

令和 2 年 6 月 8 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17H02742

研究課題名（和文）カーボンナノチューブの生分解性の解明と制御

研究課題名（英文）Clarification of the biodegradation of carbon nanotubes for safe use by design

研究代表者

張 民芳（Zhang, Minfang）

国立研究開発法人産業技術総合研究所・材料・化学領域・主任研究員

研究者番号：60518330

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 14,000,000円

研究成果の概要（和文）：カーボンナノチューブ（CNT）は堅牢な構造を持っているため、生体内で分解されにくく、実用化の際に安全上の懸念が非常に大きい。近年、CNTは酵素や免疫細胞により分解される可能性があることが報告され、CNTの生体内での安定性に関する議論が急増している。しかし、定量的な研究がなく、CNTの生分解についてはまだ不明な点が多い。本研究では、CNTの近赤外光吸収特性を活かして、細胞内と生体組織内のCNT量の測定方法を開発し、免疫細胞と実験動物を用いてCNTの生分解性能を定量的に評価した。また、CNTの生分解性能のサイズ依存性を解明し、直径が小さいCNTが大きいの方より分解されやすいことを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

CNT産業の創出に伴って、CNTが環境へ暴露し、動物や人体に吸収されて免疫組織に蓄積する可能性があり、健康への有害な影響への懸念がある。本研究では、CNTの近赤外光吸収特性を活かして、細胞内や生体組織内のCNT定量測定方法を開発した。この技術は、今研究のCNT生分解性の解明に利用できるだけでなく、CNTの安全性評価やCNTのナノメディシンへの応用研究にも役に立つ。また、CNTの生分解特性のサイズ依存性の解明は、CNTの構造特性からCNTの生分解性の予測が可能になり、特定の用途に適したCNTのタイプの選定ができ、安全性を確保したCNTの実用化に貢献される。

研究成果の概要（英文）：The great concern about the risk of carbon nanotubes (CNTs) for practical application is related to their extremely stable structures, which are difficult to be biodegraded. Recently, it has been reported that CNTs may be degraded by enzymes and immune cells, and the debate on the stability of CNTs in living body is rapidly increasing. However, many detail issues are still remained especially no quantitative studies were performed. In this study, a method for measuring the amount of CNT in cells and living tissues by using near infrared absorption technique have been developed, and used to quantitatively evaluate the biodegradation of CNT in vitro and in vivo. In addition, the size dependence of the biodegradability of CNTs was clarified. CNTs with small diameters were more easily degraded than those with larger diameters.

研究分野：カーボンナノ材料

キーワード：カーボンナノチューブ カーボンナノ材料 生分解 免疫細胞 動物実験

1. 研究開始当初の背景

カーボンナノチューブ (CNT) は、さまざまな優れた物性を兼ね備えており、エレクトロニクスから医療まで幅広い分野にわたって社会に大きな便益をもたらすことが期待されている。多くの分野で用途開発が進んでおり、既に工業製品に活用されているものもある。CNT の工業化に従って、より多くの CNT が空気や水などの自然環境に暴露し、動物や人体に吸収され、免疫組織に蓄積される可能性が高い。急性毒性が低いとされている CNT でも、長期的なリスクが非常に懸念されている。現在、経済協力開発機構 (OECD) や国際標準化機構 (ISO) において、CNT の実用化を推進するため、世界標準となる CNT の安全性テストのガイドラインを策定するための作業が進められているが、CNT の体内動態や体内分解に関する重要な部分はまだ完成されていない。また、薬物送達システムや体内イメージングなどの医療分野への応用には、CNT が体内から排出されることや生分解などにより除去されることが望ましい。即ち、CNT の生分解機能を解明または制御することは、CNT の安心・安全性な産業実用化のための急務の課題であると同時に、バイオ分野への応用開拓にも必須である。

一般的に強酸処理または高温での酸化処理以外には、CNT が分解されないことが知られているが、近年植物由来の酵素 (HRP) やヒト好中球酵素 (MPO) により、短尺化した単層 CNT がほぼ完全に分解されたことを報告した^[1]。その後、多層 CNT も酵素により部分的に生分解されることを証明した^[2]。しかし、細胞内および生体内 CNT 量の測定方法は確定されていないため、定量的な研究は殆ど行われていない。CNT の生分解性の特性を明らかにするため、組織や細胞内の CNT の定量方法を確定し、CNT の生分解性と物理化学特性の相関性を明らかにしなければならない。

2. 研究の目的

本研究では、細胞内と生体組織内の CNT を定量するため、CNT に共通している近赤外光吸収特性を利用し、免疫細胞に取り込まれた CNT 量の測定方法を開発する。そして、開発した方法を利用し、免疫細胞と実験動物を用いて CNT の生分解性能を定量的に評価する。さらに、CNT の生分解性能とサイズ、表面修飾や結晶性などの物理化学的特性との関連性を明らかにし、CNT の生分解性能の予測および制御を可能にする方法を創出する。

3. 研究の方法

3.1 免疫細胞の貪食による CNT の生分解性

申請者らが開発した CNT の細胞取り込み量の測定プロセスを図 1 に示す。市販されたマウスの免疫細胞 (Raw264.7) とヒト白血病細胞株 (THP-1) を用いて、CNT/BSA を細胞に取り込ませて、細胞内の CNT の量の経時的な変化から、細胞内で分解された CNT の量を推定する。

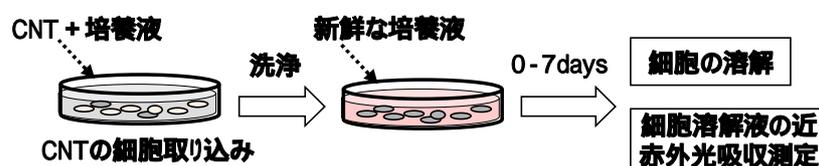


図 1. 免疫細胞内 CNT 量の経時変化の測定プロセス

3.2 動物組織内 CNT の生分解評価

3.2.1 生体組織内 CNT 量の測定手法の確定

CNT の近赤外光吸収測定による生体組織内 CNT の定量方法を確定するため、以下のプロセスを用いる。まず、CNT 分散液の濃度と近赤外光(例えば 700-800nm)の吸光度の検量線を作製する。次に、CNT/BSA 分散液を静脈注射によりマウス体内各組織に集積させ、24 時間後に各組織(肝臓、脾臓、その他)を取り出し、組織を完全に溶解できるように最適な溶解剤を選択し、加熱などを行う。最後に検量線に基づいて、CNT を含む組織の溶解液の近赤外光(例えば 700-800nm)の吸光度(またはラマンの G バンド強度)を測定し、組織の溶解液中 CNT の量を計算する。

3.3.2 動物実験による生体組織内 CNT の分解性の解明

マウス体内での CNT の分解可能性を 4 ヶ月間にわたって調べる。CNT/BSA 分散液を静脈注射により、マウス体内に蓄積させ、経時的に(1、3、7、30、60、90、120 日後)に組織(肝、脾臓、肺など)を取り出し、組織の溶解液を作製し、近赤外光吸収法により組織内の CNT 量を測定する。各臓器内の CNT 量の経時変化から、CNT 分解量を推定する。

3.4 CNT 生分解性の構造依存性の解明

上記 in vitro と in vivo の実験結果を総合的に分析し、CNT の構造(サイズ、表面修飾、結晶性など)の違いによる CNT の生分解性の違いを検討する。また、次亜塩素酸ナトリウムにより、CNT の生分解性の構造依存性を解明する。

4. 研究成果

4.1 免疫細胞内 CNT の生分解性の解明

免疫細胞内 CNT の生分解性の解明するため、申請者らが開発したカーボンナノホーン(CNH)の細胞取り込み量の測定方法である近赤外光吸収法^[3]を再検討し、CNT の細胞内取り込み量の測定方法を確定した(図 1)。この測定方法を国際標準化機構 ISO/TC229 に提案し、NWIP として登録された(ISO/TC229/TS23034)。免疫細胞(Raw264.7、THP-1)と初代細胞(マウスの Kupffer 細胞)を用いて、CNT/BSA を細胞に取り込ませて、光吸収測定法を用いて細胞内の CNT の量の経時的な変化を測定した。免疫細胞内 CNT の量の経時変化から、CNT が生分解されることを定量的に確認できた^[5]。その結果、CNT はどの免疫細胞内においても 20-50%分解されることが分かった。例として、図 2 に THP-1 細胞によりスーパグロース CNT (SG-CNT) の測定結果を示す。

また、SG-CNT の生分解メカニズムを解明するため、SG-CNT 取り込み後の免疫細胞内活性酸素(ROS)の発生量も測定した。その結果、CNT の生分解率と活性酸素の発生量とは正比例していることがわかった。このことから、CNT の免疫細胞内の生分解は活性酸素によることを明らかにした。また、SG-CNT 取り込み後 4 日が経過した免疫細胞の活性酸素発生量は、コントロール細胞のそれと同じであることから、CNT の分解残渣物は細胞への毒性が低い可能性があることもわかった^[4]。

4.2 生体組織内 CNT 量の測定手法の確定

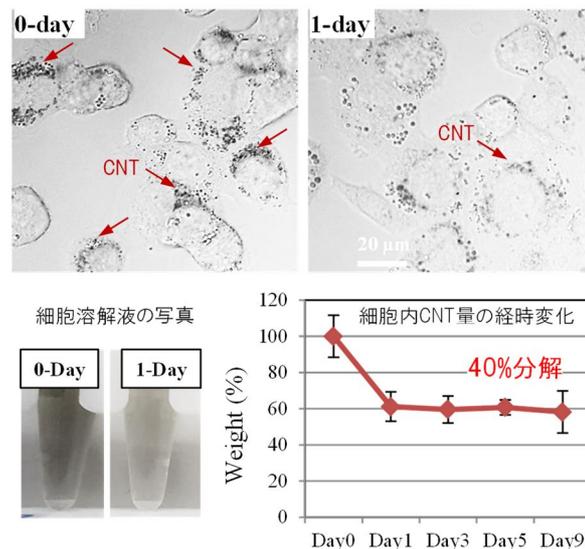


図 2. THP-1 免疫細胞内 SG-CNT の経時変化。SG-CNT を取り込んだ THP-1 細胞の光学顕微鏡写真(上部)、細胞溶解液の写真(左下)と細胞内 CNT の定量測定結果(右下)。

一般的に、体内組織に CNM の蓄積量を測定するには、CNM を放射線物質や、金属粒子などによりラベル化し、体内組織にラベル物質の量から CNM の量を推定する方法が使われている。しかし、ラベル化するには化学反応や内包プロセスなどが必要であるため、CNM の表明性質が変化され、CNM の体内分布もラベル化する前と比べ大きく異なってしまふ。本研究では、ラベル化を利用せず CNM 本来の近赤外光吸収特性を利用して、CNM の肝臓内蓄積量を測定するという方法を確立した。まずは、良い再現性と高い正確性を得るため、様々な分解酵素や分散剤を用いて、各臓器の溶解する最適な条件を見出し、透明な溶解液を作製することに成功した^[5]。この方法を用いて、組織内 CNT の量は、最低 1 μ g/Liver の CNT を測定することが実現できた^[5]。

4.3 組織内 CNT 量の生分解性の解明

CNT の生分解性のサイズ依存性を解明するため、異なった直径の 2 種類の単層 CNT、SG-CNT (直径 1-5 nm、Ld-CNT) と CoMoCat SWNT (直径 0.7-0.8 nm、Sd-CNT) を用いた。BSA で分散した各 CNT の分散液をマウスに単回尾静脈内投与し、投与後 24 時間、3 日、7 日、30 日及び 60 日の各ポイントに CNT の各組織内の量を光吸収法により測定した。下記の図 3 に示しているように、投与 24 時間後 (D1) に、CNT の生体内分布はサイズ依存性があることが分かった。肝臓と脾臓内には太い直径の Ld-CNT の量が多かったが (図 3a、c) 肺には、細い直径 Sd-CNT の蓄積量が高かった (図 3b)。肝臓および肺溶解物中の Ld-CNT および Sd-CNT の量は、時間とともに有意的に減少した。特に、肺内の Ld-CNT と Sd-CNT の量 (図 3b) は 60 日の時点 (D60) にほぼゼロに減少した。Ld-CNT と Sd-CNT の両方で、肝臓、脾臓および肺の総量は、D1 から D60 に注入された線量の約 15% 減少した (図 3d)。これらの結果から、CNT の生体内分布は直径依存性があること、肝臓及び肺に生分解される可能性であることを示された。また、Ld-CNT と Sd-CNT の両方が、60 日の時点で肺からほぼ完全に除去されたから、CNT の肺内マイクロファージ細胞により生分解されたと考えられる。さらに、血漿および組織溶解物中の TGF- β 1、IL-6、INF- γ 、および TNF- α のサイトカインのレベルを測定することにより、CNT の毒性が低いことも確認された。これらの結果は、少量の SWNT が肺内部に入った場合、SWNT の毒性が低いことを示唆された^[5]。

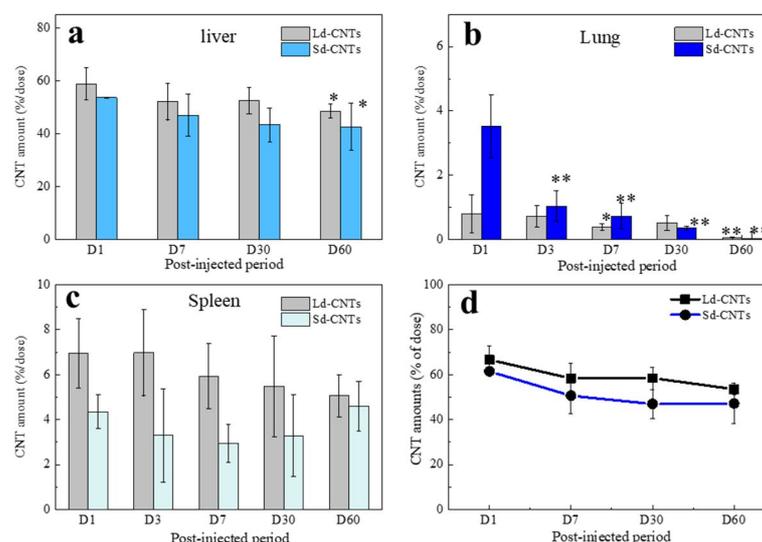


図 3. 組織内 CNT 蓄積量の経時変化^[5]。(a)肝臓；(b)肺；(c)脾臓と(d)肝臓と肺と脾臓の合計。各臓器の CNT の量は、750 nm での組織ライセートの吸光度を測定することで計算した。すべてのデータは、総注射量のパーセンテージとして表示されます[平均 \pm 標準偏差 (SD)、n = 5]。 ** P < 0.01 および * P < 0.05 対 1 日目の値。

4.4 CNTの生分解性とCNT物理化学特性の関連性

CNTの免疫細胞内生分解メカニズムは、酵素反応により次亜塩素酸が発生して、CNTが酸化・分解されると認識されている。これにヒントにして、我々はCNTと次亜塩素酸化合物と反応させて、CNTが完全に分解されることを発見した^[6]（産総研プレスリリース2019年2月4日）。そして、CNTの生分解性とCNT物理化学特性の関連性を解明するため、次亜塩素酸ナトリウムを用いて、市販されている11種類のCNTの分解特性を評価した^[7]。

各CNTの分散液（CNT: 0.1mg/ml）を次亜塩素酸ナトリウム溶液(2.5%)と混合し、37℃で反応させた。各分散液のCNT濃度を光吸収法により経時評価し、CNTが完全に分解される時間とCNT分解の半減期を測定できた。その結果、CNTの生分解性はCNT直径に依存していることを解明した（図4）^[7]。CNTの分解速度は、

SWNTs > 薄い MWNTs > 厚い MWNTs であることを示された。生体系におけるCNTの生分解は次亜塩素酸化合物より複雑であり、生体内の酵素やマクロファージ由来の活性酸素種などはCNTの生分解に影響されることを考えられるが、本研究の結果から、CNT分解の特性がCNTの物理化学的性質、特にCNTの直径に関連していることが間違いない。本研究に得られた成果は、CNTの生分解性能の予測および制御を可能になり、CNTの安全性の解明や、CNTの実用化に適切にCNTの選定などに貢献される。

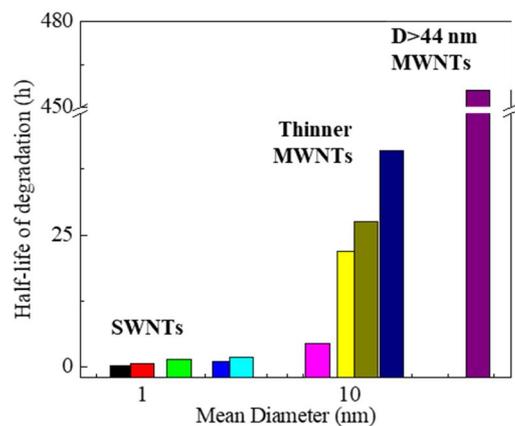


図4. 次亜塩素酸ナトリウムによりCNTの分解性と直径の関係^[7]

参考文献

- [1] B. L. Allen, et al. Nano Lett., 8, 3899-3903 (2008); V. E. Kagan, et al. Nature Nanotechnology, 5, 354-359 (2010); V. E. Kagan, et al. ACS Nano, 8, 5610-5621 (2014).
- [2] J. Russier, et al. Nanoscale, 3, 893-896 (2011); Y. Sato, et al. Scientific Reports, 3, 2516 (2013); C. Bussy, et al. Particle and Fibre Toxicology, 10, 24 (2013).
- [3] M. Zhang, et al. Nanoscale, 7, 2834-2840 (2015).
- [4] M. Yang, M. Zhang et al. Int. J. Nanomedicine 14, 2797-2807 (2019)
- [5] M. Zhang, et al. Nanoscale Advances 4, 1551-1559 (2020).
- [6] M. Zhang, et al. Scientific Reports 9, 1284 (2019)
- [7] M. Zhang, et al. ACS Applied Nano Materials 2, 4293-4301 (2019)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計14件（うち査読付論文 14件／うち国際共著 2件／うちオープンアクセス 9件）

1. 著者名 Zhang Minfang, Yang Mei, Nakajima Hideaki, Yudasaka Masako, Iijima Sumio, Okazaki Toshiya	4. 巻 2
2. 論文標題 Diameter-Dependent Degradation of 11 Types of Carbon Nanotubes: Safety Implications	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ACS Applied Nano Materials	6. 最初と最後の頁 4293 ~ 4301
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1021/acsanm.9b00757	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Yang Mei, Zhang Minfang	4. 巻 6
2. 論文標題 Biodegradation of Carbon Nanotubes by Macrophages	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Frontiers in Materials	6. 最初と最後の頁 1 ~ 7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) doi.org/10.3389/fmats.2019.00225	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Yang Mei, Zhang Minfang, Nakajima Hideaki, Yudasaka Masako, Iijima Sumio, Okazaki Toshiya	4. 巻 Volume 14
2. 論文標題 <p>Time-dependent degradation of carbon nanotubes correlates with decreased reactive oxygen species generation in macrophages</p>	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 International Journal of Nanomedicine	6. 最初と最後の頁 2797 ~ 2807
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2147/IJN.S199187	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Zhang Minfang, Xu Ying, Yang Mei, Yudasaka Masako, Okazaki Toshiya	4. 巻 2
2. 論文標題 Clearance of single-wall carbon nanotubes from the mouse lung: a quantitative evaluation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nanoscale Advances	6. 最初と最後の頁 1551 ~ 1559
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/d0na00040j	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Pippa Natassa, Stangel Christina, Kastanas Ioannis, Triantafyllopoulou Efstathia, Naziris Nikolaos, Stellas Dimitris, Zhang Minfang, Yudasaka Masako, Demetzos Costas, Tagmatarchis Nikos	4. 巻 105
2. 論文標題 Carbon nanohorn/liposome systems: Preformulation, design and in vitro toxicity studies	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Materials Science and Engineering: C	6. 最初と最後の頁 110114 ~ 110114
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1016/j.msec.2019.110114	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Minfang Zhang, Yinmei Deng, Mei Yang, Hideaki Nakajima, Masako Yudasaka, Sumio Iijima & Toshiya Okazaki	4. 巻 9
2. 論文標題 A Simple Method for Removal of Carbon Nanotubes from Wastewater Using Hypochlorite	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 1284
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-018-38307-7	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Mei Yang, Minfang Zhang, Hideaki Nakajima, Masako Yudasaka, Sumio Iijima, Toshiya Okazaki	4. 巻 14
2. 論文標題 Time-dependent degradation of carbon nanotubes correlates with decreased reactive oxygen species generation in macrophage	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 International Journal of Nanomedicine	6. 最初と最後の頁 2797-2807
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2147/IJN.S199187	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Masako Yudasaka, Yohei Yomogida, Minfang Zhang, Masako Nakahara, Norihiko Kobayashi, Takeshi Tanaka, Yuko Okamoto-Ogura, Kumiko Saeki & Hiromichi Kataura	4. 巻 8
2. 論文標題 Fasting-dependent Vascular Permeability Enhancement in Brown Adipose Tissues Evidenced by Using Carbon Nanotubes as Fluorescent Probes	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 14446
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-018-32758-8	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Yue Yu, Masahiro Nishikawa, Ming Liu, Takahiro Tei, Sunil C. Kaul, Renu Wadhawa, Minfang Zhang, Junko Takahashif and Eijiro Miyako	4. 巻 10
2. 論文標題 Self-assembled nanodiamond supraparticles for anticancer chemotherapy	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Nanoscale	6. 最初と最後の頁 8969-8978
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/c8nr00641e	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Minfang Zhang, Mei, Yang, Takahiro Morimoto, Naoko Tajima, Kayo Ichiraku, Katsuhide Fujita, Sumio Iijima, Masako Yudasaka, Toshiya Okazaki	4. 巻 127
2. 論文標題 Size-dependent cell uptake of carbon nanotubes by macrophages: A comparative and quantitative study	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Carbon	6. 最初と最後の頁 93-101
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.carbon.2017.10.085	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Minfang Zhang, Mei Yang, Takahiro Morimoto, Naoko Tajima, Kayo Ichiraku, Katsuhide Fujita, Sumio Iijima, Masako Yudasaka, Toshiya Okazaki	4. 巻 127
2. 論文標題 Size-dependent cell uptake of carbon nanotubes by macrophages: A comparative and quantitative study	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Carbon	6. 最初と最後の頁 93-101
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.carbon.2017.10.085	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Minfang Zhang, y Mei Yang, Masako Yudasaka, Toshiya Okazaki	4. 巻 16
2. 論文標題 Quantification of Carbon Nanotubes Taken up by Macrophage Cells Using Optical Absorption Method	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 e-Journal of Surface Science and Nanotechnology	6. 最初と最後の頁 93-96
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1380/ejssnt.2018.93	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Maki Nakamura, Yoshio Tahara, Shinsuke Fukata, Minfang Zhang, Mei Yang, Sumio Iijima, Masako Yudasaka	4. 巻 90
2. 論文標題 Significance of Optimization of Phospholipid Poly(Ethylene Glycol) Quantity for Coating Carbon Nanohorns to Achieve Low Cytotoxicity	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 BULLETIN OF THE CHEMICAL SOCIETY OF JAPAN	6. 最初と最後の頁 662-666
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1246/bcsj.20170003	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Leon Newman, Neus Lozano, Minfang Zhang, Sumio Iijima, Masako Yudasaka, Cyrill Bussy and Kostas Kostarelos	4. 巻 39
2. 論文標題 Hypochlorite Degrades 2D Graphene Oxide Sheets Faster than 1D Oxidised Carbon Nanotubes and Nanohorns	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 npj 2D Materials and Applications	6. 最初と最後の頁 1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41699-017-0041-3	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計14件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 6件)

1. 発表者名 許穎、張民芳、楊梅、湯田坂雅子、岡崎俊也
2. 発表標題 In vivo evaluation of biodistribution, toxicity and clearance of single wall carbon nanotubes depending on the dispersants
3. 学会等名 FNTG学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 張民芳
2. 発表標題 カーボンナノチューブの生分解
3. 学会等名 黒鉛化合物研究会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 張民芳、許穎、楊梅、湯田坂雅子、飯島澄男、岡崎俊也
2. 発表標題 The fate of single-wall carbon nanotubes in the mouse lung and liver
3. 学会等名 FNTG学会ナノバイオシンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 張民芳、許穎、楊梅、湯田坂雅子、岡崎俊也
2. 発表標題 Quantitative evaluation of the biodegradation of single-wall carbon nanotubes in the mouse lung and liver
3. 学会等名 NT19、International Conference on the Science and Application of Nanotubes and Low-Dimensional Materials (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Minfang Zhang, Yinmei Deng, Mei Yang, Hideaki Nakajima, Masako Yudasaka, Sumio Iijima & Toshiya Okazaki
2. 発表標題 Simple Method for Removal of Carbon Nanomaterials from Wastewater by Using Hypochlorite
3. 学会等名 NT18 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Mei Yang, Minfang Zhang, Hideaki Nakajima, Masako Yudasaka, Sumio Iijima, Toshiya Okazaki
2. 発表標題 Dynamical Changes in Toxicity and Quantity of CNTs after Uptake by Macrophage
3. 学会等名 NT18 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Masako Yudasaka, Yohei Yomogida, Minfang Zhang, Masako Nakahara, Norihiko Kobayashi, Takeshi Tanaka, Yuko Okamatsu-Ogura, Kumiko Saeki & Hiromichi Kataura
2. 発表標題 Near-Infrared Photoluminescent Carbon Nanotubes for Imaging of Brown Adipose Tissue
3. 学会等名 NT18 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Minfang Zhang, Mei Yang, Hideaki Nakajima, Masako Yudasaka, Sumio Iijima, Toshiya Okazaki
2. 発表標題 Toxicity and Degradation of Carbon Nanotubes after Uptake by Macrophage
3. 学会等名 2018 MRS Fall Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Ying Xu, Minfang Zhang*, Mei Yang, Masako Yudasaka, Toshiya Okazaki
2. 発表標題 Degradation of single-wall carbon nanotubes by lung macrophages of mouse in vivo
3. 学会等名 第56回 フラレン・ナノチューブ・グラフェン 総合シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 張 民芳、楊 梅、湯田坂 雅子、岡崎 俊也
2. 発表標題 Quantification of Carbon Nanotubes Uptaken by Macrophage Cells Using Optical Absorption Method
3. 学会等名 11th International Symposium on Atomic Level Characterizations for New Materials and Devices (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 張民芳
2. 発表標題 免疫細胞によるカーボンナノチューブの取り込みと生分解
3. 学会等名 ナノカーボンバイオシンボプログラム
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 張民芳、楊梅、湯田坂雅、岡崎俊也
2. 発表標題 Uptake and biodegradation of CNTs by macrophage
3. 学会等名 FNTG学会、京都大学、2017/09/13
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 張民芳、鄧引梅、楊梅、中島 秀朗、湯田坂雅、飯島澄男、岡崎俊也
2. 発表標題 Biodegradation Rate of Carbon Nanotube Depending on Diameters
3. 学会等名 FNTG学会、東京大学
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 張民芳
2. 発表標題 カーボンナノチューブの生分解
3. 学会等名 第10回ナノカーボン実用化推進研究会、東京大学（招待講演）
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 カーボンナノ材料の処理方法	発明者 張民芳、鄧引梅、楊梅、中島秀朗、岡崎俊也	権利者 産業技術総合研究所
産業財産権の種類、番号 特許、2018-114177	出願年 2018年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----