

# ナノ材料の実用的合成プロセス開発と応用展開

研究代表者 野田 優  
(先進理工学部 応用化学科 教授)

## 1. 研究課題

ナノテクノロジーは広範な技術革新が可能と十数年来期待され、素晴らしい材料・デバイスが実験室規模で沢山生み出されてきた。反面、実用は未だ限定的とされ、実用的な規模とコストでの製造が本格的実用化の鍵となる。化学工学は生産の工学だが、ナノ材料に関しては微細構造制御とスケールアップの両立に必ずしも成功していない。本プロジェクト研究では、その両立を目指しプロセス開発を中心に推進する。具体的には、カーボンナノチューブ(CNT)を対象に、蓄電デバイス、薄膜デバイス、電子デバイスに向け、流動層による長尺 CNT の大量合成、浮遊触媒法による高結晶性 CNT の連続合成、担持触媒法によるデバイス基板上 CNT 合成と、カスタム合成法を開発する。さらに多孔質シリコンの急速蒸着と蓄電応用、大粒径多結晶シリコン膜の急速蒸着と太陽電池応用など、シリコン材料・製膜技術も開発する。合成と応用を同時に進めることで「役立つものを実用的につくる」とともに、産学協働により技術開発と移転をシームレスに推進する。

## 2. 主な研究成果

### 2.1 カーボンナノチューブの実用合成技術の開発

担持触媒を用いて化学気層成長(CVD)条件を丁寧に制御すると、単層 CNT をミリメートルスケールと長尺に基板上に垂直配向成長することができる。100 ppmv 程度の微量の水蒸気を添加すると触媒上に析出する副生炭素を除去し触媒寿命を向上できることが知られる。しかし、実用上は微量の水蒸気の均一供給は容易でなく、特に基板面積を増大し炭素収率を向上すると水蒸気が枯渇し CNT の均一合成が困難となる。我々は H<sub>2</sub>O よりも酸化活性の低い CO<sub>2</sub> を数 vol% と高濃度に供給することで、より大面積で CNT を均一合成する技術を開発した(図 1)[12]。

アルミニウムは軽量で電気導電性と熱伝導性に優れ、多様な用途に用いられる。放熱や蓄電応用では表面の三次元化による高性能化が重要で、Al 上に CNT を長尺成長する試みが多くなされているが、Al は融点が 660 °C と低く CVD を低温で行う必要があり、CNT の成長は 100 μm 程度が限界であった。我々は高活性な C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> を低分圧で供給することで低温でも一定の成長速度を確保、CO<sub>2</sub> 添加により触媒寿命を 10 時間以上と大きく向上し、1 ミリメートル超の CNT の Al 基板上での直接合成を実現した(図 2)[15]。本技術は株式会社デンソーとの共同研究の成果であり、特許も登録された(日本国特許第 6515838 号)。

短径・高結晶性の単層 CNT は未だに合成が難しい。直径 2~3 nm 程度の微小な触媒ナノ粒子を高密度に反応器に供給させることが重要である。米国ミシガン大の Laine 教授が火炎法で合成した Co-Al-O ナノパウダーを Si 基板に担持し、Si 基板を通電加熱することで、ナノパウダーの還元による Co ナノ粒子の形成と高結晶性・短径の単層 CNT の合成を 10 秒スケ-

ルの短時間で実現した(図 3)[11]。反応路への Co-Al-O ナノパウダーの連続供給による単層 CNT の連続合成へ繋がる成果である。

火炎法はカーボンナノ粒子（カーボンブラック）やフラーレンなどの炭素材料の合成にも利用される。これら無触媒反応と比べ、CNT 合成は触媒反応であり、火炎法での合成は成功していない。我々は予混合火炎の 2000 °C 超の場で有機金属蒸気をミリ秒で分解、炭素原料との混合で 1000 °C 程度へミリ秒で急速冷却し、触媒粒子を核生成させ CNT を下流の炉内で数秒間成長させる、火炎アシスト CVD 法を開発した。本技術で直径 1 nm 程度と短径で直径の揃った高結晶性単層 CNT の連続合成を実現した(図 4)[22]。本技術は富士フィルム株式会社との共同研究の成果であり、特許も登録された(日本国特許第 6418690 号, 第 6455988 号)。

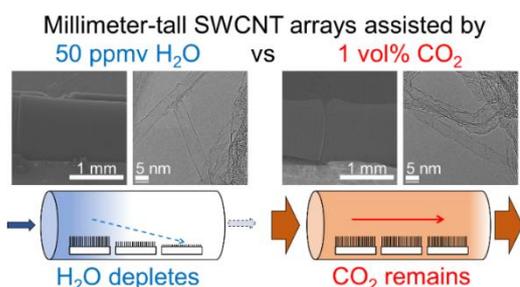


図 1. CO<sub>2</sub>アシスト CVD 法による長尺 CNT の大面積基板上均一合成[12]

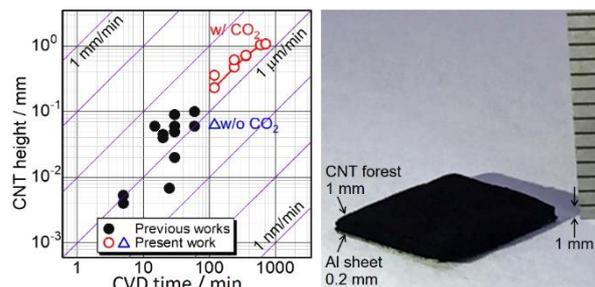


図 2. Al シート上でのミリメートル長 CNT 垂直配向膜の直接合成[15]

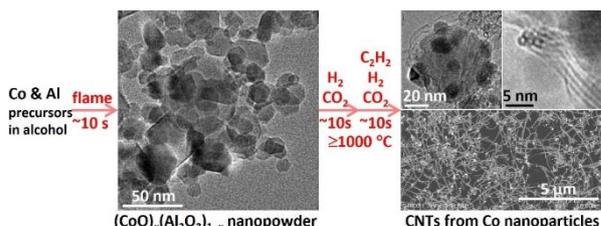


図 3. 火炎合成 Co-Al-O ナノパウダーからの 10 秒スケールでの CNT 合成[11]

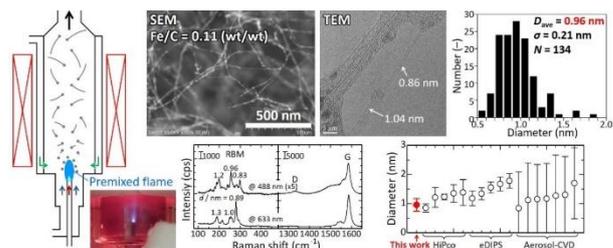


図 4. 火炎アシスト CVD 法による小直径単層 CNT の連続合成[22]

## 2.2 グラフェンの実用合成技術の開発

グラフェンは優れた物性から各種応用が期待されているが、実用的な合成法の確立が課題となっている。CVD 法は大面積で比較的良質なグラフェンを合成でき実用化への期待が大きい。特に炭素をほとんど固溶しない Cu 箔を触媒に用いると単層グラフェンを選択的に合成できる。Cu 箔は多結晶だが、サファイア単結晶基板上のエピタキシャル Cu 薄膜を触媒に用いると良質なグラフェンが得られる。しかしエピタキシャル成長に時間がかかりサファイア基板を使い捨てにしているため、非常に高価で研究用途に限定されている。我々はサファイア基板上に 10–30 秒で厚さ 1–3 μm の Cu 膜を高速にエピタキシャル成長させ、グラフェンを誘電体基板に転写、サファイア基板を再利用する技術を開発した(図 5)[19]。

グラフェンの CVD 合成は 1000 °C 以上の高温で 1 時間程度の長時間がかかり、しかも二次元基板上に 1 枚ずつ合成するため生産性が低いのも課題である。我々は、Cu 箔を三次元状にロールし、原料に汎用される CH<sub>4</sub> よりも高活性な C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> を用いて 1.5 分間の CVD を行うことで良質な単層グラフェン連続膜を合成し、反応器容積あたり高いグラフェンの生産性を実現した(図 6)[6]。

CVD 法では Cu 箔などの触媒表面でグラフェンが合成されるが、多くの用途でグラフェンは誘電体・絶縁体基板上で利用される。触媒から基板への転写は難しく、グラフェンが損傷・

汚損するため、誘電体・絶縁体基板上への直接合成が望まれる。我々は Fe-C 混合膜を SiO<sub>2</sub> や SiO<sub>2</sub>/Si 基板上へ形成し、600–650 °C に加熱し Cl<sub>2</sub> ガスで Fe をエッチング・除去することで基板上に多層グラフェンの連続膜を得るエッチング析出法を開発した。Fe ターゲットと C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>/Ar ガスを用いた反応性スパッタリングにより Fe-C 膜中の C 濃度を制御、10–40 層の範囲で層数制御を実現した(図 7)[5]。

これらの研究は、科学研究費補助金・新学術領域研究(JP 25107002, 代表：名古屋大学 楠美智子教授)の助成を受けて実施した。

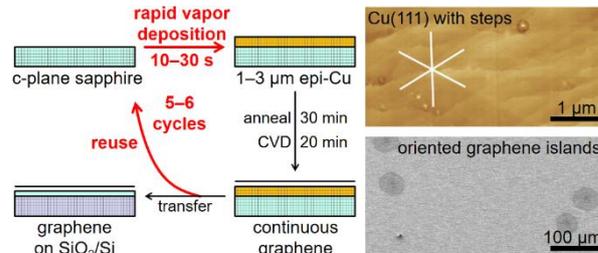


図 5. 高速エピタキシーCu 触媒によるグラフェン CVD 合成とサファイア基板再利用[19]

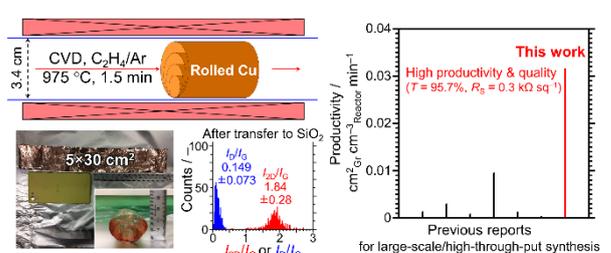


図 6. 三次元 Cu 箔上でのグラフェンの 1.5 分合成[6]

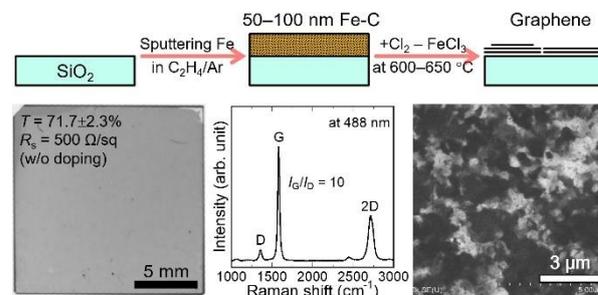


図 7. 膜厚制御された多層グラフェン連続膜の誘電体基板上への直接合成[5]

### 2.3 カーボンナノチューブベース軽量・高容量蓄電池の開発

リチウムイオン電池などの蓄電池のエネルギー密度を向上すべく、多様な新材料が研究されている。シリコンと硫黄は従来の黒鉛負極とコバルト酸リチウム正極の 10 倍の高容量を持つ活物質である。通常、負極は Cu 箔、正極は Al 箔を集電体とし、その上に活物質層を塗布して電極を形成する。これら新材料は薄く塗布した際は活物質質量基準で高容量を示すが、実用には金属箔集電体を含めた電極基準で容量を向上する必要があり、厚く塗布すると性能が出ない問題がある。我々はサブミリメートル長と長尺の数層 CNT の流動層合成技術を有しており、この CNT の分散・濾過で得られるスポンジ状自立膜が、高い内部表面積、空隙率、導電性を持ち軽量であることに着目(厚さ 30 μm の膜で、それぞれ 3000 cm<sup>2</sup>/cm<sup>2</sup>, 80–90 vol%, 50–100 S/cm、~1 mg/cm<sup>2</sup>)、その中に活物質を包含した軽量・高容量の電極と全電池を開発している。

シリコン負極では、10–50 Torr 低圧の Ar ガス中で Si を 2000 °C 以上に加熱して蒸発し数秒で Si ナノ粒子を得る高速なガス中蒸発法を開発した。Si ナノ粒子と CNT をアルコール中に分散して濾過することで、Si-CNT 複合自立膜を得た。この膜に CVD 法で数層のグラファイト質カーボン膜を堆積させることで、良好な質量・面積基準容量を持つ Si-CNT 負極を開発した(図 8)[18]。

硫黄正極では、CNT の分散・濾過によりスポンジ状 CNT 自立膜を得て、真空中で硫黄を昇華・蒸発する際に硫黄原料と CNT 膜の温度差を精密に制御することで、CNT への硫黄の

均一コートを実現した。この S-CNT 膜をプレスすることで、トップクラスの体積基準容量と良好な質量・面積基準容量を持つ正極を実現した(図 9)[7]。

これらの研究は、科学研究費補助金・基盤研究(S)(JP16H06368)の助成を受けて実施した。



図 8. ガス中蒸発法による Si 粒子数秒合成と CNT との複合 Li 二次電池負極構築[18]

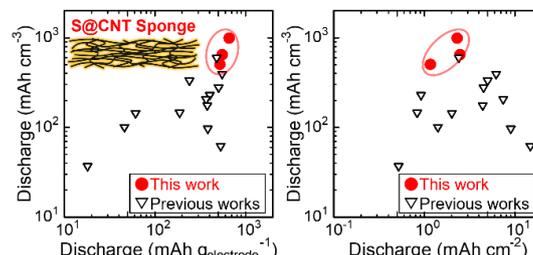


図 9. CNT スポンジ中包含硫黄正極による  $1 \text{ A h cm}^{-3}$  体積容量密度の実現[7]

### 3. 共同研究者

大沢 利男 (ナノ・ライフ創新研究機構・次席研究員)

杉目 恒志 (高等研究所・講師)

花田 信子 (応用化学科・講師)

李 墨宸 (理工学術院総合研究所・次席研究員)

TEAH, Heng Yi (理工学術院総合研究所・次席研究員)

門間 聰之 (先進理工学部 応用化学科 教授)

獨古 薫 (横浜国立大学 大学院工学研究院 教授)

山田 裕貴 (東京大学 大学院工学系研究科 講師)

大野 雄高 (名古屋大学 未来材料・システム研究所・教授)

伊原 学 (東京工業大学 物質理工学院・教授)

堂免 一成 (信州大学 先鋭領域融合研究群先鋭材料研究所・教授)

Richard M. Laine (米国国ミシガン大学 材料科学工学科 教授)

Seung Woo Lee (米国・ジョージア工科大学 機械工学科 助教授)

陳 忠明 (中国・東莞理工学院 環境土木工学部 助教授)

### 4. 研究業績

#### 4.1 学術論文

1. Y. S. Lee, S.-Y. Lee, K. S. Kim, S. Noda, S. E. Shim\*, and C.-M. Yang\*, "Effective heat transfer pathways of thermally conductive networks formed by one-dimensional carbon materials with different sizes," *Polymers* 11 (10), 1661 (2019).
2. R. Xie, N. Ishijima, H. Sugime, and S. Noda\*, "Enhancing the photovoltaic performance of hybrid heterojunction solar cells by passivation of silicon surface via a simple 1-min annealing process," *Sci. Rep.* 9, 12051 (2019).
3. D. Tune, H. Shirae, V. Lami, R. Headrick, M. Pasquali, Y. Vaynzof, S. Noda, E. Hobbie\*, and B. Flavel\*, "Stability of chemically doped nanotube-silicon heterojunction solar cells: Role of oxides at the carbon-silicon interface," *ACS Appl. Energy Mater.* 2 (8), 5925-5932 (2019).
4. D. Akagi, Y. Kageshima, Y. Hashizume, S. Aoi, Y. Sasaki, H. Kaneko, T. Higashi, T. Hisatomi, M. Katayama, T. Minegishi, S. Noda, and K. Domen\*, "A semi-transparent

- nitride photoanode responsive up to 600 nm based on a carbon nanotube thin film electrode," *ChemPhotoChem* 3, 521-524 (2019).
5. S. Akiba, M. Kosaka, K. Ohashi, K. Hasegawa, H. Sugime, and S. Noda\*, "Direct formation of continuous multilayer graphene films with controllable thickness on dielectric substrates," *Thin Solid Films* 675, 136-142 (2019).
  6. Y. Nagai, H. Sugime, and S. Noda\*, "1.5 Minute-synthesis of continuous graphene films by chemical vapor deposition on Cu foils rolled in three dimensions," *Chem. Eng. Sci.* 201, 319-324 (2019) (Featured cover article).
  7. K. Hori, K. Hasegawa, T. Momma, and S. Noda\*, "Volumetric discharge capacity 1 A h cm<sup>-3</sup> realized by sulfur in carbon nanotube sponge cathode," *J. Phys. Chem. C* 123 (7), 3951-3958 (2019).
  8. R. Rao\*, C.L. Pint, A.E. Islam, R.S. Weatherup, S. Hofmann, E.R. Meshot, F. Wu, C. Zhou, N. Dee, P.B. Amama, J. Carpena-Nuñez, W. Shi, D.L. Plata, E.S. Penev, B.I. Yakobson, P.B. Balbuena, C. Bichara, D.N. Futaba, S. Noda, H. Shin, K.S. Kim, B. Simard, F. Mirri, M. Pasquali, F. Fornasiero, E.I. Kauppinen, M. Arnold, B.A. Cola, P. Nikolaev, S. Arepalli, H.-M. Cheng, D.N. Zakharov, E.A. Stach, J. Zhang, F. Wei, M. Terrones, D.B. Geohegan, B. Maruyama, S. Maruyama, Y. Li, W.W. Adams, and A.J. Hart, "Carbon nanotubes and related nanomaterials: critical advances and challenges for synthesis towards mainstream commercial applications," *ACS Nano* 12 (12), 11756-11784 (2018).
  9. B. Liang, E. Yi, T. Sato, S. Noda\*, K. Sun, D. Jia, Y. Zhou, and R. M. Laine\*, "Resettable heterogeneous catalyst: (re)generation and (re)adsorption of Ni nanoparticles for repeated synthesis of carbon nanotubes on Ni-Al-O thin films," *ACS Appl. Nano Mater.* 1, 5483-5492 (2018).
  10. H. Sugime\*, T. Ushiyama, K. Nishimura, Y. Ohno, and S. Noda, "An interdigitated electrode with dense carbon nanotube forests on conductive supports for electrochemical biosensors," *Analyst* 143, 3635-3642 (2018).
  11. S. Okada, H. Sugime, K. Hasegawa, T. Osawa, S. Kataoka, H. Sugiura, and S. Noda\*, "Flame-assisted chemical vapor deposition for continuous gas-phase synthesis of 1-nm-diameter single-wall carbon nanotubes," *Carbon* 138, 1-7 (2018).
  12. T. Sato, H. Sugime, and S. Noda\*, "CO<sub>2</sub>-assisted growth of millimeter-tall single-wall carbon nanotube arrays and its advantage against H<sub>2</sub>O for large-scale and uniform synthesis," *Carbon* 136, 143-149 (2018).
  13. K. Hasegawa\*, C. Takazawa, M. Fujita, S. Noda, and M. Ihara\*, "Critical effect of nanometer-size surface roughness of a porous Si seed layer on the defect density of epitaxial Si films for solar cells by rapid vapor deposition," *CrystEngComm* 20 (13), 1774-1778 (2018) (inside front cover).
  14. T. Liu, B. Lee, M. J. Lee, J. Park, Z. Chen, S. Noda, and S. W. Lee\*, "Improved capacity of redox-active functional carbon cathodes by dimension reduction for hybrid supercapacitors," *J. Mater. Chem. A* 6 (8), 3367-3375 (2018).
  15. S. Miura, Y. Yoshihara, M. Asaka, K. Hasegawa, H. Sugime, A. Ota, H. Oshima, and S.

- Noda\*, "Millimeter-tall carbon nanotube arrays grown on aluminum substrates," *Carbon* 130, 834–842 (2018).
16. Y. H. Kwon, J. J. Park, L. M. Housel, K. Minnici, G. Zhang, S. R. Lee, S. W. Lee, Z. Chen, S. Noda, E. S. Takeuchi, K. J. Takeuchi, A. C. Marschilok\*, and E. Reichmanis\*, "Carbon nanotube web with carboxylated polythiophene "assist" for high-performance battery electrodes," *ACS Nano* 12 (4), 3126-3139 (2018).
  17. L. Cui\*, Y. Xue, S. Noda, and Z. Chen\*, "Self-supporting S@GO-FWCNTs composite films as positive electrodes for high-performance lithium-sulfur batteries," *RSC Adv.* 8, 2260–2266 (2018).
  18. T. Kowase, K. Hori, K. Hasegawa, T. Momma, and S. Noda\*, "A-few-second synthesis of silicon nanoparticles by gas-evaporation and their self-supporting electrodes based on carbon nanotube matrix for lithium secondary battery anodes," *J. Power Sources* 363, 450-459 (2017).
  19. Y. Nagai, A. Okawa, T. Minamide, K. Hasegawa, H. Sugime, and S. Noda\*, "Ten-second epitaxy of Cu on repeatedly used sapphire for practical production of high-quality graphene," *ACS Omega* 2 (7), 3354-3362 (2017).
  20. C. Takazawa, M. Fujita, K. Hasegawa, A. Lukianov, X. Zhang, S. Noda, and M. Ihara\*, "Nano-scale smoothing of double layer porous Si substrates for detaching and fabricating low cost, high efficiency monocrystalline thin film Si solar cell by zone heating recrystallization," *ECS Trans.* 75 (31), 11-23 (2017).
  21. K. Funahashi, N. Tanaka, Y. Shoji\*, N. Imazu, K. Nakayama, K. Kanahashi, H. Shirae, S. Noda, H. Ohta, T. Fukushima\*, and T. Takenobu\*, "Highly air- and moisture-stable hole-doped carbon nanotube films achieved by a boron-based oxidant," *Appl. Phys. Express* 10, 035101-1–4 (2017).
  22. H. Shirae, K. Hasegawa, H. Sugime, E. Yi, R. M. Laine, and S. Noda\*, "Catalyst nucleation and carbon nanotube growth from flame-synthesized Co-Al-O nanopowders at ten-second time scale," *Carbon* 114, 31-38 (2017).
  23. T. Liu, K.C. Kim, B. Lee, Z. Chen, S. Noda, S.S. Jang, and S.W. Lee\*, "Self-polymerized dopamine as an organic cathode for Li<sup>-</sup> and Na<sup>-</sup> ion batteries," *Energy Environ. Sci.* 10, 205–215 (2017).

#### 4.2 総説・著書

1. 野田優「長尺カーボンナノチューブの流動層合成と電池応用」*高分子*, 68 (6), 307-308 (2019).
2. 丸山茂夫監修「カーボンナノチューブ・グラフェンの応用研究最前線」*エヌ・ティー・エス* (2016), 野田優「1.1.1.2 流動層 CVD」pp. 20-26.

#### 4.3 招待講演

1. Suguru Noda, "Production and functionalization of carbon nanotubes for electrochemical energy storage devices," NT19: International Conference on the Science and Application of Nanotubes and Low-Dimensional Materials, I15, Wurzburg, Germany, Jul. 26, 2019 (invited).
2. Suguru Noda, "Enhancing carbon nanotube production using CO<sub>2</sub> and flame," Guadalupe Workshop IX: Workshop on Nucleation and Growth Mechanisms of Single

- Wall Carbon Nanotubes, Fredericksburge, TX, USA, Apr. 16, 2019 (invited).
3. Suguru Noda, "Production and functionalization of carbon nanotubes for energy devices," 1 & 2D Materials International Conference and Exhibition (1 & 2DM), Tokyo Big Sight, Koto-ku, Tokyo, Japan, Jan. 29-30, 2019 (keynote).
  4. 野田 優 「CVD の二次元場から三次元場への展開 - 流動層法による高純度・長尺カーボンナノチューブの高収率合成」 CVD 反応分科会主催第 29 回シンポジウム「流動層の基礎と CVD/ALD による粉体材料の機能化」 東京工業大学キャンパス・イノベーションセンター, 東京都港区, 2018 年 11 月 9 日 (invited).
  5. Suguru Noda, "Customizing carbon nanotube production using metallic foils, CO<sub>2</sub>, and flame," 9th A3 Symposium on Emerging Materials: Nanomaterials for Electronics, Energy and Environment, Kyoto University, Uji, Kyoto, Japan, Oct. 29-31, 2018 (invited).
  6. Suguru Noda, "Production and functionalization of carbon nanotubes for energy devices," 1st International Workshop on Nanocarbon Materials for Energy and Sustainability (NMES18), I2, Peking University, Beijing, July 15, 2018 (invited).
  7. 野田 優 「カーボンナノチューブの各種合成法および流動層合成と展開」 化学工学会関東支部 第 10 回ホットな話題の講習会「カーボンナノチューブ研究開発の現在と未来」, 産業技術総合研究所 つくば中央第 5 事業所, 茨城県つくば市, 2018 年 6 月 29 日 (invited).
  8. 野田 優 「長尺カーボンナノチューブの流動層合成と二次電池三次元電極の創製」 第 23 回流動化・粒子プロセッシングシンポジウム, アクトシティ浜松, 静岡県浜松市, 2017 年 12 月 7 日 (invited).
  9. 野田 優 「挑戦的技術の研究開発と評価の試み: 太陽電池の省資源・簡易製造」 化学工学会 関東支部 イブニングセミナー, 東京理科大学 森戸記念館, 東京都新宿区, 2017 年 11 月 17 日 (invited).
  10. Suguru Noda, "Practical production and functionalization of carbon nanotubes for energy devices," 2017 International Conference on Functional Carbons (ICFC), 2B-4, National Taiwan University of Science and Technology (NTUST), Taipei, Taiwan, Nov. 2, 2017 (invited).
  11. 野田 優 「できかたを理解しうまく作る:カーボンナノチューブと蓄電デバイス」 東京大学 応化談話会, 東京大学 本郷キャンパス, 東京都文京区, 2017 年 5 月 10 日 (invited).
  12. Suguru Noda, "Single-wall carbon nanotubes from supported and floating catalysts on substrates, in fluidized bed, and in gas-phase," Guadalupe Workshop VIII: Workshop on Nucleation and Growth Mechanisms of Single Wall Carbon Nanotubes, Bandera, TX, USA, Apr. 23, 2017 (invited).
  13. 野田 優 「簡易・高速プロセスによるカーボンナノチューブ自立膜の作製と革新的次世代電池の創製」 "Simple and fast fabrication of carbon nanotube-base self-supporting electrodes for innovative next generation rechargeable batteries," 日本化学会第 97 春季年会, ATP 招待講演 1E9-11, 慶應義塾大学 日吉キャンパス, 神奈川県横浜市, 2017 年 3 月 16 日 (invited).
  14. 野田 優 「カーボンナノチューブの合成・機能化とエネルギーデバイス応用」 "Production and functionalization of carbon nanotubes for energy devices," 第 52 回フラーレン・ナノ

チューブ・グラフェン総合シンポジウム, 特別講演 2S-7, 東京都文京区, 2017年3月2日 (invited).

15. Suguru Noda, "Efficient production of carbon- and silicon-based materials for solar-cells and rechargeable batteries," 7th A3 Symposium on Emerging Materials: Nanomaterials for Electronics, Energy and Environment, I-33, Lotte Buyeo Resort, Korea, Nov. 2, 2016 (invited).

#### 4.4 受賞・表彰

1. T. Tsujimura, T. Hakii, and S. Noda, 2016 EDS Paul Rappaport Award from IEEE Electron Devices Society, December 2017.

#### 4.5 学会および社会的活動

2018年~ 第18回アジア太平洋化学工学連合会議(APCChE2019)実行委員幹事、総務委員会副委員長、Student Program オーガナイザー、APCChE-UNIDO 特別シンポジウムオーガナイザー、SDGs Forum オーガナイザー

2017年4月~2019年3月 化学工学会 関東支部幹事 第三企画・委員長

2016年3月~2018年3月 化学工学会 社会実装学創成研究会・代表

2015年4月~2017年4月 化学工学会 理事

2015年4月~2017年4月 化学工学会 国際交流センター・副センター長

2015年2月~ フラーレン・ナノチューブ・グラフェン学会・副会長

2012年9月~ フラーレン・ナノチューブ・グラフェン学会・幹事

2019年7月 2nd Symposium on Nanocarbon Materials for Energy and Sustainability (NMES19) オーガナイザー

2017年10月~ 日本学術会議・連携会員

## 5. 研究活動の課題と展望

CNT は層数、直径、長さ、結晶性など多様であり、用途ごとに適した構造と製法が異なる。本プロジェクトでは複数の合成法を並行して開発、それぞれにパートナー企業も決まり共同研究を推進中である。一部の技術は実用化が見えてきたが、多くの技術は途上であり、スケールアップや用途開拓など実用化に向けた研究開発を推進する。蓄電池研究については基盤研究(S)にて一定の成果をあげ、2019年度に1社と共同研究を開始、もう1社と連携を始めたところである。次々世代にあたる技術であるが、研究開発を継続し、第二期中に実用化へ向けた一定の見通しを得たい。