実験について紹介された。強いスピン軌道結合 (SOC) によるバンド反転付近で、電氣的に誘起されるスピントルクを半古典的に分類し、従来のスピン移行トルク (STT) とスピン軌道トルク (SOT) に加え、異常速度から生じる内因的トルクの寄与が議論された。磁壁などの磁気構造は反転対称性を破り、「トポロジカルホールトルク (THT)」という新しい内因的トルクが生じることが示された。また、ワイル強磁性金属として知られる  $SrRuO_3$  における電流誘起磁化反転によって、この THT の寄与を実験的に検証した成果についても紹介された。



・第3回：2023年2月24日（金）14:00～19:45

会場：御茶ノ水トライエッジカンファレンス

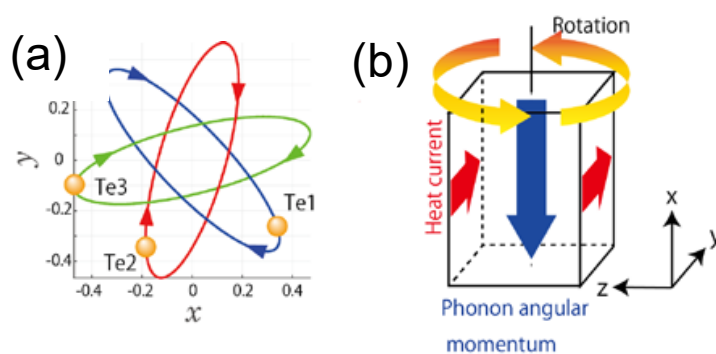
テーマ：「Phonons and Spintronics」

角運動量の担い手として、結晶のフォノンに着目した研究が盛んに行われている。本年度、第3回目の研究会は「Phonons and Spintronics」をテーマとし、その理論・実験に関して4名の講演者から最新成果の紹介がなされた。

講演①「Theory of generation and conversion of phonon angular momenta」

東京工業大学 物理学科 村上 修一 先生

村上氏は、フォノン角運動量の生成に関する理論研究について紹介をされた。結晶格子の局所回転運動は有限の角運動量を持ち、電子スピンのアナロジーからフォノン角運動量に関連した新しい現象が期待できる。例えば、反転対称性のない非磁性結晶では、熱流がフォノン角運動量を誘導することが示される。平衡状態では、フォノンの全角運動量は時間反転対称性によりゼロに相殺される一方、熱流が結晶内を流れると、この相殺はもはや起こらず、フォノンの正味の角運動量が存在しうる。この現象（フォノン・エーデルシュタイン効果）の実験的な検証方法についても検討され、フォノン角運動量と電子スピンの間の結合に関する微視的な理論についても説明がなされた。



(a) テルル中のフォノンの回転運動。(b) フォノンエーデルシュタイン効果の観測方法。

講演②「A theory of chirality-induced spin selectivity: nuclear vibrations and spin filter effect」

放送大学 自然環境科学プログラム 岸根 順一郎 先生

岸根氏は、キラリティ誘起スピン選択性（CISS）に焦点を当てた、キラル材料科学の最近の研究進展について紹介された。CISSは、キラルな分子または結晶を通過する電子のスピンに、100 T程度の内部磁場が作用し、室温かつ非磁性環境で高い分極を引き起こす。CISSは、分子または結晶がキラルである限り、スピン軌道相互作用の弱い軽元素からなる系でも生じる。その物理機構について、

電子と原子核の運動の結合に着目した提案がなされ、密接に関連するキラルフォノンの問題を含む、磁気・光・弾性をカイラリティ概念でつなぐ統一的視点について紹介された。

講演③「Coherent oscillation between phonons and magnons」

東北大学 材料科学高等研究所 日置 友智 先生

日置氏は、磁性体中のマグノンとフォノンのコヒーレント発振に関する実験研究について紹介された。従来の光磁気イメージングとポンプアンドプローブ分光法を組み合わせた時間分解光磁気イメージング技術を開発し、Bi ドープ磁性ガーネット  $\text{Lu}_2\text{Bi}_1\text{Fe}_{3.4}\text{Ga}_{1.6}\text{O}_{12}$  において、マグノンとフォノンが伝播中に相互変換されるコヒーレントな時間振動を観察した成果を紹介された。また、マグノンとフォノンの混成波がフォノンのモード自由度に起因して試料端で異常反射を示す様子も報告された。この現象は、マグノン単体の伝搬では生じず、マグノンフォノン混成波の強い証拠となる。

講演④「Acoustically driven magnon-phonon coupling in a layered antiferromagnet」

理化学研究所 創発物性科学研究センター Jorge Puebla 先生

Puebla 氏は、ファンデルワールス結合した層状反強磁性材料  $\text{CrCl}_3$  の磁気弾性効果に関する実験研究について紹介された。 $\text{CrCl}_3$  に対する表面弾性波の伝搬特性の分析から、音響スピン波共鳴が実現できることが示された。結果として生じるマグノン・フォノン結合は、試料温度と外部磁場の向きに強く依存し、数 mT の範囲の極めて弱い磁気異方性磁場に対して高い感度を示すことが紹介された。実験結果は、電力効率の高い弾性波技術とファンデルワールス材料の優れた機械的特性の組み合わせの有用性を示唆しており、動的磁気音響の将来の広範な応用への期待について解説された。

### 3. 2023 年度活動の構想

2022 年度は、対面での研究会と懇親交流会が完全に復活し、スピントロニクス研究のより一層の展開を見据えた意見交換が活性化した。スピン角運動量の伝搬は、電子の軌道自由度や結晶格子など固体中のあらゆる励起がその伴走者となることが明らかになり、伝搬距離も今やマクロスケールに到達するなど原理的な制限がほぼなくなっている。このような研究分野の成熟段階を迎え、スピン科学の物理現象の普遍性の解明や、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、いま一度、領域外の専門家を交えて議論することで、本研究会を、次世代量子物質科学の発展に向けた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】2022年10月12日（水） 御茶ノ水トライエッジカンファレンス開催  
ハイブリッド開催

テーマ：「軌道とスピンの科学 (Orbital and Spin Science)」

1. 「Orbitronics: Electron orbital angular momentum in solids」  
Department of Physics, Pohang University of Science and Technology  
Hyun Woo Lee<sup>※</sup>
2. 「非磁性金属における電流誘起磁気光学効果」  
東京大学 大学院 理学系研究科 物理学専攻  
林 将光<sup>※</sup>
3. 「永久スピン旋回状態を用いたスピン空間制御と機能開拓」  
東北大学大学院 工学研究科  
好田 誠<sup>※</sup>
4. 「スピンと軌道の計測と操作」  
東京大学大学院 理学系研究科 附属スペクトル化学研究センター  
岡林 潤<sup>※</sup>

※印は会員外の講演者、敬称略

参加者 22名（会員8名、会員外14名）

【第2回】2021年12月13日（月） 日比谷カンファレンススクエア開催  
テーマ：「Topological spin-orbitronics」

1. 「Antiferromagnetic Spintronics」  
Institute of Physics, Johannes Gutenberg University of Mainz  
Mathias Kläui<sup>※</sup>
2. 「Magnetization state tomography and stochastic dynamic of magnon parametron」  
Advanced Institute for Materials Research, Tohoku University  
Tomosato Hioki<sup>※</sup>
3. 「Chiral-spin rotation of antiferromagnetic Weyl semimetal  $Mn_3Sn$  by spin-orbit torque」  
Advanced Institute for Materials Research, Tohoku University  
Yutaro Takeuchi<sup>※</sup>
4. 「Contribution of the thermoelectric effects in the spin absorption method on a ferromagnetic Weyl semimetal  $Co_2MnGa$ 」  
The Institute for Solid State Physics, The University of Tokyo  
Hironari Isshiki<sup>※</sup>
5. 「Theory of spin torques emerging from topological structures of electrons」  
Advanced Science Research Center, Japan Atomic Energy Agency  
Yasufumi Araki<sup>※</sup>

※印は会員外の講演者、敬称略

参加者 36 名（会員 11 名、会員外 25 名）

【第 3 回】 2023 年 2 月 24 日（金） 御茶ノ水トライエッジカンファレンス開催  
テーマ：「Phonons and Spintronics」

1. 「Theory of generation and conversion of phonon angular momenta」  
Dept. of Physics, Tokyo Institute of Technology  
Syuichi Murakami<sup>※</sup>
1. 「A theory of chirality-induced spin selectivity : nuclear vibrations and spin filter effect」  
Faculty of Liberal Arts, The Open University of Japan  
Junichiro Kishine<sup>※</sup>
2. 「Coherent oscillation between phonons and magnons」  
Advanced Institute for Materials Research, Tohoku University  
Tomosato Hioki<sup>※</sup>
3. 「Acoustically driven magnon-phonon coupling in a layered antiferromagnet」  
Center for Emergent Matter Science, Riken  
Jorge Luis Puebla Nunez<sup>※</sup>

※印は会員外の講演者、敬称略

参加者 37 名（会員 11 名、会員外 26 名）

## 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
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	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
高梨 弘毅	日本原子力研究開発機構 先端基礎研究センター	センター長

2023年3月現在

## 2022 年度 バイオ単分子研究会活動報告 —対面による研究会の再開—

委員長 渡邊力也

理化学研究所 主任研究員

### 1. 研究会構想

バイオ単分子研究会は、2009 年度に発足した研究会（第 6 期研究会より）であり、今年度で 14 年目を迎えた。第 10 期研究会（2021 年度スタート）からは私が委員長を拝命し、12 名の新進気鋭の若手研究者による異分野交流を主軸とした研究会を運営している。本研究会の構想は以下のとおりである。

生体内には核酸や酵素などの様々な生体分子が存在し、これらの機能によって生体内の恒常性が維持されている。生体分子の機能の破綻はともすれば細胞の機能の異常に直結し、更には疾患の原因となっている。すなわち、生体分子の機能を正しく理解することは、生命機能の理解にとどまらず、疾患やその治療法に関する新知見を与えうる重要な鍵となる。この背景を受け、近年、生体分子の極限計測である「単分子計測」が再注目されている。単分子計測の特徴は、感度・精度の高さにあり、次世代 DNA シークエンサーや超解像顕微鏡などの核心技術として採用されている。そのため、従来技術では不可能であった様々な生体分子の機能や構造に関する新知見がもたらされ、「単分子計測」により新しい生物学の潮流が形成されつつある。そこで、本研究会では、工学・化学・物理学・生物学の異分野に属する若手研究者が集まり、革新的な単分子計測技術の開発から、それらに立脚した生体分子の機能発現機構の解明に至るまで包括的に議論する場を提供すると共に、我が国から「バイオ単分子研究」の新基軸を提示することを目標とする。

### 2. 2022 年度の活動概要

今期はコロナ禍が終息してきたため、対面/ハイブリッドの研究会を 2 回開催した(10 月@熱海・2 月@鳥羽)。バイオ単分子研究会は、2021 年度から若手中心の研究会として再出発していたが、今回の研究会でようやく対面で顔合わせをすることができた。本研究会では、担当委員がオーガナイザーとなって、テーマに沿った演者を外部から招聘している。第 1 回研究会では Kim 委員・

藤田委員が、第2回研究会では、古賀委員・西増委員・私が担当し、外部から合計9名の講演者を招聘した。内容は、昨今のバイオ単分子研究の根底をなす「1分子計測/解析技術」、「分子モーター」、「応用バイオ分析」の3つのトピックスを俯瞰しており、最先端の研究についての情報共有・議論がなされた。以下に、第1回、2回研究会について詳細を記したい。

## 2・1 第1回 バイオ単分子研究会 at 熱海

第1回バイオ単分子研究会は、外部講演4名を含む総勢17名で開催した。「タンパク質分子の操作・観測技術」、「ナノマイクロシステムによる革新的単分子・細胞解析」2つのトピックスに分け、担当委員と外部演者に最新の成果をご講演していただくとともに、それらをベースとした熱い議論が交わされた。また、講演後、熱海の温泉を堪能しながら、研究談義は深夜まで続いた。



第1回バイオ単分子研究会@熱海での記念撮影

### ➤ タンパク質分子の操作・観測技術

#### 講演 ① 「タンパク質分子の包接プラットフォーム開発」

藤田 大士 委員

タンパク質分子を包接する新しいプラットフォームの開発についてのご講演いただいた。守秘義務の関係上、詳細は割愛するが、非常にユニークな試みで、今後の生物・化学の融合領域を牽引する重要なプラットフォームになると強く期待される内容であった。

## 講演 ② 「進化分子工学がもたらしたセンサー工学と酵素工学の邂逅」

梅野 太輔さん（早稲田大学先進理工学部 教授）

2018年にノーベル化学賞が授与された「進化分子工学」についての概説と、それに基づいた最先端の生体センサー分子の開発についてご講演いただいた。とくに、進化分子工学を用いて、生体分子の持つ分子識別能を巧みに最適化した新規センサー分子の開発は非常に興味深く、今後の応用・発展が非常に楽しみな内容であった。

## 講演 ③ 「染色体凝縮タンパク質「コンデンシン」の単分子イメージング」

寺川 剛さん（京都大学大学院理学系研究科 助教）

最近注目されている、DNA 結合型分子モーターであるコンデンシンの1分子計測について最新の成果をご紹介いただいた。寺川さんが得意とするDNAカーテンは、非常に強力な1分子計測ツールであることが再認識されるとともに、コンデンシンの歩行速度に高速モードと低速モードがあることなど、1分子計測によって初めて解明できた現象の紹介があり大変興味深かった。また、寺川さんはマスメディアを通じたアウトリーチ活動も積極的に行っており、それらも大変参考になる内容であった。

## ▶ ナノマイクロシステムによる革新的単分子・細胞解析

### 講演 ① 「マイクロシステムを用いた単分子・細胞検出」

金 秀炫 委員

1分子・1細胞解析にむけた2Dフローサイトメトリー技術や電極を実装したマルチウェルなどの開発についてご講演いただいた。特に、Kim委員は、血中循環腫瘍細胞(CTC)の効率的な捕捉やその評価・解析技術に焦点をあて、種々の技術開発に成功しており、今後のリキッドバイオプシーとしての実用化が楽しみな内容であった。

### 講演 ② 「ナノポアと機械学習によるエクソソーム表面分子解析技術」

龍崎 奏さん（北海道大学大学院理学研究院 准教授）

ナノポアと機械学習を用いたエクソソームの1粒子解析技術についてご講演いただいた。龍崎さんは、ナノポアの微細加工や電気回路の設計から、機械学習による高効率かつ高精度な解析手法の開発に至るまで、ソフト・ハードの両面で技術開発を行っており、工学技術として大変興味深い内容であった。また、得られる情報も粒子の大きさや形状などの物理的なものだけに留まらず、表面を覆っているタンパク質の種類が判別できる可能性も見出されており、今後の応用・発展が



非常に楽しみな内容であった。

### 講演 ③ 「ウェルアレイチップを用いた1細胞分泌機能解析」

白崎 善隆さん (東京大学大学院薬学系研究科 特任助教)

細胞からエクソソームが分泌される様子を可視化するためのウェルアレイチップの開発について最新の成果をご紹介いただいた。1細胞からエクソソームが分泌される様子がほぼリアルタイムに可視化できており、非常に興味深い内容であった。今後、エクソソームをはじめとする、種々の細胞外微粒子の解析において非常に有用なツールになることが期待される内容であった。

## 2・2 第2回 バイオ単分子研究会 at 鳥羽

第2回バイオ単分子研究会は、外部講演5名を含む総勢16名で開催した(オンサイト-オンラインのハイブリッド開催としては初/ハイブリッド開催であったが、作原さんのご尽力により滞りなく進行することができた)。また、本研究会では、「細胞内1分子計測」、「分子進化」、「タンパク質デザイン」の3つのトピックスについて外部演者に最新の成果をご紹介いただくとともに、それらをベースとした熱い議論が交わされた。また、講演後、伊勢の食事/温泉を堪能しながら、研究談義は深夜まで続いた。



第2回バイオ単分子研究会@鳥羽での記念撮影

## ➤ 細胞内1分子計測

### 講演 ① 「mRNA・翻訳・RNA 結合タンパク質の三者を単分子感度で細胞内イメージングする」

小林 穂高さん（東京大学定量生命科学研究所 特任講師）

転写・翻訳に至るセントラルドグマに関連する因子の細胞内1分子計測技術について最新の成果をご紹介いただいた。細胞内での転写・翻訳の1分子計測は非常にチャレンジングであるが、小林さんが如何に緻密に実験系を構築したのか丁寧にご説明いただき大変勉強になった。今後も本研究会と連携できる可能性を模索したい。

## ➤ 分子進化

### 講演 ① 「自己複製分子を深化させると何が起こるのか?」

市橋 伯一さん（東京大学大学院総合文化研究科 教授）

人工ゲノムと無細胞転写翻訳系を組み合わせた長期進化実験についての最新の成果をご紹介いただいた。進化の過程で、どのようにして多様性や複雑性が自発的に生じるのか明解な結果が得られており、市橋さんが提唱される生命の起源についてのコンセプトも併せて、非常に興味深い内容であった。

### 講演 ② 「古代タンパク質の初期進化過程の再構成」

田上 俊輔さん（理化学研究所生命機能科学研究センター チームリーダー）

タンパク質は20種類のアミノ酸が連なってできている機能分子である。田上さんは、最小限の種類と数のアミノ酸を用いて古代のタンパク質構造モチーフを再現することに成功しており、最新の成果についてご紹介いただいた。今回ご紹介いただいた成果では、7種類のアミノ酸で再現しており、それらが遺伝暗号表の特定の位置に固まっていることから、古代から現代にいたるタンパク質の進化過程についてのコンセプトをご提示いただき、非常に興味深い内容であった。

## ➤ タンパク質デザイン

### 講演 ① 「バイオナノポアを用いた核酸・ペプチド断片の単分子計測」

川野 竜司さん（東京農工大学工学研究院 教授）

昨今、ナノポアにより、DNAの配列の解読をはじめとする、様々なバイオ分析分野に革新が起きつつある。川野さんは、人工ペプチドを用いたバイオナノポア的设计・開発の第一人者であり、完全な人工ペプチドから、天然物の配列を模倣したものまで、様々な最新のナノポアをご紹介いただいた。非常に興味深い内容であり、今後の基礎・応用での飛躍的な発展が期待されるもので

あった。

## 講演 ② 「ポンプ様イオンチャネル型ロドプシンが照らし出すもの」

加藤 英明さん（東京大学大学院総合文化研究科 准教授）

構造解析に基づいた合理改変により、近年、様々な光遺伝学ツールが開発されている。加藤さんは、ポンプ様イオンチャネル型ロドプシンの構造解析/光遺伝学ツール開発の第一人者であり、赤外線で応答する光遺伝学ツールなどの最新の成果をご紹介いただいた。構造解析とそれに立脚した合理改変は非常に強力な研究手法であり、今後も様々な光遺伝学ツールが開発され、基礎・応用での比較的な発展が期待されるものであった。

### 3. さいごに

今年度はオンサイトの研究会を盛況に終えることができ、昨年度以上の異分野交流を実現できたと思う。ご支援いただいた、作原さんをはじめとするATI 関係者の皆さまに御礼申し上げます。来年度も尚一層の若手研究者の異分野交流を計るとともに、新しい研究シーズを生み出す素地ができればと考えている。今後もバイオ単分子研究会へのご支援をよろしく願いいたします。

## 32 研究会開催記録

【第1回】 2022年10月6-7日（木-金） ホテルリゾートピア熱海（宿泊）開催

テーマ：「タンパク質分子の操作・観測技術」

1. 「タンパク質分子の包接プラットフォーム開発」

京都大学 高等研究院

藤田 大士

2. 「進化分子工学がもたらしたセンサ工学と酵素工学の邂逅」

早稲田大学先進理工学部

梅野 太輔\*

3. 「染色体凝縮タンパク質「コンデンシン」の単分子イメージング」

京都大学大学院 理学系研究科

寺川 剛\*

テーマ：「ナノマイクロシステムによる革新的単分子・細胞解析」

1. 「マイクロシステムを用いた単分子・細胞検出」

東京大学 生産技術研究所

金 秀炫

2. 「ナノポアと機械学習によるエクソソーム表面分子解析技術」

北海道大学大学院 理学研究院

龍崎 奏\*

3. 「ウェルアレイチップを用いた1細胞分泌機能解析」

東京大学大学院 薬学系研究科

白崎 善隆\*

参加者 16名（会員11名、会員外5名）

【第2回】 2023年2月6-7日（月-火） エクシブ鳥羽（宿泊）

（ハイブリッド）開催

テーマ：「細胞内1分子計測」

1. 「mRNA・翻訳・RNA結合タンパク質の三者を単分子感度で細胞内イメージングする」

東京大学 定量生命科学研究所

小林 穂高\*

テーマ：「分子進化」

2. 「自己複製分子を深化させると何が起こるのか？」

東京大学大学院 総合文化研究科

市橋 伯一\*

3. 「古代タンパク質の初期進化過程の再構成」

理化学研究所 生命機能科学研究

田上 俊輔\*

テーマ：「タンパク質デザイン」

1. 「バイオナノポアを用いた核酸・ペプチド断片の単分子計測」

- 東京農工大 工学研究院生命機能科学部門  
2. 「ポンプ様イオンチャネル型ロドプシンが照らし出すもの」  
東京大学大学院 総合文化研究科
- 川野 竜司\*  
加藤英明\*

※印は会員外の講演者、敬称略

参加者 15名（会員9名、会員外6名）

## バイオ単分子研究会員名簿

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 研究会委員長
岡崎圭一	分子科学研究所 計算科学研究センター	准教授
Soo Hyeon Kim	東京大学 生産技術研究所	講師
久保稔	兵庫県立大学大学院 理学研究科	教授
古賀信康	大阪大学 蛋白質研究所	教授
古寺哲幸	金沢大学 ナノ生命科学研究所	教授
小松徹	東京大学 薬学系研究科	助教
曾和義幸	法政大学 生命科学部	教授
中村彰彦	静岡大学 農学部応用生命科学科	准教授
西増弘志	東京大学 先端科学技術研究センター	教授
藤田大士	京都大学 高等研究院	准教授
柳川正隆	理化学研究所 開拓研究本部	研究員

2023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 特別主幹教授

### 1. 研究構想：力触覚について

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」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。

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。

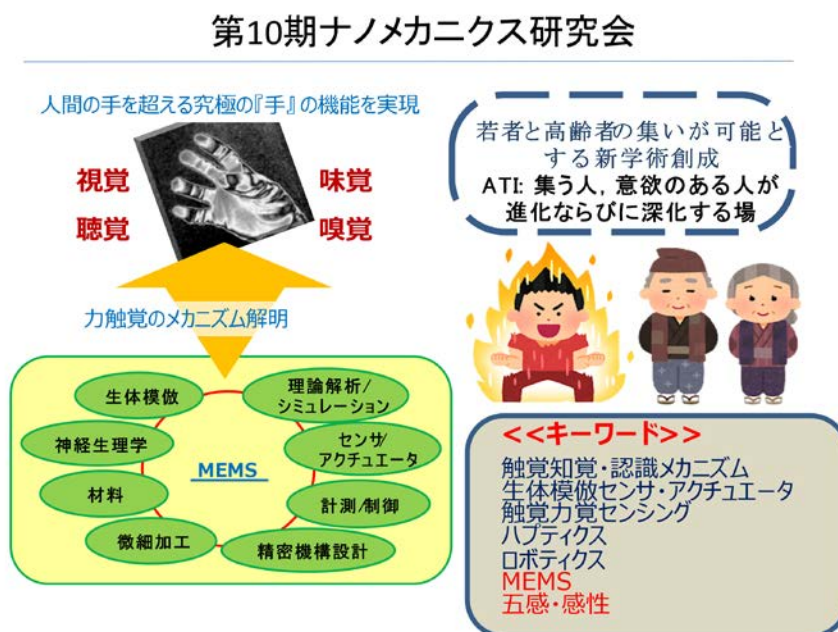


図1 人間の手を超える試み

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。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。

2021 年に第 10 期（当研究会では第 2 期）に移るにあたり、8 月に今後の方針や要望に関する調査を研究会メンバーに行った。「有識者を招いての講演を聴く機会は貴重な機会」「本関連テーマに対して関連の講演していただくことは良い」「まとまった話を伺うのは、学会の限られた時間で実施される講演会とは異なり、普段より深く理解できた」「研究室の見学ができれば、現物を見ることができ、いろいろなイメージがわく」「今後の調査と新分野開拓に資すると考えられる分野について委員からの内容紹介や、専門家を招き講演していただくことを継続することを第一にしたい」等々、おおむね現状の進め方で良いとの感触を得た。その上で、さらなる拡張を図るために力触覚を含む形で「五感」というキーワードも追加した。また、意外なことに、ナノメカニクスに必須の科学技術である MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) をキーワードとして意識しておらず、本年度は MEMS にも焦点を当てた。

## 2. 2022 年度の研究活動の概要

2021 年度に続き、講演を中心とした研究会を開催した。本年度はコロナもやや収まったため、リアル開催とした。結果、8 月に「最新の MEMS—その驚きの技術」と題し東北大学大学院工学研究科 田中秀治教授に、ならびに「やわらかいロボットのシステム理論」と題し筑波大学システム情報系 望山 洋教授に講演を賜り、活発な意見交換がなされた。

田中講師は教科書からは分からない MEMS の最新技術を紹介された。動きを検知する慣性センサ、ジャイロセンサ、スマートフォンのマイクロフォンや（階段の昇り降りも検知できる）気圧センサ、無線通信システムにも MEMS が使われている。TWS (True Wireless Stereo) イヤホン、スマートウォッチ、AI (Artificial Intelligence) スピーカー、自動車、家電機器、ドローン、ロボット、医療機器など、今や MEMS はありとあらゆる所で使われている。それは MEMS の高性能化と低コスト化に依るところがあるが、新しい MEMS が登場しているからでもある。本講演では、このような MEMS の最新技



術を概観し、どのように機能するのか、その大事な点はどこにあるのかなどを、MEMS 業界の状況を交えながら解説がなされた。

## 多様で全体像を捉えにくいMEMS



図2 至る所で活躍している MEMS

続いて、望山講師からは“やわらかい”ロボットの歴史を振り返りながら、やわらかさを生かしたアクチュエーション、センシング、マニピュレーション、さらにはそれらを支えるシステム理論への挑戦が紹介された。産業分野における 20 世紀末のロボティクスの偉大な成功は、“かたい”ロボットによって成し遂げられた、と言えよう。“かたい”ロボットとはタスクの達成に必要な最小限の運動学自由度をもち、すべての関節に十分大きな力とトルクを発揮できるアクチュエータを配置した機構を有するロボットのことである。“かたい”ロボットは正確な位置決めができる機構を前提としているため、その制御方策を独立に考えることができた。これら“かたい”ロボットは人間では容易でない素早く・正確な動きを成し遂げて、大量生産時代のオートメーションを支えてきた。しかし、“かたい”ロボットは、人間やその他の動物にとっては日常的な、周囲の環境や物体との衝突があるようなタスクには不向きである。そこで、現れた概念が“やわらかい”ロボットに他ならない。講演では、極めて大きな運動学的自由度をもつ“やわらかい”ロボットの身体を制御する方法について最新の研究成果が紹介された。

11 月は本研究会の記念すべき初の温泉での研究会開催であった。会場は JR 長野駅か

ら1時間足らずの信州飯綱高原の標高1000mに位置する富士通労働組合総合センターである。講師には長野に縁の深いお二方をお願いした。



図3 会場玄関横での記念撮影

「柔軟物操作のためのロボティクス」と題し信州大学先鋭領域融合研究群、工学部機械システム工学科の山崎公俊教授に、ならびに「信州清酒とアルプス酵母スペシャルブレンドへの道」と題し株式会社発酵長寿研究所の蟻川幸彦代表取締役から講演を戴いた。

山崎講師からは、衣類や寝具を初めとした布製品などの柔軟物操作に関する研究の紹介がなされた。衣類の洗濯や収納などのメンテナンスは日々の作業である。剛体とは

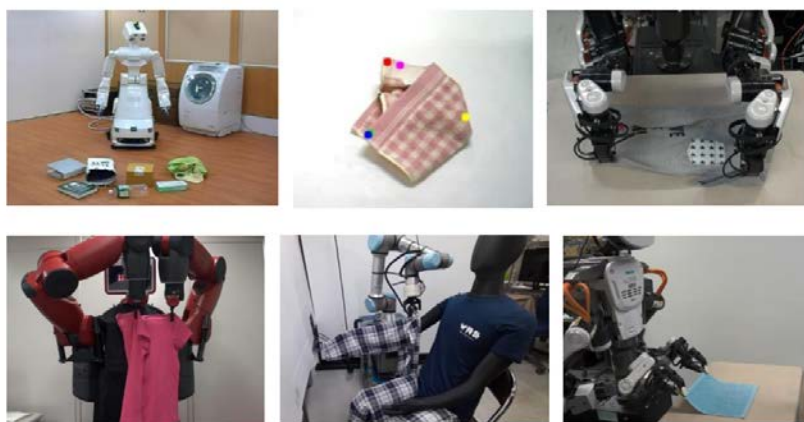


図4 柔軟物操作の研究事例

異なり様々な形状をとりうる布製品に関わる作業を自動化するには、その性質に対応

した方式を採ることが求められる。そのため布のふるまいを記述可能なモデル（知識表現）を定義し、そのモデルを布の状態推定や状態予測、およびロボットの動作計画へ活用していく方式や今後の方向性について講師の考えが述べられた。

蟻川講師からは、信州清酒とアルプス酵母スペシャルブレンドについて熱のこもった講演を戴いた。(1)信州（長野県）には80以上の酒蔵があり、その数は新潟県に次いで全国2番目、(2)ブランド力向上に向けた取り組みの一環として、全国新酒鑑評会での金賞数第一位をとることを目的に「日本酒 No. 1 プロジェクト」を実施し、2021年にその目標を達成、(3)長野県独自の酵母を育種することで品質の向上やブランドの確立を目指し、吟醸酒用酵母の魁「アルプス酵母（長野酵母 C）」（平成元年）、カプロン酸エチル生産性を向上させた長野酵母 D（平成20年）、ふくらみのある香りと酸味の味わいが特徴の「長野酵母 R（令和元年、育種年は平成12年）」の育種に成功、これら3種類の酵母はいずれも蟻川講師が育種されたものとのこと。講演がお酒、ならびに日本文化にまつわる話であったため、質問が殺到し、続く自由時間、そして懇談会まで活発な意見交換がなされた。また懇談会では蟻川講師のご厚意で清酒アルプス酵母ブレンドが振る舞われた。



図5 (株)発酵長寿研究所

### 3. 2023年度活動計画

本研究会の特徴は出口指向にあり、社会貢献を目指す。2022年度は有識者による対面での講演の場を設け、予定通り異分野の研究者が忌憚のない意見交換をすることができた。どの講演も得るところが多々あり、当研究会もようやく軌道に乗ってきた感じがした。2023年度は第10期（当研究会では第2期）の最終年度に当たるため、続く第11期に向け、方針を定め、さらなる充実を図りたい。

## 研究会開催記録

【第1回】2022年8月5日(金) 御茶ノ水トライエッジカンファレンス開催

1. 「最新のMEMS－その驚きの技術」

東北大学大学院 工学研究科

田中 秀治\*

2. 「やわらかいロボットのシステム理論」

筑波大学 システム情報系

望山 洋\*

※印は会員外の講演者、敬称略

参加者 16名 (会員7名、会員外9名)

【第2回】2022年11月27-28日(日-月) 富士通労働組合総合センター(宿泊)開催

1. 「柔軟物操作のためのロボティクス」

信州大学 先鋭領域融合研究群 社会基盤研究所

信州大学工学部 機械システム工学科

山崎 公俊\*

2. 「信州清酒とアルプス酵母スペシャルブレンドへの道」

株式会社発酵長寿研究所

蟻川 幸彦\*

※印は会員外の講演者、敬称略

参加者 12名 (会員8名、会員外4名)

## 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
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	部長

2022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>

