

研究報告書

-2017年度研究会活動-

第25回 研究報告会

2018年7月10日

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

ナノカーボン研究会

ナノカーボン、次の一手

委員長 片浦 弘道

産業技術総合研究所 首席研究員

1. 研究構想

ナノカーボンとは、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炭素材料であり、「ナノ」が引き出す魅力的な物性を示す。特に炭素sp²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(1次元)、グラフェン(2次元)等、多彩な新材料群が見出され、その優れた基礎物性から次世代半導体材料などとして期待されている。これらナノカーボン材料の合成・精製技術の近年の進展は著しく、特定の原子配列の構造体の合成や分離精製も可能になってきており、その物性解明も進みつつある。しかし、多彩な物性の本質的な理解にはたどり着いておらず、それ故にその応用展開も制限されている。

本研究会では、この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、既存の分野カテゴリーにとらわれること無く、広く調査研究を行い、科学・技術の発展への貢献を目指す。構成委員を中心に、招待講演者も加えた研究会を開催し、討論に十分な時間を確保することにより、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。気鋭の若手研究者の積極的参加を促し、ナノカーボン材料研究のさらなる発展を目指す。

2. 2017年度活動の概要

まだ、私が都立大の助手になりたての頃、研究室所属の卒研究生が教員に文句を言っていた。「この測定が終わったら、もう実験は終わりだって言ってたじゃないですか！」そう、かなり大変な測定が終わったところで、実験を追加されたのだ。それに対して担当教員は一言、「研究には、これで終わりってものは無いんだ。」もちろん、学生は全く納得しなかったが、プロの研究者になりたてだった私は、なるほどそういうものかと意外にも感慨深く思ったものだ。昨今の大学では、こんなやり取りはご法度なのかも知れないが、当時はまあ普通だった。その証拠に当該学生は、修士まで進学した。そこで彼が研究の深淵に触れたかどうかは良くわからない。その後も彼は類似の文句を繰り返していたからだ。まあ、それはともかく、確かに研究には終わりが無い。何か一つ解決すれば、次の疑問が湧き上がる。これは、言い換えれば次の楽しみが生まれるということだ。研究者はその新たなネタを楽しみたいと思う。しかし、それを楽しむ原資には限りがある。研究を続けるのは、実はそれほど楽ではない。

ナノカーボン研究会の委員長を拝命して3年が過ぎ、2017年度で一期目が終了した。同年度、齋藤先生の率いる新学術領域「原子層科学」が数多くの成果とともに幕をおろ

した。私の基盤 S も同時に終了した。いろいろな節目となった 2017 年度であった。大型予算が終了すると、それに専属で従事していたポストクなどは、得られた成果を手
に、新たな職を探して旅立って行く。一方、我々プロの研究者は次のプロジェクトを立
ち上げなければならない。終わりは始まりでもある。そこで常に考えているのが「次の
一手」だ。以前、友人の将棋指しに聞いたところ、アマチュアでも 100 手くらいは読
むという。おそらく、優秀なプロの研究者なら、研究でもかなり先読みするのも知れ
ない。しかし、私はせいぜい次の一手だ。次の 3 年から 5 年間しのげる研究費があれば、
その間に何か成果が上がり、その次のネタができるでしょうと気楽に考えて、いままで
何とか凌いで来た。しかし、ナノチューブ発見から 25 周年、状況はなかなか厳しくな
ってきた。

新材料の発見から、それが実際に社会に出ていくまでには、基礎研究のあと、応用、
用途開発、実用化、製品開発、商品化・社会実装(?) と、何通りもの言葉で表現され
る「応用研究」がある。ナノカーボン材料は発見から今日まで歴史が浅く、いかに研究
のスピードが上がった今日でも、まだお店で買う日用品に使われている例は殆ど無い。
私の持論として、今後永久に人類に貢献する見込みのない研究は、たとえそれが純粋な
科学であっても税金でサポートしてもらうことはできないと考えている。社会貢献の無
い研究は、自費で行うべきである。税金で研究を行うなら、それがたとえ 1000 年後で
あったとしても、人類に貢献するという明確なビジョンがなければならない。その点、
ナノカーボン材料はポテンシャルの高い新材料として、多くの注目を集め、順調な進展
を見せてきた。しかし最近、類似のプレスリリースが繰り返されるたび、報道に関わる
方々からは、「今回は前回とどこが違うんですか？」と聞かれるほど、研究には停滞感
があるのも事実だ。研究のスピード感は、まっとうな状態だと当事者からすれば思うの
だが、発見当初話題になったぶん、そのつけが回ってきたという側面もあり、将来役に
立つ新素材という看板はもう効果を発揮しなくなりつつある。すぐにでも役に立つのだ
が、その前にもう少しだけやることがある。そんな気持ちで、応用の細かな段階に名前
をつけたのが、上記の多様な応用研究の名称なのではないだろうか。

このような状況で、ナノカーボン材料の研究環境を維持するには、もう少し真剣にな
って、実用化の検討を進める必要がある。産総研では、その名の通り「ナノチューブ実
用化研究センター」なるものを発足させ、実用化を目指した研究を行っているが、近未
来の実用化を目指すあまり、ハードルの高い電子デバイス応用についてはあまり取り扱
っていない。米国でナノチューブの集積回路を試作する若手研究者がいるのと対比的で
ある。そこで、ナノカーボン研究会では、電子デバイス応用がより進んでいる有機半導
体の代表的研究者を講師として招聘し、有機デバイスはどこまで進んでいるか、何が長
所で何が欠点か、本当に実用化が進むのかなど、基本的なことを勉強させていただくこ
とにした。ライバルを学ぶというわけだ。例年、夏と冬に研究会を開催しているが、2017
年度は夏の蔵王での研究会に、東京大学の竹谷先生をお呼びした。一方、冬の研究会で

は、メンバーの先生方をお願いしようと言うことで、研究会のテーマを「次の一手」と題し、知恵を出し合うこととした。

3. 8期活動の総括（成果と今後）

3. 1 2017年度の活動

3. 1. 1 第一回研究会「蔵王17研究会」

今やナノカーボン研究会の恒例行事となった、蔵王研究会である。宿の手配は東北大の齋藤先生をお願いしており、その他のことはATIの方々がやっていただけるので、私はただお客さんのように仙台駅に向かうのみで、後はホテルのバスが送迎してくれる、私にとっては大変楽ちんな会議となっている。今回の研究会は、いつもと異なる2つの取り組みを行なった。一つは、外部から講師をお招きして、有機半導体のデバイス応用について、講義していただくこと。もう一つは、メンバー全員が話題提供するのではなく、数名の講師の先生を決めて、通常よりも長く時間をとって講演していただき、ゆっくり議論するということである。外部の先生にも講義をお願いするので、講義3件と若手研究者15名による各15分のプレゼンという、やや変則的な構成となった。参加した若手研究者としては、3名の先生の講義を受け、自らも研究発表するという感じで、なかなか良い構成のようにも思う。なお、発表言語は例年通り英語である。以下、具体的なトピックに触れる。

Junichi Takeya, *Charge transport and integrated circuits of organic semiconductors*

東京大学の竹谷先生による有機半導体による集積回路の実用化直前の話題である。有機半導体といえば、基本的に絶縁体であるから、トランジスタを作製した場合、基本的にOFF動作は良いが、ON電流を確保するのが難しそうという印象があった。高移動度のデバイスも報告はあるが、それは微小な単結晶を使ったもので、大面積の薄膜デバイスとして用いる実用デバイスとは別物の、研究目的のものであると考えていた。したがって、有機デバイスは極めて低速動作で耐久性も無いと。しかし、竹谷先生の示された内容は大きく異なっていた。まず、有機半導体の伝導メカニズムを真面目に考察し、どのような素材が望ましいか検討し、その素材をインチサイズの薄膜状に単結晶化する簡便な手法を考案し、その単結晶薄膜を使って集積回路を作製するという、想像を遥かに超えたハイレベルの成果を披露された。移動度は $16 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ に達するという。この値は、確かにナノチューブのチャンピオンデータと比較すると二桁程度低いということになるが、実際にナノチューブで薄膜デバイスを作製すると、この値と大きく変わらない移動度のトランジスタしかできない。ナノチューブを使ったとしても、この移動度を大きく上回るトランジスタを作製するのは決して容易ではないのだ。しかも、ナノチューブのトランジスタの特性は、ナノチューブ薄膜内のネットワーク構造に大きく依存するため、安定して特性を再現するのは容易ではない。それに比べ、有機半導体では単結晶を用いているため、単結晶作製技術が確立されれば、デバイス特性は安定化する。これは遥か

に扱いやすいと感じた。乱暴な話、有機デバイスの場合、きれいな薄膜状の単結晶さえできてしまえば、後は通常の技術で集積回路の作り込みが可能はずである。実際に実用レベルに近い集積回路を作製し、製品レベルの耐久性テストも行っているとの事であった。

こうなると、ナノカーボン陣はおちおちしてられないという感じである。ナノカーボン材料の「売り」はディラックコーンで象徴される電子状態に由来する高い移動度である。Si を遥かに上回る移動度が、次世代デバイスに有効であると主張している。しかし、実際のナノカーボン材料は問題だらけである。驚異的な移動度を示すグラフェンは、肝心のギャップが開かないため、デバイスにすらならない。有意なギャップが開くカーボンナノチューブは、少し構造が変われば金属になってしまい、チャンネルがショートしてしまう。うまく半導体型を分離するには、超音波で粉々に分散する必要がある、この処理で欠陥が導入されると、肝心の移動度が下がってしまうという、ジレンマがある。では、合成時に構造を制御し、半導体型のナノチューブだけ製造できるかという、可能性は見て来ているが、まだまだ実用化は遠い。他の二次元材料で、すぐに使える物があるかという、思いつかない。このような体たらくでも、なんとなく安心していただけなのは、有機半導体よりは移動度が高く、有益な材料だと信じていたからである。しかし、敵も昼寝をしていたわけでは無かったということだ。こうなると、ナノカーボン材料の得意技、高移動度で攻めるしか無い。そのための戦略は……温泉に浸かりながら考えたのであった。



蔵王 17 研究会 竹谷先生の講義風景

Susumu Saito, *Donors, acceptors, and their ionization energies in 1D and 2D B-C-N atomic-layer semiconductors: Band-structure engineering via electron correlation and interaction between impurities*

東工大の斎藤晋先生からの話題提供である。斎藤先生は、話題が豊富であり、通常の講演時間ではいつも時間が足りず、お互いに満足の行く議論ができないという印象であったため、今回 1 時間の時間を設定し、じっくりお話を伺った。理論家の先生の話が英語で聞くのは、私には結構骨が折れる作業である。頂いたプレゼン資料を見直しながらい印象に残ったところを紹介すると、「不純物準位とは何か？」という問いかけである。第一原理計算を用いて、カーボンナノチューブの構造で、1 個の炭素をホウ素に置き換

えて計算してみる。炭素数40個で計算すると、 C_{40} と BC_{39} では、全然違うバンド構造になる。次に炭素数を倍の80個に増やしてみる。 C_{80} は当然 C_{40} と変わらない。 BC_{79} は、少し C_{40} のバンド構造に近づいてくる。また少し炭素数を増やす。こうして比較していくと、徐々に純粋炭素によるナノチューブのバンド構造に近づいていくが、外挿した先は、純粋炭素によるナノチューブとは異なる値になっている。これが不純物準位だという議論である。この議論は私には非常に馴染みやすかった。しかし、それ以上に興味深かったのは、頻出する不純物準位という概念は、実は必ずしも確立したものでは無かったという事である。今度は、日本語でじっくり講演していただきたいと思った。

Masako Yudasaka, *Near-Infrared Photoluminescent Carbon Nanotubes for Imaging of Brown Fat*

産総研の湯田坂先生による、カーボンナノチューブを使った褐色脂肪組織の近赤外蛍光造影の話題である。この話も非常に面白いので、是非じっくり聞かせていただきたいと思ってお願いしたのだが、英語での講演というのが、思った以上に大きな障害になった。この話題ではバイオ関連の用語が多数登場するが、会場のメンバー、若手研究者の多くが無機系の研究者であり、バイオ系の専門用語に疎いのだ。日本語ならある程度知っているバイオ系の用語も英語になると語彙力が足りない。もちろん、湯田坂先生も事情は良くご存知なので、逐次日本語訳付きでご講演頂いたが、難解であった。とはいえ、海外からの若手研究者には、なかなか良い刺激になったのではないかと考えている。内容は、カーボンナノチューブで、褐色脂肪組織が選択的に光るという話なのだが、これがどれほど面白いのかは、まずネットで褐色脂肪組織と、メタボリックシンドロームで検索すると良い。

3. 1. 2 第二回研究会（野地温泉）「次の一手」

2018年2月には「次の一手」と題した第二回研究会を野地温泉で開催した。通常の形式に戻し、各メンバーから次の一手につながる話題提供をしていただいた。東北大の齋藤先生のところは、学生の辰巳さんから光のヘリシティとラマン散乱に関する話題をいただいた。光の持つ角運動量が物質との間でやり取りされるという話で、非常に興味深い話であった。理論は難解だったが、実験的に簡単に検証できるということで、なかなか面白そうである。一方、名大の北浦先生によれば、新しい材料が新しい研究分野を開拓するはずで、今や原子層材料の人工ヘテロ接合は数え切れないほど多様な種類合成可能になっているので、数えきれないほどの研究課題があるとの、非常に頼もしい意見をいただいた。理科大の本間先生は、ピラーに架橋した一本のナノチューブのラマン散乱の偏光依存性からフォノン物性を真面目に解析し、こういった真面目な研究の先に、次の一手となる新たな課題が見えてくるとの見解を述べられた。榎先生はちょうどPhys. Rev. Appliedのドレッセルハウス先生の特集号の論文がアクセプトされたところということで、その内容をご紹介いただいた。ナノグラフェンベースのマイクロポアに、小

さなヘリウム原子が侵入して、磁性が大きく影響を受けるという現象から、He 検出という応用を提案したという、かなり難産の論文のご紹介だった。まさに純粋な科学も切り口を考えれば、ちゃんと応用につながるという例で、この辺のバランスが難しい。名大の大野先生からは、ナノチューブによるアナログ集積回路の話題であった。ナノチューブの次の一手となるべき大本命の課題であると期待している。ナノチューブは、素材としてはいろいろ問題があるが、大野先生の手にかかれば、そこそこ動くデバイスができるという例を見せていただいた。しかし、半導体ナノチューブの移動度が低いという問題が浮き彫りとなった。富士通の大淵先生は、ナノチューブと界面活性剤の相互作用を第一原理計算で求めた例を示していただいた。まさに、産総研で進めている分離技術の援護射撃である。若林先生には、ベリー曲率という、なにやら難しい概念を教わったように記憶しているが、定かでない。こういう講演は、研究資金の獲得の話題で凝り固まった脳みそをもみほぐしてくれる作用があり、少し爽やかな気分させてくれる。やはり、科学はたとえ理解できなくても楽しい。

以上、駆け足で紹介したが、結局次の一手は自分の足元にあるということなのだと思う。ナノカーボン材料が世の中に認められるかどうかは、世の中が決めることであり、自分は自分のできるベストを尽くすしか無いなどと、まるで高校球児のような感想で締めくくるのであった。



第二回研究会 熱心に議論

3. 2 8期活動の総括と今後

個人的には元気の無い状況でスタートした8期であったが、徐々に元気を取り戻し、何とか乗り切る事ができた。勢いが落ちてきた事を否めないナノカーボン材料、その一方でますます多彩さを増す原子層材料。応用で勢いを増すライバル勢。ナノ材料は確実に進歩しているが、実用化という課題を突きつけられると、なかなか思うように技を繰り出すことができない。しかし、委員の先生方の協力のもと、課題は浮き彫りになったように思う。次期には、次の一手を何とか具現化したい。そのために、このナノカーボン研究会を大いに利用させていただこうと考えている。まずは蔵王でスタートする。

研究会開催記録

【第1回】2017年8月9日(水)–10日(木) 山形県山形市蔵王温泉

8月9日(水)

Invited talk:

1. Donors and acceptors and their ionization energies in 1D and 2D B-C-N atomic-layer semiconductors: Band-structure engineering via electron correlation and interaction between impurities

Susumu Saito, Tokyo Institute of Technology

2. Charge transport and integrated circuits of organic semiconductors

Junichi Takeya, The University of Tokyo

Contributed talk:

1. Controlling vibrational modes by ultrafast laser pulses

A. R. T. Nugraha, Tohoku University

2. Effect of charge accumulation at domain boundaries on band bending in MoS₂

Tomoaki Kaneko, Tohoku University

3. Photon Reabsorption Effect in Optical Measurements of Single-Wall Carbon Nanotubes

Xiaojun Wei, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

4. Development of high performance gels for metal/ semiconductor separation of SWCNTs

Guowei Wang, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

5. Magnetic susceptibility in two-dimensional electron gas with Rashba and Dresselhaus spin-orbit coupling

Intan F. Hizbullah, Tohoku University

6. Optical properties of multilayer dielectric stacks

M. Shoufie Ukhtary, Tohoku University

7. Theory of exciton effect by most localized Wannier function

Toshiya Shirakura, Tohoku University

8月10日(木)

Invited talk:

3. Near-Infrared Photoluminescent Carbon Nanotubes for Imaging of Brown Fat

Masako Yudasaka, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

Contributed talk:

8. Field-effect transistors using horizontally-aligned SWCNTs

Taiki Inoue, The University of Tokyo

9. Interlayer excitons in high-quality MoS₂/WS₂ vertical heterostructures

Tetsuki Saito, Tokyo Metropolitan University

10. Helicity-exchange of first-order Raman spectra in graphene and TMDs

Yuki Tatsumi, Tohoku University

11. Valley polarization of hexagonal lattice by broken inversion symmetry

Kazu Ghalamkari, Tohoku University

12. Molecular Beam Epitaxy growth of transition metal dichalcogenide atomic layers

Takato Hotta, Nagoya University

13. Thermoelectric properties of WS₂ nanotube networks

Yohei Yomogida, Tokyo Metropolitan University

14. Is there an upper limit of thermoelectric figure-of-merit?

Nguyen T. Hung, Tohoku University

15. Theory and simulation of near-field enhanced Raman spectroscopy

Fenda R. Pratama, Tohoku University

【第2回】2018年2月12日(月)–13日(火) 福島県福島市野地温泉

テーマ：「次の一手」

1. 「光のヘリシティに依存したレイリー散乱およびラマン散乱の角運動量保存則」

辰巳 由樹 (東北大学大学院理学研究科 PD)

2. 「経済産業省への一年間の出向を振り返って」

田中 丈士 (産業技術総合研究所)

3. 「TMDC 原子層ヘテロ構造の光学応答」

北浦 良 (名古屋大学)

4. 「単一架橋 CNT を用いたラマン分光：CNT フォノン物性再考」

本間 芳和 (東京理科大学)

5. 「CNT バイオプローブが示す血管構造変化」

湯田坂 雅子 (産業技術総合研究所)

6. 「ウェアラブルセンサの実現に向けた柔軟なカーボンナノチューブアナログ集積回路の設計と試作」

大野 雄高 (名古屋大学)

7. 「Topological States in absence of Berry Curvature」

若林 克法 (関西学院大学)

8. 「カーボンナノチューブと分子の相互作用」

大淵 真理 ((株) 富士通研究所)

9. 「Magnetism of nanographene-based microporous carbon and its applications: Interplay of edge geometry and chemistry details in the edge state」

榎 敏明 (東京工業大学)

10. 「カーボンナノチューブの分離：次の一手？」

片浦 弘道 (産業技術総合研究所)

ナノカーボン研究会員名簿

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

2018年3月現在