



技報



K O M A K U S A ・ 2019.10 ・

巻頭言

一般財団法人信州大学工学部若里会 副理事長 清水 茂



低環境負荷光電子材料に向けた炭素系化合物半導体材料の開発

電子情報システム工学科 浦上 法之

固溶体光触媒粉末の組成・構造制御による近赤外応答型光カソードの高性能化

物質化学科 影島 洋介

研究室紹介

電気化学反応の現象理解とそれを活かしたものづくり

応用電気化学研究室(新井・清水研究室)の紹介

物質化学科 教授 新井 進

物質化学科 助教 清水 雅裕

学習支援工学研究室(香山研究室)の紹介

電子情報システム工学科 教授 香山 瑞恵

竹内研究室紹介

水環境・土木工学科 准教授 竹内 健司

構造力学研究室(亀山研究室)の紹介

機械システム工学科 准教授 亀山 正樹

歴史的組積造建造物の実験・解析

建築学科 助教 遠藤 洋平

No.17

目 次

巻頭言

／一般財団法人信州大学工学部若里会 副理事長 清水 茂	1
-----------------------------------	---

研究助成報告

低環境負荷光電子材料に向けた炭素系化合物半導体材料の開発 ／電子情報システム工学科 浦上 法之	2
--	---

固溶体光触媒粉末の組成・構造制御による近赤外応答型光カソードの高性能化 ／物質化学科 影島 洋介	6
---	---

研究室紹介

電気化学反応の現象理解とそれを活かしたものづくり 応用電気化学研究室（新井・清水研究室）の紹介 ／物質化学科 教授 新井 進 物質化学科 助教 清水 雅裕	11
--	----

学習支援工学研究室（香山研究室）の紹介 ／電子情報システム工学科 教授 香山 瑞恵	12
--	----

竹内研究室紹介 ／水環境・土木工学科 准教授 竹内 健司	15
---------------------------------------	----

構造力学研究室（亀山研究室）の紹介 ／機械システム工学科 准教授 亀山 正樹	16
---	----

歴史的組積造建造物の実験・解析 ／建築学科 助教 遠藤 洋平	19
---	----

巻頭言

一般財団法人信州大学工学部若里会
副理事長 清水 茂

時代が平成から令和に替わって5カ月が過ぎようとしています。

昭和から平成への改元・お代替わりとは異なり、今回は、国全体がお祭り騒ぎの中で迎えることが出来ました。4月1日の新元号発表の瞬間には、東京渋谷など各地の街頭大型ビジョンの前で、大勢の若者が、新元号が墨書された奉書を掲げる官房長官の映像を背景に、スマホの自撮りをしていました。このような場面は30年前の平成の元号発表の時には見られなかった光景です。もっとも、30年前には、街頭の大型ビジョン自体が存在していませんでした。

平成は、しばしば自然災害が多かった時代と言われています。兵庫県南部地震（災害名：阪神淡路大震災）、東北地方太平洋沖地震（同：東日本大震災）のように、『大震災』と呼ばれる地震災害が発生したことを筆頭に、新潟中越地震、鳥取県西部地震、芸予地震、そして熊本地震は記憶に新しい所です。火山災害としては、御岳山の噴火で多数の方が亡くなったほか、平成に入って間もないころの雲仙普賢岳の火砕流災害もありました。水害でも、広島の大土石流を筆頭に、関東・東北豪雨、新潟・福島豪雨、南木曾町や諏訪湖畔の土石流、さらには去年の西日本豪雨がありました。

では、昭和の時代はどうだったでしょう。昭和には、あの戦争という、大災厄～それも人為的な～があったため、平成と比べ、今となっては自然災害についてはあまり語られません。

しかし、昭和にも大きな災害が多数発生しています。地震としては、昭和東南海・南海地震（いわゆる南海トラフ地震の一部）や新潟地震・北海道南西沖地震・日本海中部地震、『震度7』新設のきっかけとなった福井地震など、火山としては伊豆大島や三宅島で全島避難となった噴火災害、風水害としては伊勢湾台風や枕崎台風・室戸台風等々です。さらに県内では木曾に大きな災害をもたらした長野県西部地震、地附山地滑り災害、伊那の三六水害など大きな災害がありました。

そして令和。穏やかな時代であってほしいと思っていた矢先の6月に、新潟・山形を地震が襲い、また、長崎県島しょ部には大雨の特別警報が発表されるなど、やはり、自然災害については先行きを案じられるスタートとなりました。

私は耐震設計を専門分野の一つにし、また、担当している授業では水害についてのトピックも扱っています。研究や授業では、昭和や平成時代に発生した地震を扱うこともしばしばあります。令和の時代には、研究の参考にするような大災害は発生して欲しくない、との思いもありますが、日本という国は、自然災害から逃れることは出来ない事を、身にしみて感じさせられます。

さて、令和という新時代になって初めての、同窓会技術情報誌『こまくさ』をお届けします。

今年の『こまくさ』をパラパラとめくって頂いて、気が付いた方もいるかもしれません。研究室紹介のコーナーで、水環境・土木工学科では初めて、カーボン科学研究所から移籍された先生の研究室が紹介されています。従来からの『土木』のイメージをお持ちの方から見ると、おやっ、と思うかもしれません。

4年前、信州大学工学部は学部の改組を行いました。学科によっては、改組の前後でも、学科の内容や体制に大きな変更がなかったところもあります。しかし、水環境・土木工学科のように、内容も体制も大きく変わったところもあります。また、複数の旧学科が統合され、私立大学顔負け(?)の大学科となったところもあります。その改組から4年目、いよいよ新学科の第1期生が4年生になりました。令和になって初めて社会に送り出すことになる学生は、信大工学部の体制が改組後の現在の形になって初めての学生、という事でもあります。

同窓会会員向けの会報である『若里』は、会員の近況報告など会員相互の情報交換や会員へのお知らせなどが主な内容です。一方、この技報『こまくさ』は、同窓会報『若里』とは異なり、工学部の研究活動などを、(研究者目線ではなく、わかりやすい形で)学内外の方に知って頂くことが大きな目的の一つになっています。そのため、主な配布先も、県内の工業系企業、高校の進路指導室など、学外の組織が主となっています。信州大学工学部も、令和という新時代とともに新たな体制で学生を送り出している・・・この新時代の信州大学工学部にご期待ください。

低環境負荷光電子材料に向けた炭素系化合物半導体材料の開発

信州大学工学部 電子情報システム工学科
浦上 法之



はじめに

電子素子の開発において新機能と高性能化の要請は尽きることなく続いている。近年では人と電子材料が共創する社会を目指し、例えばライフサイエンスなどとの異分野融合の架け橋となる革新的素子への要請も高まっている。特に医学や農業科学などに適合する素子を目指しては、人や自然への調和性を実現する材料開発の元素戦略が重要であり、毒性を含む元素の使用やコストを含めた製造過程での環境への配慮が必要となる。

このような背景の下で筆者らは、豊富な資源のみで構成され安全な化合物である窒化ホウ素炭素 (BCN) に着目している。BCN はグラファイト (C_2) と窒化ホウ素 (BN) の合金 ($(BN)_{1-x}(C_2)_x$) として考えることができ、それらの化学組成比を変化させることで禁制帯幅 (E_g) を 0 ~ 6.4 eV の範囲で制御可能であるため (図 1)、金属、半導体ならびに絶縁体といった電気性質を理論上すべて実現可能である。しかし C_2 と BN の結合エネルギーの違いからそれらの混和性が低く、実際にはそれぞれに近い組成域での実現に留まっている (図 1 の横軸が 0 または 1 付近)。その一方で、低環境負荷材料として炭素 (C) と窒素 (N) から成る半導体のグラファイト状窒化炭素 ($g-C_3N_4$) がある。 $g-C_3N_4$ は六員環を基本構造とした安定な物質であり、メラミンを 600°C 程度で加熱することで容易かつ非常に安価 (5000 円/kg 程度) に得ることが可能である。そのエネルギー準位が水の光分解に適していることから $g-C_3N_4$ の研究対象の多くは稀少金属フリーの光触媒としてあるが、筆者らは $g-C_3N_4$ の半導体性質に着目し、光電子材料として用いるための結晶性膜の形成を実現している。それに加えて $g-C_3N_4$ へ置換型原子を添加することで E_g を 2.7 eV から変調させることを初めて提案し、実際に $g-C_3N_4$ へ B を添加することで BCN の作製に成功している [1]。本稿では、低環境負荷光電子材料を目指した無添加 $g-C_3N_4$ 膜の発光特性および B 添加 $g-C_3N_4$ 膜の組成

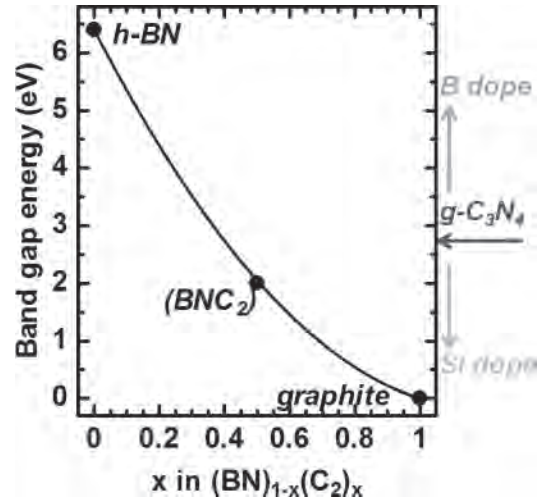


図 1 BCN の C_2 組成に対する E_g の関係

制御に関する知見と発光エネルギーの変化について紹介する。

無添加 $g-C_3N_4$ 膜の発光特性

結晶作製には、独自で構築した熱化学気相堆積 (CVD) 装置を用いた。発光特性の評価には、フォトルミネッセンス (PL) 法を用いた。 $g-C_3N_4$ 膜の室温 PL スペクトルを図 2 に示す。PL スペクトルに対してガウスフィッティングによりピーク分離することで発光起源を特定した結果、PL スペクトルは主に 3 種のピークを含んでいる。 $g-C_3N_4$ 粉末のエネルギーバンド構造を参考に、図 3 に示す様なそれぞれの発光起源は異なった遷移経路であることが分かった [2]。① sp^3 結合した C-N からなる σ バンドの伝導帯と窒素原子の孤立電子対 (lone pair : LP) 準位の間 (σ^*-LP)、② sp^2 結合した C-N からなる π バンドの伝導帯と LP 準位の間 (π^*-LP) および③ sp^2 結合した C-N からなる π バンドの伝導帯と価電子帯の間 ($\pi^*-\pi$)。それらの PL ピークは 2.35、2.59 および 2.88 eV にそれぞれ観測された。

$g-C_3N_4$ 膜の発光メカニズムを考察するために PL の励起強度依存性を検討した。励起強度は $6.2 \times$

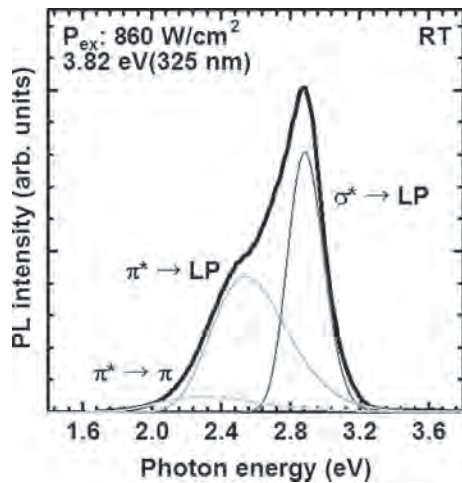


図2 g-C₃N₄ 膜の典型的な PL スペクトル

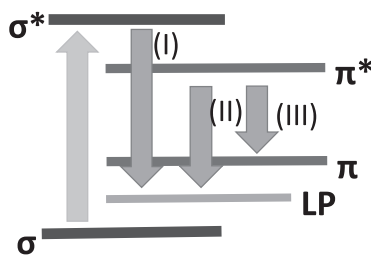


図3 g-C₃N₄ のエネルギーバンド図。σおよびπはそれぞれの結合状態から成るバンドを示し、LPは結晶中のNの未結合手が起源のバンドを示す

10⁻³ から 6.2 × 10³ W cm⁻² と変化させ、光子数を 1.0 × 10¹⁶ から 1.0 × 10²² cm⁻² s⁻¹ と見積もった。ここでは主に σ*-LP 間および π*-LP 間の発光での PL 強度と PL ピーク偏移をそれぞれ観測した。図4に PL 積分強度の励起強度依存性を示す。両遷移経路ともに、PL 強度は励起強度 6.2 × 10² W cm⁻² まで単調に増加した。PL 積分強度 (I_{PL}) は励起強度 (P^a) の関数として、図4に示した実線の関係 ($P^a \propto I_{PL}$) が得られた。その係数 a は、σ*-LP と π*-LP 遷移経路でそれぞれ 0.86 と 0.75 と見積もった。この a の値は 1 に近いほど発光性の再結合が優先的に起きていることが示唆されている。そのため本実験では励起子解離または発光性再結合の過程がこの励起強度内で支配的であると予測される。ただし g-C₃N₄ のエネルギーバンド構造は間接遷移型であるため、一般的に格子振動 (フォノン) の寄与による再結合が優先的に起こるはずである。この理由として、g-C₃N₄ のエネルギーバンド構造内において価電子帯端に近い LP 準位が起因となる局在準位を形成されていると考えられる。これは例えば、N 添加 GaP 中の N の組成揺らぎによる伝導帯端の局在状態の形成と同様の振る舞いであると予測される [3]。N

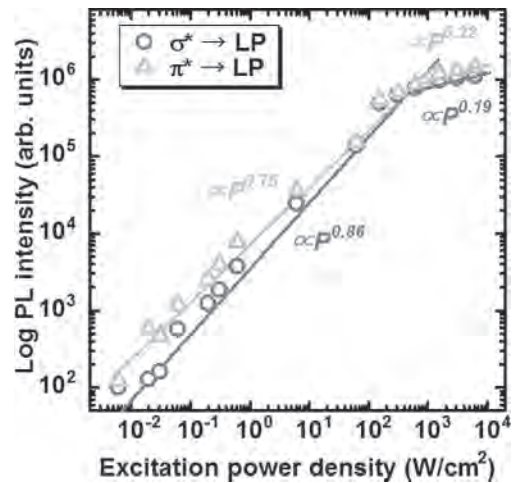


図4 g-C₃N₄ 膜の σ*-LP 間および π*-LP 遷移を介した PL の積分強度に対する励起強度依存性

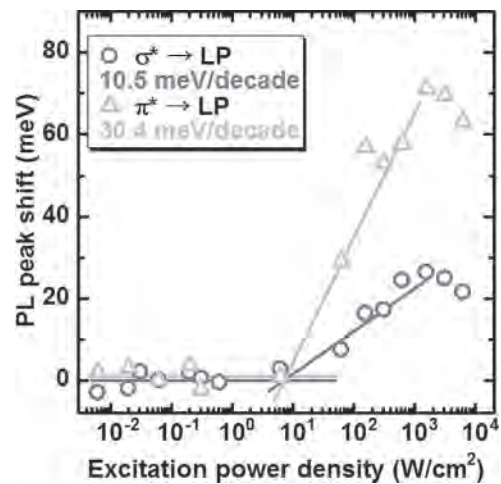


図5 g-C₃N₄ 膜の σ*-LP 間および π*-LP 遷移を介した PL ピークエネルギーの偏移に対する励起強度依存性

添加 GaP の PL の場合、母材が間接遷移型の場合でも N の孤立電子対が形成する局在状態を介することでフォノンの寄与なしに発光性再結合または励起子の解離が起きる。その一方で、PL 強度は 1.5 × 10³ W cm⁻² 以上の励起強度範囲において飽和する傾向が観察された。これは非発光性の再結合が支配的であることが考えられる。

図5に PL ピーク偏移の励起強度依存性を示す。励起強度が 6.2 W cm⁻² までの範囲では、PL ピーク偏移への大きな変化は観測されなかった。これは基底状態に電子が充満していないことを示唆している。励起強度が 6.2 W cm⁻² 以上に増加させると、PL ピークは高エネルギー側に偏移し、その後 1.5 × 10³ W cm⁻² から低エネルギー側に偏移した。この高エネルギー側に偏移している領域において、σ*-LP および π*-LP 遷移経路間の傾きをそれぞれ 10.5 および 30.4 meV / decade と見積もった。本実験に

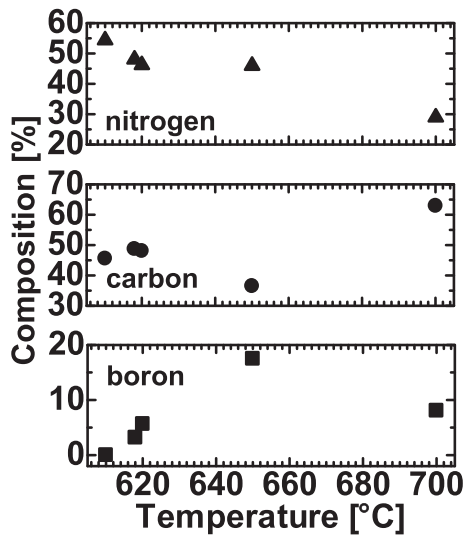


図6 B添加 $g-C_3N_4$ 膜の化学組成比に対する基板温度依存性

において、PL測定における励起レーザーのエネルギー (3.82 eV) は $g-C_3N_4$ の吸収端エネルギー (2.8 eV) と比較して十分高く、電子は σ バンドから σ^* バンドへの励起されている。それにもかかわらず、得られた結果からは電子は π^* バンドに優先的に注入されることが予測される。その理由として π^* -LP 遷移 (~ 3 ns) と比較して σ^* -LP 遷移 (~ 0.5 ns) のキャリア寿命は短いためであると考えられる [4]。したがって、電子の σ^* バンドから π^* バンドへのエネルギー緩和は σ^* -LP 遷移と同時に引き起こされ、優先的に π^* バンドへのキャリア注入が起きていると考えられる。その一方で、図4に示すPL強度の励起強度依存性と同一ように、 1.5×10^3 W cm⁻² 以上の励起強度でPLピークは特異な偏移が観測された。そのPLピークの低エネルギー側への偏移は、欠陥単位での捕捉やフォノンの存在のために格子温度の増加したことが起因とされ、PL強度の結果を支持している。

B添加 $g-C_3N_4$ 膜の組成制御と発光エネルギー変化

結晶作製には、無添加 $g-C_3N_4$ 膜の作製に使用したCVD装置を2ゾーンに拡張して使用した。B源にはアンモニアボランを用いた。

図6にB添加 $g-C_3N_4$ 膜の化学組成比に対する基板温度依存性を示す。基板温度610°Cの試料ではB組成は得られなかった。 $g-C_3N_4$ の理想的なCとNの割合はそれぞれ42.8と57.2%であるが、基板温度610°Cでは理想的な $g-C_3N_4$ に近い化学組成比が得られることが分かった。また理想的な $g-C_3N_4$ の構造にはBを添加することを困難であることが示唆された。次に基板温度を618°Cとすることで、B添加が実現できB組成が得られた。更に基板温度650°C

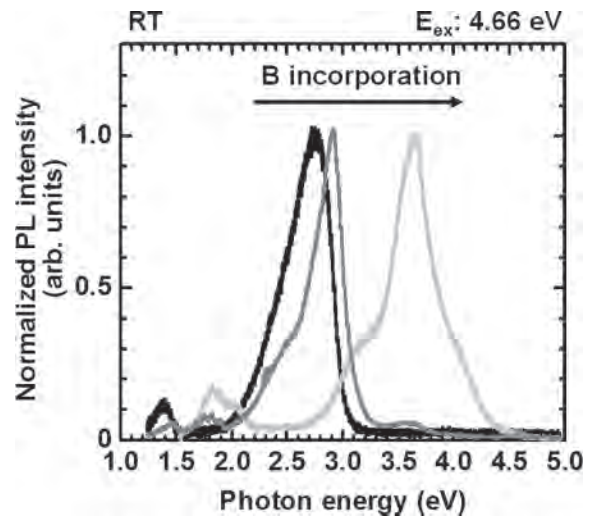


図7 無添加およびB添加 $g-C_3N_4$ 膜のPLスペクトル

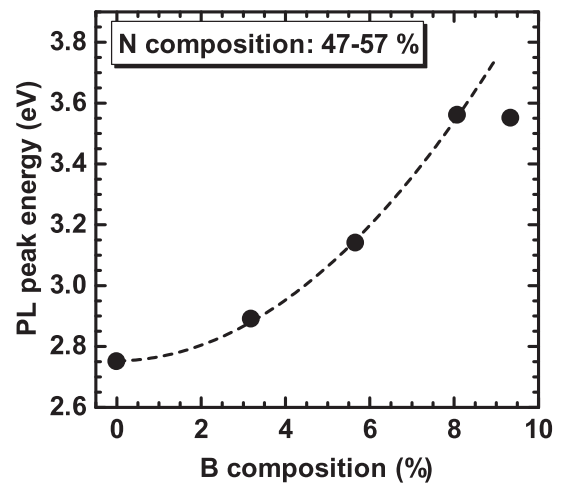


図8 B添加 $g-C_3N_4$ 膜のPLピークエネルギーのB組成依

まで増加させると、B組成が増加する傾向を見られた。また基板温度の増加でN組成は大きく変化せず、BがCと置換して添加される、またはB-N結合の状態では添加が実現され相対的に組成の増減が起きたと考えられる。その一方で、基板温度を650°Cから700°Cまで増加させるとC組成が増加し、NおよびB組成が減少する傾向が見られた。基板温度650°C以下で作製した試料と比較してC-Nの結合の解離が促進され、C-Cの結合が増加したためと考えられる。

図7に無添加およびB添加 $g-C_3N_4$ 膜のPLスペクトルを示す。無添加のPLスペクトルと比較してB添加さらには組成増加にともない、スペクトル形状が大きく変化せずPLピークが高エネルギー側へ偏移することが示された。これはB添加が結晶構造の大きな変化なしにエネルギーバンド構造に影響を与えていることが示唆される。図8にPLピーク

エネルギーの B 組成依存性を示す。PL ピークは無添加 $g\text{-C}_3\text{N}_4$ 膜の 2.75 eV から B 組成 8% で最大 3.6 eV まで増加した。この PL ピークの変化を 2 次関数でフィッティングしたところ良い一致を示し、一般的な化合物混晶で示すバンドギャップボーイングが起きていることが分かった。しかし B 組成 9.5% では PL ピークの偏移は見られなかった。一つの可能性として相分離が起きていることが考えられ、より高度な結晶成長技術が求められることが分かった。本研究で実現した PL ピークエネルギーは従来の BCN では未踏領域である。貴金属フリーまたは毒性元素なしの炭素系化合物半導体の開発において、B 添加 $g\text{-C}_3\text{N}_4$ 膜を作製可能であることを新たに示せた。

おわりに

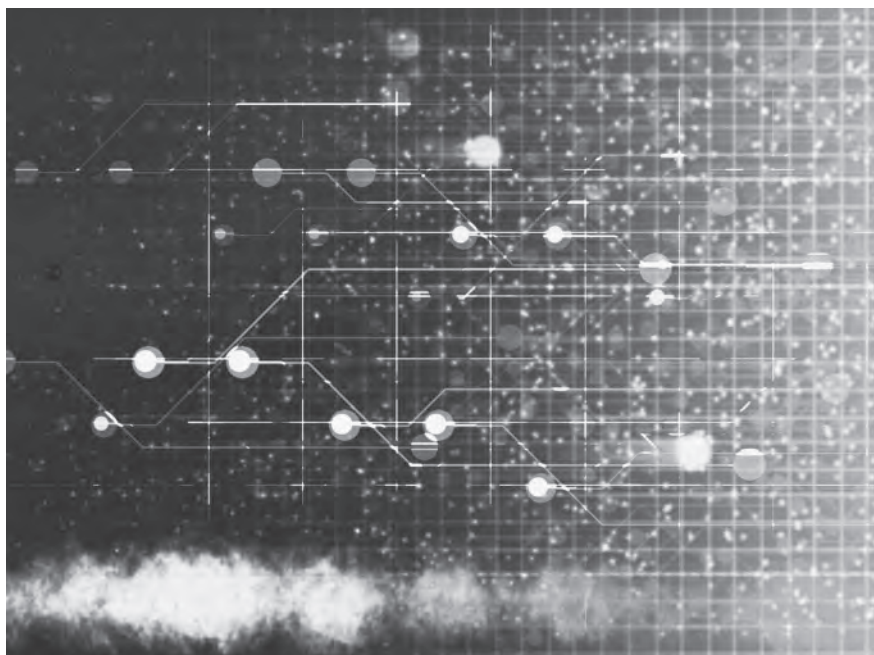
低環境負荷光電子材料を目指した無添加 $g\text{-C}_3\text{N}_4$ 膜の発光特性および B 添加 $g\text{-C}_3\text{N}_4$ 膜の組成制御について述べた。現在は可視光発光（緑色および赤色発光）を実現する $g\text{-C}_3\text{N}_4$ 膜の作製に取り組んでおり、無添加の青色発光と組み合わせて、光の三原色を 1 つ材料系で実現することを目指している。

謝辞

本研究の一部は、一般財団法人信州大学工学部若里会の平成 30 年度研究助成を受けて実施したものであり、多大なる支援に深謝申し上げます。本研究は当時大学院生の小坂舞人君（現 新光電気工業株式会社）にご協力いただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- [1] M. Kosaka, N. Urakami, and Y. Hashimoto, *Jpn. J. Appl. Phys.* **57**, 02CB09 (2018).
- [2] Y. Yuan, L. Zhang, J. Xing, M. I. B. Utama, X. Lu, K. Du, Y. Li, X. Hu, S. Wang, A. Genc, R. Dunin-Borkowski, J. Arbiol, and Q. Xiong, *Nanoscale* **7**, 12343 (2015).
- [3] C. Karcher, K. Jandieri, B. Kunert, R. Fritz, M. Zimprich, K. Volz, W. Stolz, F. Gebhard, S. D. Baranovskii, and W. Heimbrodt, *Phys. Rev. B* **82**, 245309 (2010).
- [4] L. Stagi, D. Chiriu, C. M. Carbonaro, R. Corpino, and P. C. Ricci, *Diam. Relat. Mater.* **68**, 84 (2016).



固溶体光触媒粉末の組成・構造制御による 近赤外応答型光カソードの高性能化

信州大学工学部 物質化学科
影島 洋介

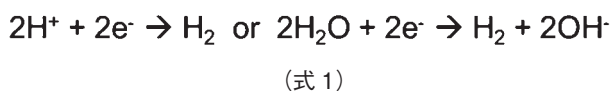


1. はじめに

喫緊のエネルギー・環境問題を解決するためには、太陽光などの再生可能エネルギーの有効利用が欠かせない。光触媒材料を用いた水分解反応系は、太陽光エネルギーを化学エネルギーである水素の形態に変換可能な有望な「人工光合成系」として盛んに研究されてきた¹⁾。太陽光照射の地域による不均一な分布・時間による変動は、太陽光エネルギーの有効利用を目指すうえで重大な障壁である。光触媒ベースの人工光合成系が実現できれば、時間的・空間的に大きなスケールでの太陽光エネルギーの貯蔵・輸送が可能になるものと期待できる。

光触媒材料開発における重要なポイントとして、「長波長光の利用」と「粉末材料の利用」が挙げられる。いくつかのワイドギャップ酸化物材料は短波長域で非常に高い量子効率で水分解反応を駆動可能であることが報告されているが、その多くは紫外光しか吸収できない²⁾。太陽光スペクトルの大部分は可視光線であり、より長波長域の光を有効に利用して水分解反応を駆動可能な光触媒・光電極の開発が重要である。また、真空成膜プロセスを要する薄膜材料に比べ、比較的簡便な手法で大量に合成可能な粉末光触媒は将来的な大規模展開や経済性の面で潜在的に有利である。粉末材料は異種光触媒材料のミクロスケールでの複合体といった複雑な構造体への展開が容易であるというメリットもある³⁾。従って、ナローギャップな粉末系光触媒材料の性能向上は、水分解用光触媒の研究開発の中でも特に重要なトピックの一つである。

近年、900 nm までの近赤外光に応答する新たな光触媒材料として、ZnSe と $\text{CuIn}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{Se}_2$ の固溶体 (ZnSe : CIGS) が、疑似太陽光照射下での光電気化学的な水素生成に高活性であると報告されている⁴⁾。この反応では、光励起電子によって光カソード表面でプロトン (または水) が還元され水素が生成する (式 1)。ここで、真空共蒸着法によって合



成された ZnSe : CIGS 薄膜が最大で 60% 程度の外部量子効率を達成しているのに対し⁴⁾、粉末材料から作製した光カソードの外部量子効率は 20 ~ 30% 程度であり⁵⁾、粉末材料の光電気化学特性向上が課題の一つである。筆者らはこれまでに固溶体光触媒粉末の組成や形態の制御⁵⁾、電極表面の多層構造化⁶⁾等のアプローチによって、粉末ベースの光電極の特性向上を検討してきた。本稿では特に、粉末の粒径制御、粉末電極表面の多層構造化に関する最近の研究結果について報告する。

2. ZnSe : CIGS 粉末の粒径制御

光触媒粉末の粒径は、粉末ベースの光電極の光電気化学特性を決定する重要な因子の一つとなる⁷⁾。キャリア密度が同じ、すなわち固液界面での空乏層厚さが粒径に依存しないと仮定した場合、粒径に占める空乏層厚さの割合が変化するためである (図 1)。

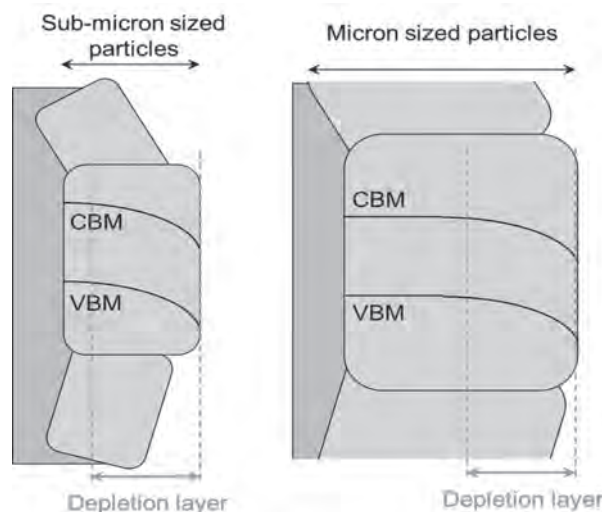


図 1. 異なる粒径・同じキャリア密度の粉末光カソードの固液界面でのバンドベンディングの模式図

空乏層の内蔵電界が固液界面での光励起キャリア分離の駆動力となる。そのため、粒径が比較的小さい場合粉末の大部分を電荷分離に利用できると期待できるのに対し、空乏層に対して粒径が大きすぎると電荷分離に寄与出来ない部分が多くなってしまうと

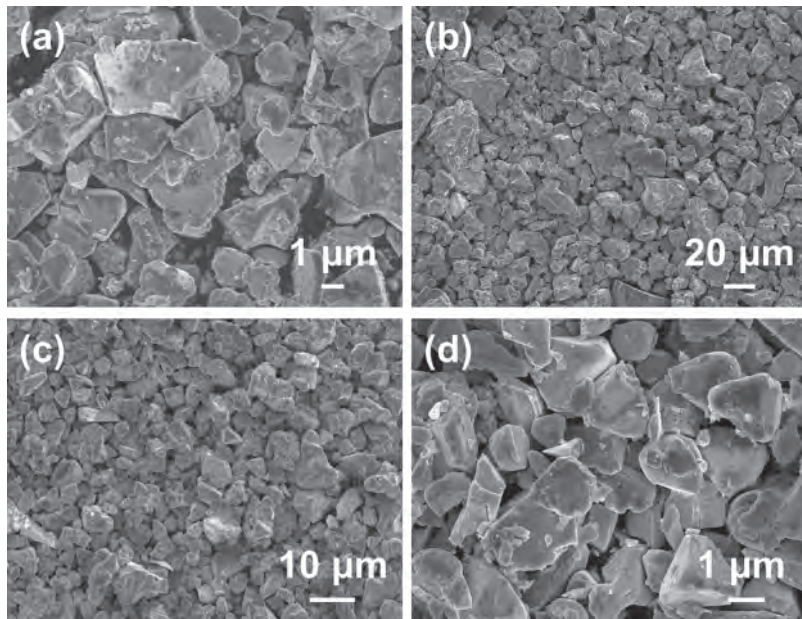


図2. (a) 未分級、(b) Large、(c) Middle、(d) Small の ZnSe : CIGS 粉末

考えられる。これに加え、光の侵入深さやキャリアの移動距離なども、“どの程度の粒径が最適か”といった議論において重要なパラメータとして関わってくる。また、異なる粒径の粉末で組成やキャリア密度が異なる可能性があることも、実際の材料設計では注意が必要である。いずれにせよ、光触媒粉末の粒径が光電気化学特性にどのように影響を与えるか、その際にどのようなパラメータがどの程度関わってくるか、といったことを明らかにすることは、粉末ベースの光電極開発において重要な設計指針となる。

既往の ZnSe : CIGS 粉末は、サブミクロン～数十ミクロンオーダーと非常に広い粒度分布を持ち(図 2a)、前述の「粒径」をパラメータとした議論はこれまでなされてこなかった⁵⁾。広い粒度分布の粉末から作製した光カソードでは、電極表面の粉末の内十分に機能している粉とそうでないものが混在していることが予想される。従って、粒径の制御によって ZnSe : CIGS 粉末光カソードの特性改善が期待できる。そこで既報に則り合成した ZnSe : CIGS 粉末を、ろ過と沈降法によって粒径 10 μm 以上の「Large」(図 2b)、5 ~ 10 μm 程度の「Middle」(図 2c)、5 μm 以下の「Small」(図 2d) の 3 種類の粉末に分級し、それぞれの光電気化学特性を評価した。図 3 は各粒径の ZnSe : CIGS 粉末から成る光カソードの疑似太陽光間欠照射下での電流 - 電位曲線である。一般的な (光を使わない) 電極触媒の場合では 0 V vs. 可逆水素電極 (V_{RHE}) よりも卑な電位でのみ水からの水素生成に起因する還元電流 (符号が負の電流) を得ることが可能なのに対し、

光カソードでは 0 V_{RHE} よりも貴な電位で光の on/off に応じて還元電流が観察される。水素/プロトンの平衡電位よりも貴な電位で光を照射している間に得られる還元電流こそが「太陽光エネルギーを水素に変換している」電流を示しており、還元的な光応答の開始電位 (オンセット電位) がより貴であり、かつより高い還元的な光電流を示す光カソードを「性能が良い」と評価することが出来る。Middle サイズの ZnSe : CIGS 粉末から成る光カソードが最も貴なオンセット電位を示し、かつ全ての電位で最も高い還元的な光電流を示した (図 3)。すなわち、本手法で調整した ZnSe : CIGS 粉末の中では粒径 5 ~ 10 μm 程度の Middle サイズのものが最も高性能

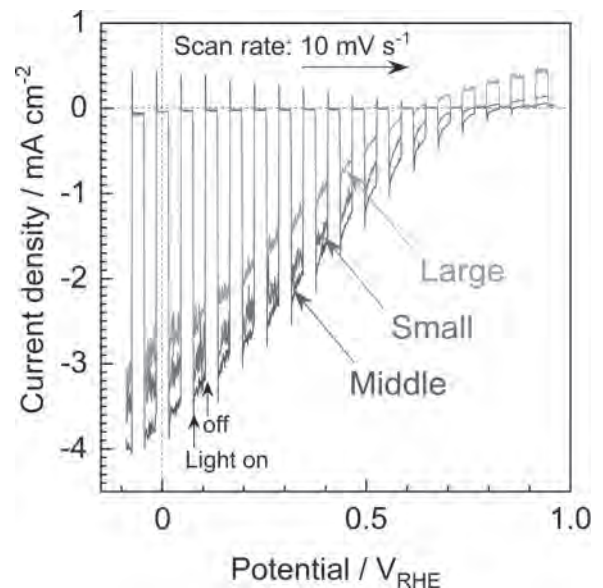


図3. 分級後の ZnSe : CIGS 粉末光カソードの疑似太陽光照射下での電流 - 電位曲線

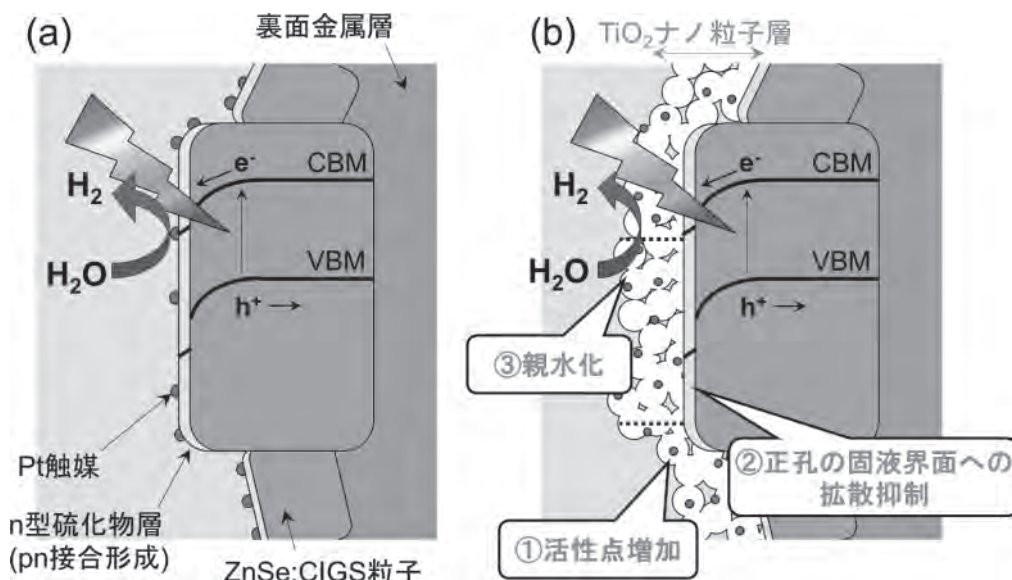


図4. (a) 光電着法によってPtを修飾した既往の光カソード、及び (b) Pt/TiO₂ 修飾後の ZnSe : CIGS 粉末光カソードの模式図

であると結論付けられる。一方、Large サイズの粉末から成る光カソードはオンセット電位、光電流値が低下しただけでなく、貴な電位で明らかな酸化的な光応答を示した。これは Large サイズの粉末が一部 n 型化していることを示唆しており、粒径によって粉末の組成・キャリア密度が異なる可能性も考えられる。上記の光電気化学特性の粒径依存が、こういったパラメータにどの程度起因しているのかに関して、電気化学インピーダンス法などによる固液界面のより詳細な解析を現在検討中である。

3. ポーラス TiO₂ 層による光カソード表面の修飾

光触媒/光電気化学反応は、光吸収・電荷分離・キャリアの移動などの「半導体内部での物理過程」だけでなく、「半導体表面での化学反応のキネティクス」や「電解液バルクでのマストランスファー」など複数のファクターが複雑に絡み合った現象である。こうした異なる反応の側面に同時にアプローチする多機能性の反応場として、Pt を担持した TiO₂ ナノ粒子 (Pt/TiO₂)⁶⁾ を ZnSe : CIGS 粉末光カソード表面に堆積させることで、その光電気化学特性を向上可能であることを見出した (図4)。Pt/TiO₂ ナノ粒子層を用いた表面修飾は、(1) 活性点数増加による表面反応の過電圧低減、(2) TiO₂ の深い価電子帯準位による固液界面への正孔の拡散抑制、(3) 表面の親水性増大といった複数の機能を併せ持っていることが分かった (図4b)。以下にその各効果に関して簡単に紹介する。

3.1. 表面反応のキネティクスへのアプローチ

光カソードの光励起少数キャリア (電子) は、電極表面で 2 電子反応である水素生成を駆動しなければ

ならない (式1)。バンドギャップが狭窄化するほど光励起キャリアの酸化・還元力は低下するため、こうした表面反応における速度論的な制約が顕著に影響するようになる。光触媒や光電極表面での反応のキネティクスを改善するためには、適切な助触媒 (活性点、光カソードの場合主に Pt、図4a) を担持することが一般的なアプローチである。ここで、反応の促進という観点からは可能な限り多くの助触媒を担持することが望ましいが、こうした表面修飾は半導体へ照射される光を遮蔽しない程度の量に抑えられる必要がある。すなわち、これまでの光電極の表面修飾は「キネティクスの改善」と「光の遮蔽」のトレードオフの関係にあった⁸⁾。Pt/TiO₂ 修飾の場合、TiO₂ ナノ粒子が高比表面積かつ可視域で透明であるため、光の遮蔽による悪影響を抑制しつつ、活性点数を増大することが可能になると期待できる。

Pt/TiO₂ 修飾を施した ZnSe : CIGS 粉末光カソードの電流 - 電位曲線を図5a に示す。Pt/TiO₂ 修飾によって、全ての電位で還元的な光電流が増大した。加えて、この Pt/TiO₂ 修飾は光カソードの耐久性向上にも大きく寄与することが分かった (図5b)。TiO₂ 未修飾の光カソードでは光電流が経時で大きく減少したのに対し、Pt/TiO₂ 修飾後は全ての電位で安定的な光電流が得られた。Pt/TiO₂ 修飾 ZnSe : CIGS 粉末光カソードは、光吸収層である ZnSe : CIGS 粉末が裏面金属層に密に結着しており、表面は 1 μm 程度の比較的厚い Pt/TiO₂ 層に覆われた構造をしていた (図6a)。TiO₂ と Pt の分布がおおむね一致していることから (図6b)、Pt は TiO₂ ナノ粒子層中に広く分散しているものと考えられ

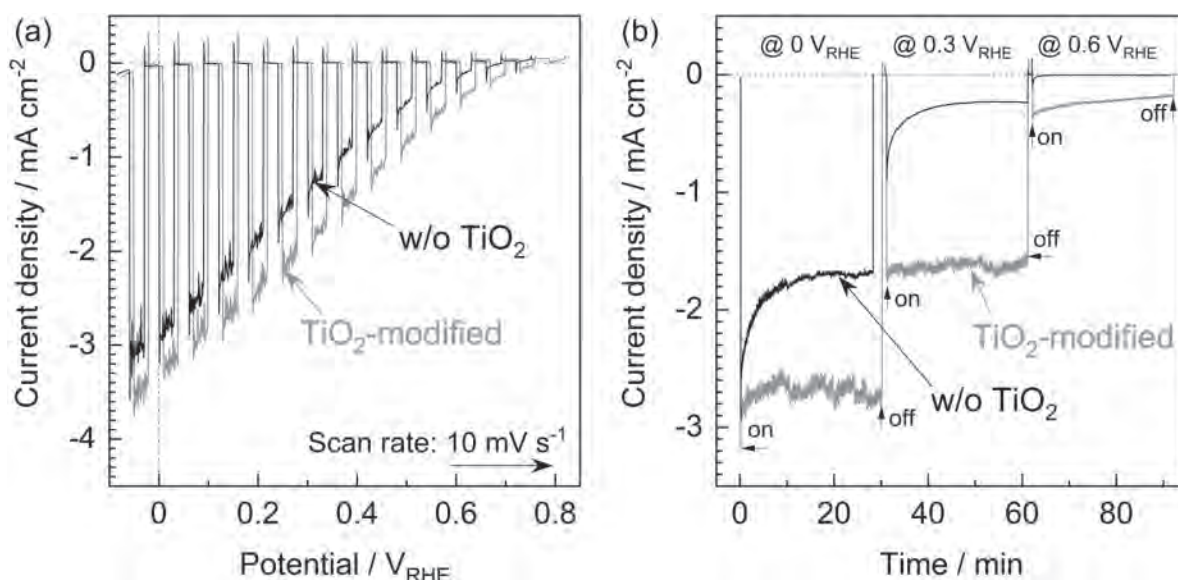


図5. Pt/TiO₂ 修飾 ZnSe : CIGS 粉末光カソードの (a) 電流-電位曲線、及び (b) 電流-時間曲線

る。Pt が高密度・高分散に担持されており、かつ担体である TiO₂ が ZnSe : CIGS の可視域での光吸収を阻害しないことが、上記の光電気化学特性向上に寄与したものと考えられる。実際、CO ストリッピングボルタンメトリー⁹⁾ 等によって、Pt/TiO₂ 修飾によって電気化学的に活性な Pt 表面積が大きく増大していることを確認している。

3.2. ヘテロ接合形成の効果

光カソード表面に層状に堆積させた TiO₂ などの酸化物は、光吸収層との間にヘテロ接合を形成することで光電流値・耐久性等の向上に寄与することが報告されている¹⁰⁾。TiO₂ ナノ粒子を用いた本系でも同様の効果が含まれているかどうかを確認するために、K₄[Fe(CN)₆] 水溶液中、暗中で光カソードの電気化学特性を評価した(図7)。 $[\text{Fe(II)(CN)}_6]^{4-}$ は 1 電子過程で $[\text{Fe(III)(CN)}_6]^{3-}$ へと酸化されるため、光電極の価電子帯中の正孔と容易に反応する¹¹⁾。

TiO₂ ナノ粒子を堆積させることによって、貴な電位での酸化的な暗電流が大幅に低減していることが分かる(図7)。これは、TiO₂ の価電子帯が深いため、ZnSe : CIGS の多数キャリアである正孔の固液界面への拡散が阻害されたことによるものと考えられる(図4b)。多数キャリアの固液界面への拡散が抑制されれば、光励起少数キャリアとの再結合や自己酸化が抑制されるものと考えられる。

3.3. 電極表面の親水性向上

安定的に光電気化学反応を駆動するためには、電解液バルクからの反応物の輸送・電極近傍からの生成物の脱離といったマストランスファーも大きく影響する。ZnSe : CIGS 表面はもともと比較的疎水的であるが(図8a)、Pt/TiO₂ 修飾によって大幅に水への濡れ性が改善することが分かった(図8b)。TiO₂ 表面は比較的親水的であり、また光照射によって表面の水酸基が増加するために親水性が更に向上

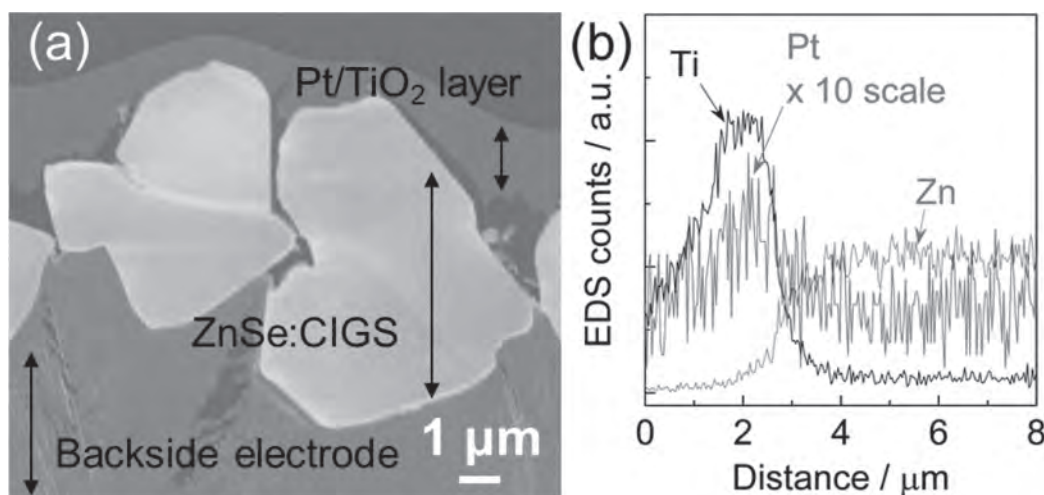


図6. Pt/TiO₂ 修飾後の ZnSe : CIGS 粉末光カソードの (a) 断面 SEM 像、及び (b) EDS ライン分析

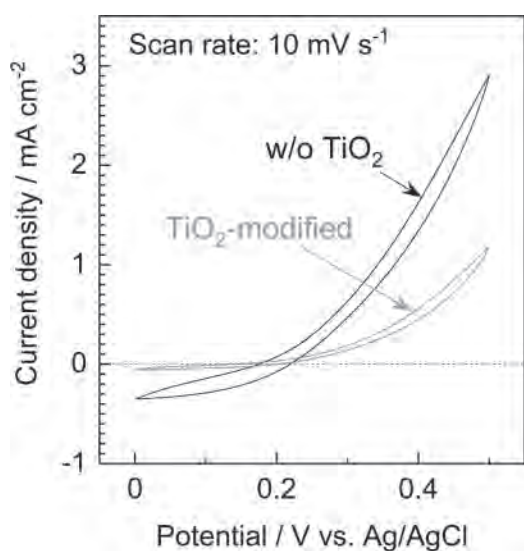


図 7. ZnSe : CIGS 粉末光カソードの 0.1 M $K_4[Fe(CN)_6]$ 水溶液中、暗中で電流 - 電位曲線

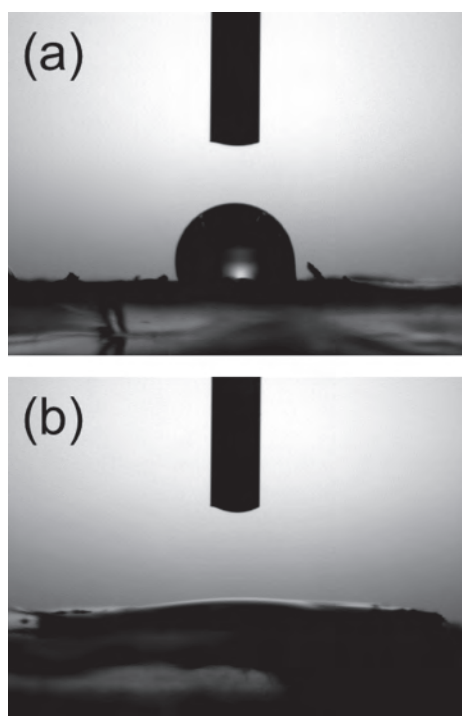


図 8. (a) TiO_2 未修飾、及び (b) Pt/TiO_2 修飾後の ZnSe : CIGS 粉末光カソード上の水滴の写真

することが知られている¹²⁾。親水的な表面からは生成した気体(水素)が速やかに脱離する。従って、 Pt/TiO_2 修飾による光電流の安定化(図 5b)には、電極表面の濡れ性改善による物質拡散促進も寄与しているものと考えられる。

4. おわりに

本研究では、ナローギャップな粉末系光電極の光電気化学特性向上を目指して、粉末の粒径制御、粉末電極表面の多層構造化に関して検討を行った。 Pt/TiO_2 ナノ粒子層を用いた表面修飾は、「表面反

応」、「半導体の電子構造」、「反応物のマストランスファー」といった異なる反応の側面に同時にアプローチする多機能性の反応場として機能していることが分かった。これらの成果に関しては現在国際学術誌に投稿中である。

実用的な「人工光合成系」を実現するためには活性、耐久性、スケラビリティ、コスト等々超えるべき課題は多く、まだまだ道は遠いと感じる。新規材料の開発、表面(固液界面)のデザイン、システム設計など、様々な角度からこれまでにないアプローチを提案することによって、こうした課題の解決を目指していきたい。

謝辞

本研究は一般財団法人信州大学工学部若里会の平成 30 年度研究助成を受け実施したものであり、多大なる支援に深甚なる謝意を表します。本研究の遂行にあたり、信州大学工学部物質化学科教授の錦織広昌先生には多大なるご助言を頂きました。また、実験の遂行にあたっては、当研究室所属の学生の高木文彰君、藤田匠君に中心となって検討を進めて頂きました。断面 SEM 観察において、信州大学基盤研究支援センター機器分析支援部門長野分室の山上朋彦氏、菊地理佳氏にサポート頂きました。ここに記して深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) K. Takanabe, *ACS Catal.*, 2017, **7**, 8006.
- 2) T. H. Chiang, *et. al.*, *ACS Catal.*, 2018, **8**, 2782.
- 3) Q. Wang, *et. al.*, *Nat. Mater.*, 2016, **15**, 611.
- 4) H. Kaneko, *et. al.*, *Angew. Chem., Int. Ed.*, 2016, **55**, 15329.
- 5) Y. Kageshima, *et. al.*, *Sustainable Energy Fuels*, 2018, **2**, 1957
- 6) Y. Kageshima, *et. al.*, *ChemCatChem*, 2019, DOI : 10.1002/cctc.201900739.
- 7) J. Liu, *et. al.*, *J. Mater. Chem. A*, 2016, **4**, 4848.
- 8) Y. J. Jang, *et. al.*, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2016, **8**, 7748
- 9) T. Vidakovic, *et. al.*, *Electrochimica Acta*, 2007, **52**, 5606.
- 10) B. Seger, *et. al.*, *J. Am. Chem. Soc.*, 2013, **135**, 1057.
- 11) T. Shirakawa, *et. al.*, *Sustainable Energy Fuels*, 2017, **1**, 1065.
- 12) K. Hashimoto, *et. al.*, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2005, **44**, 8269.

▶ 研究室紹介

電気化学反応の現象理解と それを活かしたものづくり

応用電気化学研究室(新井・清水研究室)の紹介

物質化学科 教授 新井 進
物質化学科 助教 清水 雅裕



1. はじめに

物質化学科 先進材料工学プログラムに席を置く筆者らが扱う学問領域は主として電気化学である。最も身近にこの学問を感じることができるのは、“めっき”である。典型的な事例として、硫酸銅を溶かした水溶液に金属基板を浸漬させ、そこに電気を流せば基板に金属銅が析出しめっき膜を得ることができる。我々の生活に欠かすことのできない電子機器どれをとっても、“めっき”によるものづくりを垣間見ることができる。当研究室は、2016年4月に清水(筆者)が助教として着任以降、新井進教授のご指導の下、学生を合わせて20名近い人数で研究を進めている。新井進教授は、電気化学を活用した機能性材料の創製、筆者(清水)は電気化学反応の現象理解とその蓄電池反応への応用といったそれぞれの得意分野があり、互いの専門性をすり合わせながら日々邁進している。この度、研究室を紹介する機会を幸運にも頂戴したため、筆者らの研究内容を簡単に述べることにする。

2. 研究紹介

現在進行中の主な研究プロジェクトを図1に示す。応用電気化学研究室の立ち上げから新井進教授のライフワークとしているのが、“カーボンナノチューブ(CNT)複合めっき”である。一般的に、めっきを行う際には、基板に1種類・複数または合金として金属を析出させる。これらは、めっき浴中の金属カチオンを還元することで進行する。めっき膜に取り込ませたい材料、例えばダイヤモンド(熱伝導性材料を指向)、ポリテトラフルオロエチレン粒子(めっき膜の撥水性向上)をめっき浴中に加えた後、攪拌を行うことでこれらの材料が基板に衝突する。このとき、電気めっきによりこれらの材料を基板に固定させることを“複数めっき”と呼ぶ。CNTは良好な熱・電気伝導体であり、これをめっき膜に取り込ませることでその優れた性質を反映さ

せることが期待できる。実際にこれまでに県内企業とともに積極的に研究を推進し、優れた特性を示す電気接点部品の開発を進めてきた。最近では、CNT複合めっき膜の異種材料(金属-樹脂)接合への応用に取り組んでいる。国土交通省出典の資料に基づくと、車両重量100kgの軽量化により 1 km L^{-1} の燃費向上に有効であることが報告されており、マルチマテリアル化の観点から金属の一部を樹脂で置き換えるといった研究が加熱してきた。CNT複合めっき膜は、筒状のCNTがめっき膜表面から顔を出しているような状態であり、その面粗度は大きくアンカー効果の発現が期待できる。この基板に熱可塑性樹脂を射出成型することによって、接着剤を一切用いることなく金属-樹脂の異種材料を接合することが可能となる。面粗度・めっき膜形態や複合する材料を工夫することで、高い接合信頼性を得ることを目指している。共に勤しむ修士学生の熱意と頑張りによって幸いにも実用に供するようなデータを得るに至っている。

他方、清水は、非水系(有機溶媒系)からの電析(電気めっき)を中心に、電池反応の高効率化やその要素材料開発に注力している。電気めっきでは、金属を基板に一方的に析出させる。この逆の過程すなわち溶解反応を可逆的に進行させることができれば、いわゆる“電池”となる。換言すれば、電気エネルギーを化学エネルギーの状態で貯めこみ、また逆のプロセスを進めることで電気を使うことができる。現行の蓄電池デバイスのなかで最も高いエネルギー密度を有するリチウムイオン電池は、携帯電話などのポータブルデバイスをはじめ再生可能エネルギー有効利用のための定置用大型電源に至るまで幅広く使用されてきている。電気自動車用電源に用いることを考慮した場合、貯蔵電気容量が満充電における走行可能距離を左右する。その負極材料に焦点を当てると、現行の黒鉛負極(372 mA h g^{-1})の10倍にも匹敵する理論容量を有するリチウム金属

が高い関心を集めている。しかしながら、充電／放電（リチウム金属析出／溶解に相当）を繰り返すと、リチウムは針状に形態が変化する。これが成長し正極まで貫通すると最悪の場合、爆発炎上を引き起こす可能性があるため、充放電中のリチウムの形態制御は重要な課題である。正極－負極間のイオンの橋渡し役である電解質（組成）を工夫することにより、析出－溶解挙動を制御することを試みている。ラマン分光や赤外分光を用いて電解質中のイオン状態を調査するなど、溶液化学的な観点からも研究を進めてきた（詳細は省く）。これについても、学部・修

士学生の昼夜を分かたず励んだ結果として、学術論文掲載などの嬉しい出来事を体験することができている。

3. おわりに

電気ので化学反応をコントロールすることができる「電気化学」に魅せられて研究を楽しんでしまうばかりであるが、工学部に所属することを意識し、産業へ貢献またはその一助となれるよう学生とともに今後も研究を進めていきたい。

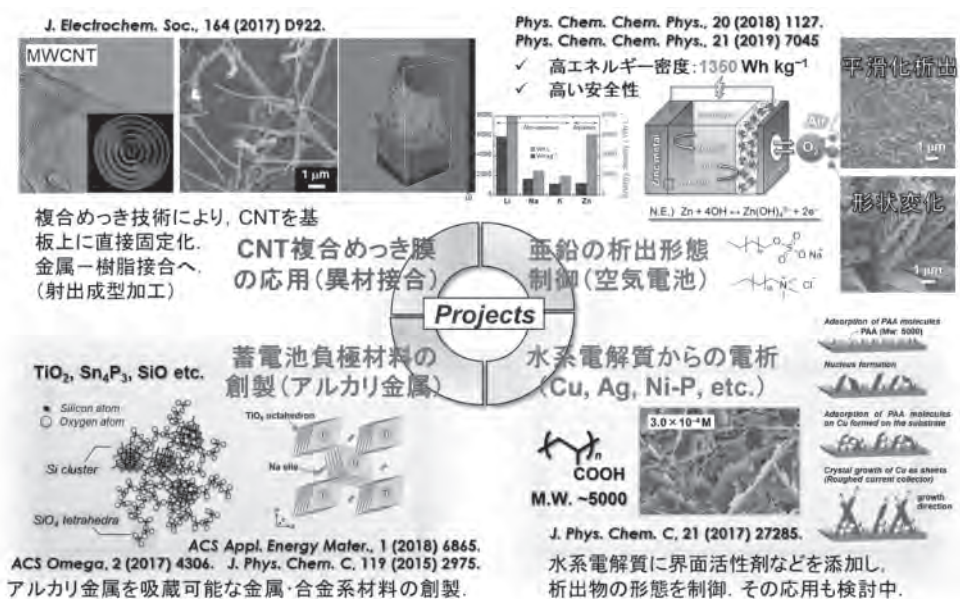


図1 応用電気化学研究室が推進する主な研究プロジェクト。電気めっきを活かした機能性材料の創製、蓄電池研究など

学習支援工学研究室（香山研究室）の紹介

電子情報システム工学科 教授 香山 瑞恵



1. はじめに

学習支援工学を専門とする香山研究室では、人工知能技術を応用した学習支援工学に関して研究しています。人が有する知識の中で、特に身体知、すなわち巧みな動作・行為を可能にしている力に着目し、芸術やスポーツの練習・訓練を対象としたスキル学習支援環境の構築、プログラミングやモデリングと

いった抽象化能力の育成環境の設計・構築、情報科学の原理を学ぶためのハンズオンでタンジブルな教材の開発などに取り組んでいます。また、音響情報・生体情報に対するデータマイニング手法・最適化アルゴリズムの開発など、人が発する多様な行為・信号に対する知的な処理の実現も目指しています。

信州大学における香山研究室は2019年度で12年

目となります。この間、学外の多様な組織と連携してきました。例えば、計測機器総合商社・美術専門学校・エンジニアで構成される技術協議会・小中高校の先生方の研究会等々。これらの共同研究者と協力しながら、10年後の学習環境を夢見たラボラトリ研究のみならず、明日の学習者を支援する実践的研究を展開していることも、香山研究室の特徴の1つです。ラボラトリ研究でも、実践研究でも研究成果の積極的な公開を意識しています。修士生や博士課程の学生に限らず学部生も、学会表彰を受けることが毎年の恒例行事となっています(図1、2参照)。



図1 2017年度教育システム情報学会優秀発表賞。北信越地域3名枠に対して香山研から学部生2名が受賞(両受賞者は2019年度修士2年生)

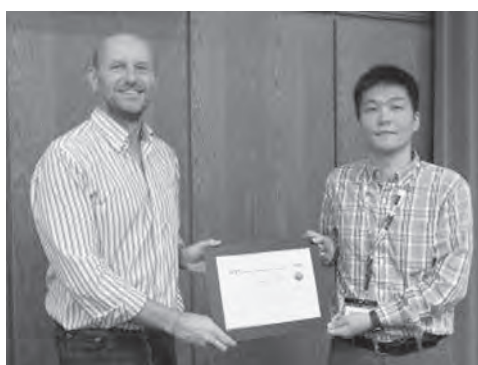


図2 2016年には博士課程の学生の研究「デジタル・ドローイング」が世界第2位に。E-Learning Award at 16th European Conference on e-Learning 2016。(受賞者は、現在、モノづくり大学准教授)

2. 研究紹介

近年、特に力を入れている研究を3つ紹介したいと思います。

■「IoT/ICT × 教育」

教育の効率化・高度化を目指し、小中高校の授業向けのICT教材やIoTベースの学習環境を開発しています。特に、伊那地域の先生方と協力し、2018年度以降、小学校理科・中学校理科・中学校技術科・

中学校美術科の授業で、研究成果が利用されています(図3参照)。



図3 「IoT × 教育」の研究成果の例
上段:中学校理科、下段左:中学校技術科、下段右:小学校理科

図3上段は中学校理科「物質の変化」での授業の様子です。IoT温度計とクラウド、CMSを組合わせた教材であり、各班1セット利用しています。温度計測の結果がリアルタイムにグラフ化され、保存されます。実験後には、他班の計測結果と重ね合わせ表示が可能です。データの共有と再利用が実現することで、クラス・学年・学校を超えた学習方法を提供しています。左下は、中学校技術科「情報の技術」での授業の様子です。モデル駆動開発方法論に基づくUMLプログラミング環境を利用しています。Executable UMLを実現する学習環境を提供し、コーディングをしないプログラミング学習を提供しています。左下は、小学校理科「電気のはたらき」での授業の様子です。センサ計測と計測結果に基づくアウトプットを、マイクロコンピュータでプログラミングしています。スイッチとして機能するように市販のマイクロコンピュータを拡張しました。2020年に先駆けて、小学校でのプログラミング教材として運用中です。この理科でのプログラムについては、上で紹介した中学校技術科向け教材に統合し、コーディングをしないプログラミング学習を提供予定です。

■「AI × 芸術」

デッサンや声楽の訓練にAIによる支援環境を提供しています。これらの研究は、海外芸術大学留学専門学校や音楽大学との共同研究です。上述のデジタル・ドローイングはこの分野の研究成果です。2012年より専門学校での実運用をしつつ、研究開発をしています。ドローイングスキルの上達を自動判定したり、ドローイング過程に対する指導コメントを自動生成したりしています。また、オペラ歌手を目指す音大生を対象として、声の響きを評価する方法を研究しています。この研究の成果は2017年



図4 歌唱研究を紹介する新聞記事の部分（信濃毎日新聞 AIで声楽家指導 2017年2月19日）

に地元の新聞でご紹介いただきました（図4参照）。

また、これらの研究成果を統合した学習環境の設計について、現在、英国の大学との共同を計画中です。

■「ICT × 健康」

スポーツ動作解析用に開発された小型高精度 IMU を用いて、健康・長寿のための人の動作解析を行っています。例えば、歩行解析では、2018年度に幼稚園生からシニア世代まで、約150名を計測しました。この研究では、JST 未来社会創造事業「健康寿命延伸のためのパーソナルライフケア ICT 基盤の創出」の支援をいただきました。現在は、介護分野への応用を目指し、計測装置の小型化と、身体状態と歩行特徴との関連を検討します。

また、2019年度からは、スラックライン推進機構との共同研究として「スラックラインの工学的解

析研究」を行っています。長野県小布施町はスラックラインの日本の聖地と呼ばれています。スラックラインの初代世界チャンピオンを輩出したスラックライン・アカデミーでの計測と解析に取り組んでいます（図5参照）。

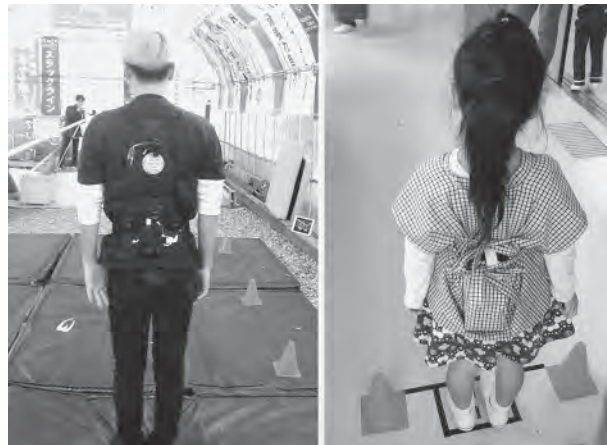


図5 動作計測の様子(左:スラックライン世界チャンピオン、右:幼稚園生)

3. おわりに

2019年度の香山研究室は、学生11名(学部生4名、修士生6名、博士生1名)と教員2名(著者と、企業人の客員教授)で構成されています。研究室のコアタイムは原則10時～16時としてありますが、すでに、6月には各人のペースに合わせた研究室ライフが展開されています。研究することに対して面白みを感じ、ユーザに研究成果をお届けする喜びを胸に、新しい学びの方法提案と明日の学習・教育支援を目指して今日も研究に取り組めます。



図6 共同研究者から贈られたシクラメンと共に、2018年度研究室メンバで記念撮影

竹内研究室紹介

水環境・土木工学科 准教授 竹内 健司



竹内研究室は工学部の改組に伴い 2015 年度に発足しました。博士学生や留学生およびポスドクに加えて 2019 年度に初めての B4 学生を迎えました。改組前はカーボン科学研究所の専任教員でしたが、研究室の本格立上げを機に 2019 年度からは水環境・土木工学科を主所属として精力的に教育・研究に取り組んでおります。

本研究室では、21 世紀素材であるカーボンナノチューブ (CNT) に代表される本学で提唱されたナノカーボン (ナノメータサイズで精緻に構造が制御され、それによって従来には無い高度な性能が付与され、革新的な機能を発現する炭素体) について研究しています (図 1)。すなわち高度なナノテクノロジーにより先進ナノカーボンを用いて、主に①革新的な水分離膜 (主に逆浸透膜)、②超軽量電線、③高性能エネルギー貯蔵デバイス (リチウムイオン電池や電気二重層キャパシタ、燃料電池材料)、④高機能複合材、⑤農林水産物由来ナノ材料について、本学出身で恩師の遠藤守信特別特任教授 (研究主幹) とともに研究開発を推進しています。以上のように本研究室では 21 世紀の革新的素材である先進ナノカーボンを用いて人々の生活を豊かにし、「水、省エネ、資源」における世界的な課題に挑む最先端研究を展開しています。

ここでは主に行っている水分離膜についての最近の研究を紹介します。

アクア・イノベーション拠点 (JST「革新的イノベーション創出プログラム (COI STREAM)」(期間 2013-2022)) では、サブ研究リーダーとして先進ナノカーボンを用いた水処理膜プロジェクトを推進しており、現在最終フェーズに入りより一層研究を加速しています。

近年の途上国の経済成長や気候変動等により世界的な水資源不足が顕在化しており、水問題は国連が進める 2030 年の持続可能な開発目標 (SDGs) の重要なテーマともなっています。地球上のほとんどが海水で残りの淡水のうち使える水はわずか 0.01% 程度と少なく、水の世紀と称される 21 世紀、水処理膜に今、様々なイノベーションが要請されています。研究対象の分離膜は、① CNT と芳香族ポリアミド (PA) の複合による逆浸透 (RO) 膜、② 構造制御したソフトダイヤモンド様炭素 (DLC) によるナノろ過 (NF) 膜、③ 酸化グラフェン・グラフェン複合による NF 膜等の研究を展開しています。さらに、特異なナノ空間を持つナノカーボン (膨張黒鉛) を用いて石油採掘時の副産物である随伴水 (油と水が混合) の一次処理法も開発しています。

CNT は一般に凝集し易く独自の解繊技術と従来の

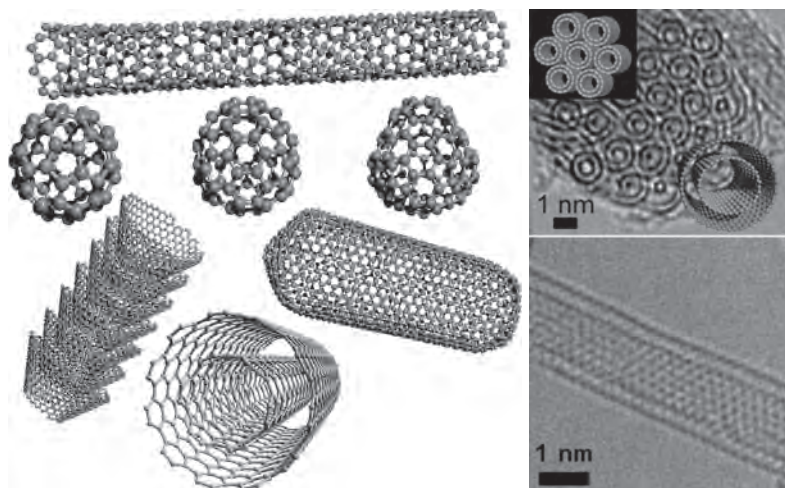


図 1 ナノカーボンの構造モデル (左) と本研究室で主に研究している二層カーボンナノチューブの高分解能電子顕微鏡写真 (右)

界面重合による高分子薄膜の形成技術を融合させた新しいナノ複合膜製膜法の開発によって、従来は不可能であった高濃度の CNT (15.5wt%以上) によるナノ複合 RO 膜 (CNT/PA) を開発しました (図 2)。かかる RO 膜の特長は、高性能な脱塩性や透水性能に加えて、特に優れた膜表面の耐汚濁性 (有機、無機他) および耐薬品性などのロバスト性です。これは CNT の複合により CNT 周辺に高度に配向した PA 分子層が形成され、この特異なナノ構造によって CNT/PA 膜の高透水性がもたらされました。また、CNT と PA 間に電荷移動が発現し、その影響で膜表面に界面水が誘発され、優れた耐汚濁性を有することが分かりました。これらは高寿命化やエネルギー効率向上および運転コストの低減に対して大いに寄与できるものと考えられます。殊に耐汚濁における自己回復性は市販 PA 膜とは一線を画す卓越した機能であり、次世代の革新的な分離膜として期待されます。

身近にある炭素は古くて新しい魅力的な素材として今注目されています。ナノカーボン膜は次世代の革新的な水分離膜として、モジュールおよび造水プラントにおけるシステム全体の最適化を経て、「地球上の誰もが十分なきれいな水を簡単に手に入れられる社会」の実現すなわち SDGs (No.6) 達成に寄与するべく、早期の社会実装を目指して研究開発をより一層推進します。さらに、CNT による超軽量

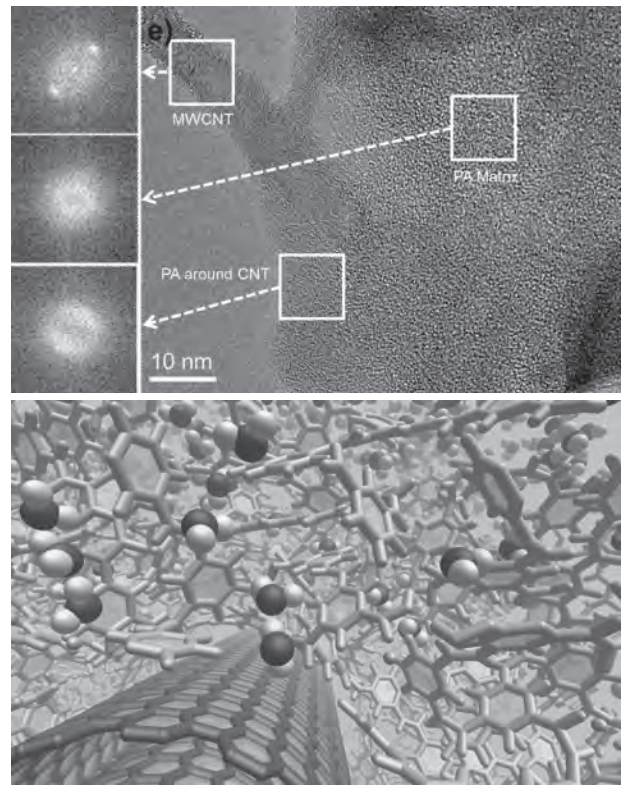


図 2 CNT/PA 膜の TEM 像 (CNT 周辺では PA が CNT に沿って配向) およびその CNT/PA 膜の構造モデル

電線や超軽量高強度ワイヤーが実用化されれば社会に大きなインパクトがありライフワークとしてもこれも積極的に進めていきたいと思えます。

構造力学研究室 (亀山研究室) の紹介

機械システム工学科 准教授 亀山 正樹



1. はじめに

構造力学研究室 (亀山研究室) は、2010 年 4 月にスタートして今年度末で 10 周年の節目を迎える研究室です。現在は、大学院学生 8 名 (うち 1 名は社会人学生) と学部学生 4 名、および教員 1 名の計 13 名で運営しています。

機械システム工学科では、ものづくりの原点を担う機械工学の多種多様な分野を基礎とした研究活動が推進されています。本研究室では、構造力学と最

適化理論を基盤として、構造物としての機械の高度化に資する研究を進めています。

2. 研究課題の紹介

私たちの身の回りにある機械構造物は、さまざまな設計基準を満たすようにつくられています。近年では、特に『安全性』『信頼性』『環境適合性』が重要視されていると考えています。『最適設計』『ヘルスマニタリング』『形状・振動制御』は、機械構

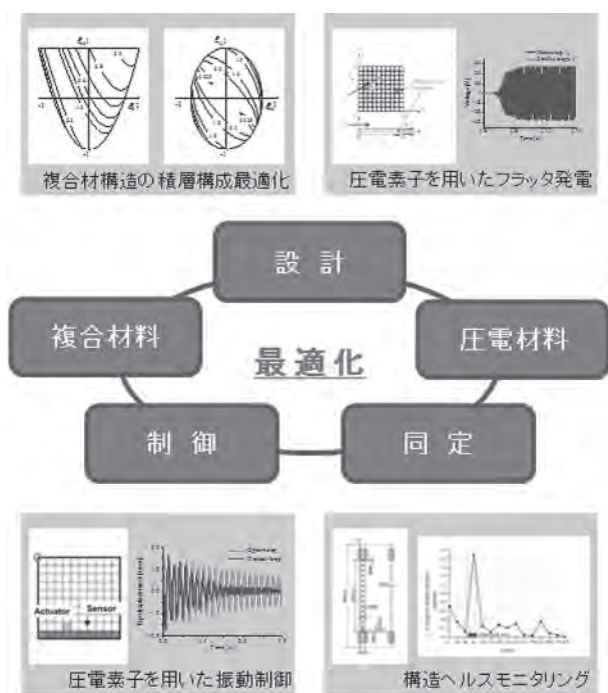


図1 研究課題の概要

造物の高性能化とともに安全性や信頼性、環境適合性の向上が同時に実現できる技術として、非常に期待されています。

高性能化とともに安全性や信頼性、環境適合性の向上が求められる機械構造物として、例えば『航空機』があります。本研究室では、安全・安心でかつ環境に優しい革新的な航空機の実現に役立つ技術に関する基礎的研究を、数値シミュレーション・実験の両面から進めています。このような技術は、航空機のみならず多くの機械構造物に適用でき、将来の機械構造物の設計・開発において有用であると考えられます。

以下に、本研究室で現在進めている研究課題について、順に説明してまいります。

(1) 最適構造設計

通常の機械構造物の設計には、安全性・有用性等、さまざまな観点からの制約が加わります。このような制約の下、設計者は設計仕様を満足させるような設計を行っています。例えば航空機構造の設計にあたっては、性能向上・低コスト化等の利点から機体重量を最小化する、いわゆる最小重量設計による軽量化が試みられてきました。しかし、構造の強度向上と軽量化は相反する関係にあることから、安易な軽量化は構造の強度不足や共振等の振動をもたらし、疲労や破壊につながる危険性があります。

構造物の安全性や有用性を確保しながら、一方でその軽量化・静的特性・動的特性等の改善を合理的に行えるような設計は極めて望ましいものであると

考えられます。構造物に所定の安全性や有用性を与えつつ、一つまたは複数の目的量の最適化を図るような設計、いわゆる最適設計技術が非常に重要となります。

近年では、特に計算機ハードウェアの急速な進化に伴い、数値解析の高精度化や取り扱う設計問題の大規模化・複雑化の傾向が顕著に見られますが、一方で、効率的な解析・最適設計方法の構築も重要であると考えています。本研究室では現在、積層複合材構造を対象として、特に、振動減衰特性の向上を目的とした積層構成最適化問題の積層パラメータによる効率的解法について、検討を行っています。

(2) 構造ヘルスマモニタリング

構造物中の微小な損傷が全体的な破壊につながることは、疲労破壊等ではしばしば生じる現象であり、過去においても、航空宇宙機の墜落、建築・土木構造物の崩壊等の大事故が生じています。これらの構造物の安全性や信頼性の向上に加え、定期点検等に伴うメンテナンスコストの削減を図るためには、経年劣化や異物衝突等による損傷を非破壊的、自動的、かつ実時間で検出する、損傷モニタリング技術が重要となります。

現在、構造物の損傷検出には超音波・X線・サーモグラフィ等の非破壊検査法が適用されていますが、これらの方法は、高精度な損傷検出が可能である反面、検査範囲が狭いことや検査の際に構造物の運用を停止する必要があることから、運用中の構造物の自動的で実時間の損傷モニタリングには適していないと考えられます。構造ヘルスマモニタリングは、構造物内に予め組み込んだセンサの動的応答を用いることによって運用中の構造物の健全性を常時モニタする技術です。

本研究室では現在、積層複合材構造に内蔵した圧電センサネットワークによる、異物の秒速200メートル程度までの低速～高速衝突を受ける積層複合材構造の実時間衝撃荷重同定に基づく衝撃損傷モニタリング法について、検討を行っています。

(3) 形状・振動制御

構造物の振動特性は、微小電気機械システム (Micro Electro Mechanical Systems ; MEMS) から土木、航空宇宙に至るまで、分野を問わず重要な設計基準となっています。構造物に何らかの外力が作用することによって生じる構造振動は、多くの場合、構造物の性能低下、もしくは疲労や破壊につながる危険性があり、特に構造物の大型・軽量化に伴う柔軟 (低剛性) 化がすすむにつれてその傾向は顕著なものとなります。そこで、構造物の振動を抑制

する、いわゆる振動対策技術が非常に重要となります。

以前より、構造物の振動特性を改善する方法に関して多くの研究・開発がなされています。振動源からの絶縁や、「(1) 最適構造設計」で触れたような構造変更による特性改善とは異なり、振動制御による特性改善は、構造物上の適切な箇所に配置されたセンサ・アクチュエータを用い、制御則に基づいて構造物の剛性・減衰特性を見かけ上変化させることによって運用中に生じる構造振動を適宜抑制する方法です。

本研究室では現在、構造物への適用がより容易な振動計測系・制御系を構築することの重要性を踏まえ、数値最適化手法を利用することにより必要とするセンサ・アクチュエータ個数の大幅な低減を可能とする振動計測系・制御系の設計方法について、検討を行っています。

(4) 振動発電

1970年代の二度にわたる石油危機や地球温暖化問題を背景に、国内でもエネルギー問題への関心が高まっています。例えば、環境中に存在する未利用エネルギーを収穫し、小型電子機器の電源となる程度の量の電気エネルギーを生成する発電技術として、エネルギーハーベスティングが注目されています。エネルギーハーベスティングには、力学エネルギー・電磁波エネルギー・熱エネルギー等を利用するものがあります。

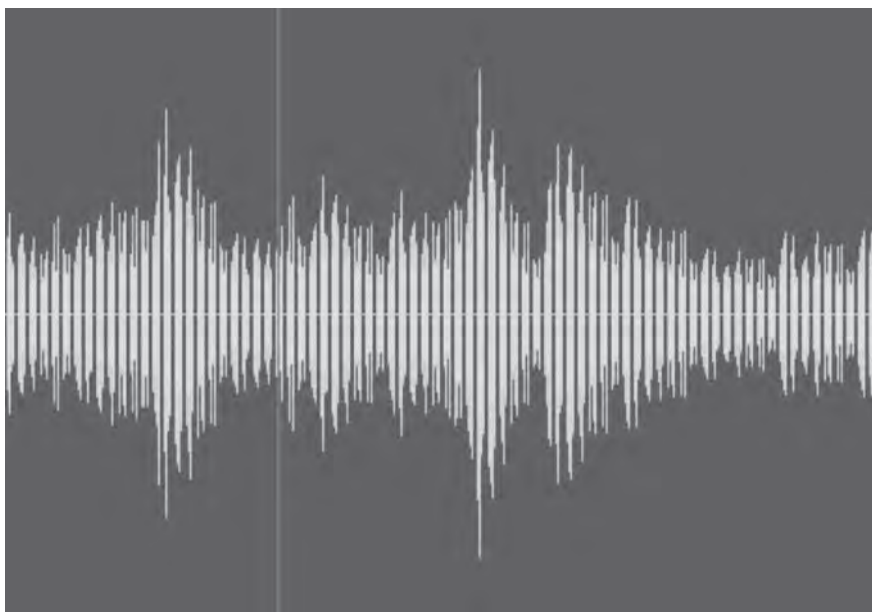
「(3) 形状・振動制御」で触れたように、構造物に何らかの外力が作用することによって生じる構造振動は、多くの場合、構造物の性能低下、もしくは疲労や破壊につながる危険性があり、構造物の振

動を抑制する、いわゆる振動対策技術が非常に重要となります。その一方で、構造振動をエネルギーとした環境発電は、振動エネルギーを電気エネルギーに変換する素子を用いることにより、避けるべきものとされてきた構造振動を逆に有効利用する技術です。

本研究室では現在、弾性構造物の振動と空気力の相互干渉によって生じるフラッタ現象を有益なエネルギー源ととらえ、構造物に生じるフラッタ振動の機械エネルギーを圧電材料の圧電効果を利用することによって電気エネルギーに変換する圧電振動発電において、発電用圧電素子の配置箇所が発電性能におよぼす影響について、最適化の観点から検討を行っています。

3. おわりに

構造は、機械が成立するために最も重要な要素であるといえます。よりよい構造物とは何か、そのような構造物を実現するためのよりよい設計方法とは何か、追求していきたいと考えています。一方、形あるもの（構造）はいつか必ず壊れます。1950～1970年代の高度経済成長期に造られた構造物の老朽化が進み、耐用年数を超えて今現在もなお運用され続けている現状、事故の危険性が指摘されいながら経済的理由等により対応が先送りされている現状については、読者の皆様をご存じの通りかと思えます。いかにして既存の構造物の安全性・信頼性を将来にわたり保証すればよいか、併せて追求していきたいと考えています。さらには、構造力学や最適化の観点から次世代のために何らかの貢献ができれば、それは研究者冥利に尽きると言えます。



歴史的組積造建造物の実験・解析

建築学科 助教 遠藤 洋平



初めまして!!

初めまして!! 遠藤 洋平です。私は、日本建築史の研究（日本）、その後歴史的町並みの保存政策（英国）、歴史建築構造保存（イタリア、スペイン）と、世界各地で幅広く研究と実務に従事してきました。2016年3月から信州大学工学部建築学科 助教として勤務しています。歴史的建造物の保存を主な研究テーマとしています。

1. 直近の研究

現在は、3つの研究に携わっています。1つめは、ネパール文化財の修復です。ネパールは2015年のゴルカ地震で大きな被害を受けました。ネパールは地震国であり、今後も同規模の地震が起こる可能性は十分あります。同国の文化財は歴史・文化的価値が高いものの、地震に対して弱いものが多いです。例えば Figure 1a にある五重塔は、ゴルカ地震で最上層が崩壊し (Figure 1b)、現在解体修復中です (Figure 1c)。この建築は組積造壁と木造柱梁を組み合わせて成り立っています。組積造には泥目地を使用しており、それが構造的に弱い原因のひとつと考えられます。また、未熟な施工技術、メンテナンスの不足などの理由により木造柱梁と組積造壁とのつながりが失われており、そのことも地震に対して

弱い原因と考えられます。私はこのような建築に対して、まずは構造解析により耐力を正確に把握する、そしてそれでも地震に対して十分な耐力が認められなければ補強の手法を提案するという観点から研究を行っています。補強に関しては、文化財としての歴史・文化的価値を損なわないものを提案する必要があります。一筋縄ではいかない研究です。

2つめは、スペイン カタルーニャ工科大学、ギリシャ アテネ工科大学と国際共同研究を行っています。2020年に2層組積造建造物の振動台実験をアテネ工科大学にて行う予定です。今年度始まった研究であり、まだ多くの成果は挙がっていませんが欧州の2大学を巻き込んだ大規模な研究になる予定です。3つめは、歴史的な町並の景観解析に取り組んでいます。前述の2つの研究と異なり、建築構造の観点ではなく、建築史、建築意匠の観点からの歴史的町並の解析をテーマとしています。歴史的町並の景観解析の手法はいくつか提案されているものの、未だ有効なものは少なく、今後も多くの研究が必要です。現在は、ICOMOSのような国際機関によるものを含むこれまでに発表された様々な解析手法を、整理するという取り組みをしています。歴史的町並の保存、再生に役立つ手法を発表することを最終目標としています。

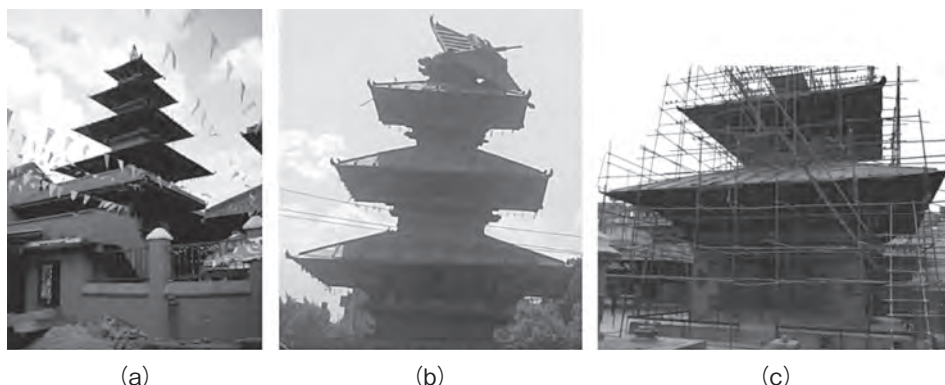


Figure 1 - ゴルカ地震で被害を受けた五重塔

2. 学生へのメッセージ

研究室所属の学生には、前述の3つから興味があるものを選んでもらい、話し合いを通して研究テーマを決めるようにしています。私からテーマを与えるのではなく、助言はするが学生が自分の意思を示すまで出来る限り待つ、という姿勢をとるようにしています。一方で大学教員は、研究者であるとともに教育者であるということをいつも意識しています。教育者として、学生へ伝えるメッセージは一貫しており、以下の3点です。

- 常識を疑うこと。常に自分で判断して行動すること。
- 情熱を持って日々生きること。
- いつも笑顔でいること。

信州大学を卒業した学生が、国内、国際と小さな枠にとらわれることなくのびのびと活躍できる助けとなればと思い、日々学生と接しています。



Figure 2 – 研究室の学生と

「技報 こまくさ」 第 17 号 令和元年 10 月発行
(非売品)

発行者 一般財団法人信州大学工学部若里会
〒 380-8553

住 所 長野県長野市若里 4 丁目 17-1
TEL (026) 266-8209 (FAX 共有)
E-mail : wakasat@shinshu-u.ac.jp

印刷・製本 株式会社アイデスク
〒 381-0025 長野市北長池 1263-1
TEL (026) 244-4551

技報



一般財団法人 信州大学工学部 若里会