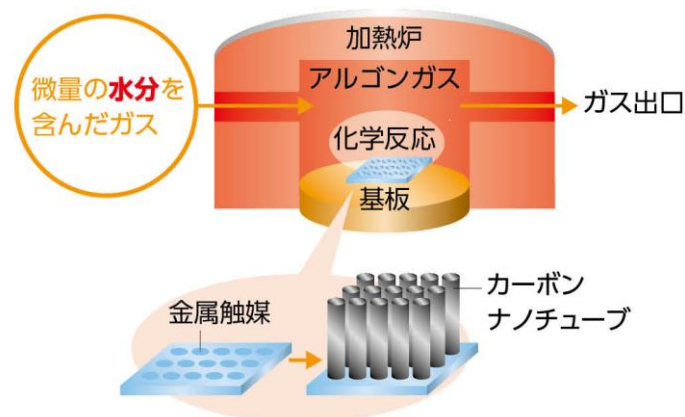


■スーパーブロー法のイメージ



新しい化学物質における地球環境への配慮！ ～カーボンナノチューブに係る共同研究に着手～

名古屋大学大学院工学研究科の堀 克敏 教授は、環境中の微生物によるカーボンナノチューブ (CNT) の生分解性^{注1)}について、日本ゼオン株式会社および名古屋大学発ベンチャーである株式会社フレンドマイクロブ (堀教授のもつバイオ関連技術と研究成果を事業化するために、2017年6月に設立)と共同研究を開始した。

これまで、CNT はエレクトロニクスをはじめとする様々な産業分野に大きな便益をもたらすことが期待されており、応用展開が進んできた。他方、環境中に放出された場合の影響が十分に解明されておらず、早急な対応策の策定が産業化の大きな課題であった。日本ゼオン(株)は2017年度、産業技術総合研究所のナノチューブ実用化研究センターとの共同研究においてSGCNT^{注2)}(単層カーボンナノチューブ)が肺のマクロファージ^{注3)}や肝臓のクッパー細胞^{注4)}等の免疫細胞に貪食^{注5)}され、酸化酵素の作用により生分解されることを示した。また、SGCNTの免疫細胞による分解性の決め手となった近赤外光吸収特性^{注6)}を利用した細胞内CNTの定量方法は、現在、ナノテクノロジーの国際標準化機構 (ISO)において、国際標準化が進められている。

CNTの産業化に際しては、サプライチェーン^{注7)}において、活性汚泥法^{注8)}による生分解性の情報が、安全データシート^{注9)}中の重要な一項目として求められる。これは、活性汚泥中の微生物の働きによって、対象化合物が二酸化炭素と水に分解される程度を示すものである。しかし、炭素からできている無機物のCNTは、環境中では生分解されないと考えられてきた。実際に、これまで、環境微生物^{注10)}によるCNTの生分解は確認されていない。このような状況に鑑み、排水処理、バイオコントロール^{注11)}による環境浄化、広範囲の微生物関連技術の開発に強みを持つ堀教授は、CNT生産・販売企業ならびに産業界の要望に応えるため、また、持続可能な産業技術の発展に貢献するため、日本ゼオン(株)及び(株)フレンドマイクロブとの協業により、本課題に取り組むこととした。今後、CNTの環境生分解性を明らかにし、製造・販売・使用・廃棄の全ライフサイクルにおける環境管理手法を構築する。

【開発の背景】

鉛筆の芯やダイヤモンドが炭素でできていることはよく知られているが、カーボンナノチューブ（以下 CNT）は炭素を構成元素とした、直径がナノメートル（10 億分の 1 メートル）サイズのチューブ（筒）状の素材であり、髪の毛の 5 万分の 1 の細さのチューブである。CNT は日本人の発明によるものであり、次代を担う素材として期待されている。

CNT は優れた熱、電気、力学特性を示し、化学的にも極めて安定な物質であることから、エレクトロニクス、エネルギー等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。日本ゼオン（株）は、これら応用製品の市場での需要に応えるべく、スーパーグロース法^{注12}を用いた CNT（SGCNT）の量産工場を徳山工場内に建設し、2015 年から工場を稼働している。

このように、SGCNT は様々な産業分野に大きな便益をもたらすことが期待される一方、環境中に放出された場合の環境への影響が懸念されてきた。2017 年度、日本ゼオン（株）は、産業技術総合研究所（産総研）ナノチューブ実用化研究センターとの共同研究において、SGCNT が吸入暴露^{注13}された場合には肺のマクロファージにより、また、血管に入った場合には肝臓に運ばれクッパー細胞により貪食され、これら免疫細胞の酸化酵素の作用により、生体内では生分解されることを示してきた。他方、環境中での生分解性については、活性汚泥法による分解試験により評価されることが通常であるが、炭素を主体とする CNT は一般には無機物とみなされ、これを生分解する微生物は存在しないとされてきた。実際に、経済協力開発機構で進められた CNT についての安全性試験（スポンサーシッププログラム）では、単層、多層を問わず、CNT には環境生分解性^{注14}は認められておらず、CNT を分解する微生物の報告例もない。このようなことから、一般には、CNT を含む廃液は水分を蒸発、固化させて焼却する方法が採用されている。ただし、今後、SGCNT の応用が進み、量産が行われるようになると、このようなコストと時間のかかる排液管理策には量的な限界が生じる。

【研究のポイント】

1. スーパーグロース法で作製したカーボンナノチューブを用い、環境中や活性汚泥中で、単層 CNT が微生物によって分解されるかどうかを調べる。また、分解されるようなら、そのメカニズムや条件を解明する。
2. 上記結果を踏まえ、製造、販売、使用、廃棄の全ライフサイクルにおける環境管理手法を検討する。

【意義】

人類は、これまで多くの化学物質や材料を創り出し、それによって、我々の生活レベルや利便性を向上させてきた。我々の生活や社会は、これら化学物質や材料なしでは成り立たない。新しく産み出された化学物質や材料の多くは、最初は安全であると評価され（あるいは考えられ）、汎用されるようになった。しかし、かなりの年月が経ってから、地球環境や生態系、さらには我々の健康に悪影響を及ぼすことがわかり、製造や使用が禁止されるようになったものも少なくない。絶縁油

として重宝された PCB や農薬 DDT、冷媒として常用されてきたフロン、建築資材など様々な分野で使われてきたアスベストなど、挙げればきりが無い。現在、多量に使い捨てにされているプラスチックでさえ、環境中に漏出して劣化し、マイクロプラスチックとして深刻な海洋生態系の破壊をもたらしていることが、世界で大きな問題となっている。

今後は、新しい化学物質や材料の開発と産業化においては、健康への影響はもちろん、生態系や地球環境への直接的、間接的影響を慎重に検討し、製造、販売、使用、廃棄の全ライフサイクルにおける管理手法を徹底することが求められる。企業においても、そのような取り組みに積極的であることが、対外的評価を高め、発展していく要素となる時代になっている。

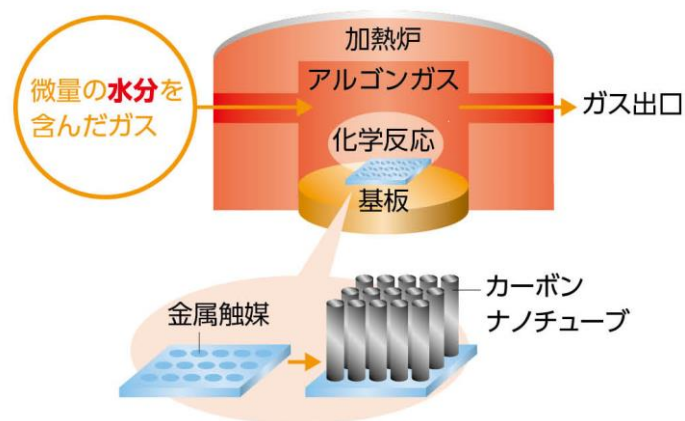
CNTをはじめとするナノ材料は、優れた物性を有し、今後ますます実用化・産業化が期待される素材である。だからこそ、今この段階で、健康や生態系への安全性・影響をきちんと評価することが極めて重要である。製造責任をもつ企業と、社会に貢献する技術開発を担う大学が連携してこれに取り組む意義は、極めて大きい。大学の社会貢献の重要性が指摘される中、社会と産業に広く貢献し得る今回の共同研究は、今後の大学の在り方の指標にもなるであろう。

【今後の予定】

上述のとおり、環境中の微生物による SGCNT の生分解は難しいことが想定される。しかし、新しい発想をもって本研究に取り組めば、SGCNT の生分解性の程度、特殊な環境または条件下での分解の可能性、分解微生物の存否などに関する新しい知見が得られることが予想される。その知見をもとに、SGCNT の管理手法を構築する。常識にとらわれず、いろいろとアイデアをひねり出しながら、研究を進めていきたい。

【参考図】

■ スーパーブロー法のイメージ



【用語説明】

- 注 1) **生分解性**: 生体内や環境中で、物質が生物の作用によって分解される性質。
- 注 2) **SGCNT**: 日本ゼオンが製造、ゼオンナノテクノロジーが販売する単層カーボンナノチューブを主とする炭素材料。産総研ナノチューブ実用化研究センターの畠賢治センター長により開発されたスーパーグロース法が採用されている。
- 注 3) **マクロファージ**: 白血球の一種で、体内に生じた変性物質や侵入した細菌、異物を捕食して消化する機能を有する。免疫機能の中心的役割を担っている。
- 注 4) **クッパー細胞**: 肝臓に存在する貪食細胞の一つで、マクロファージの一種である。
- 注 5) **貪食**: 細菌や死んだ細胞、大きな異物を細胞内の食胞に取り込み消化することで、無害化すること。
- 注 6) **近赤外光吸収特性**: 物質が、近赤外域の波長(800~2500 nm)の光を吸収する特性。
- 注 7) **サプライチェーン**: 原材料・部品の調達から、製造、在庫管理、販売、配送までの製品の全体的な流れのこと。
- 注 8) **活性汚泥**: 微生物が有機物を酸化分解しながら増殖する際に形成する浮遊性汚泥の総称であり、排水・汚水の浄化手段として下水処理場、し尿処理場、浄化槽ほかで広く利用されている。
- 注 9) **安全データシート**: 有害性のおそれがある化学物質を含む製品を他の事業者に譲渡または、提供する際に、対象化学物質等の性状や取り扱いに関する情報を提供するための文書。
- 注 10) **環境微生物**: 土壌中、水圏環境中、あるいは大気中など、いわゆる環境中に存在する微生物。
- 注 11) **バイオコントロール**: 環境中には無数の微生物が存在し、互いに生存競争や共生関係を繰り広げながら、それぞれの環境に適した微生物群衆からなる微生物フローラが形成されている。ここに、何らかの人為的操作を加えたり、当該環境外からもってきた微生物を投入したりすることで、微生物フローラの構成種をコントロールし、ひいては汚染物質の分解や農業に適した土壌づくりなど、環境そのものをコントロールすること。
- 注 12) **スーパーグロース法**: 化学気相成長法(CVD法)の一種で、CNT合成時に微量の水分を加熱炉内に加えることで、高効率、高純度な単層CNTを作製することができる。触媒効率は、従来のCVD法と比較して2,000倍以上であり、大量生産が困難であった単層CNTの量産化技術として期待されている。上図を参照のこと。
- 注 13) **吸入暴露**: ある物質を吸入することにより、主として呼吸器系の肺などの臓器や細胞がその物質に曝されること。
- 注 14) **環境生分解性**: サプライチェーンにおけるマテリアルの必須の情報として安全データシートに記載される一項目。一般には経済協力開発機構で開発された活性汚泥法による標準試験法が用いられる。