

## 1. 消費者製品等に含まれるナノマテリアル等の情報の収集

日本国内におけるナノマテリアル等利用製品(食品及び食品容器を除く、以下同じ)に関する情報を収集した。

調査対象物質は、ナノマテリアル等製造・輸入業者より直接情報を収集し、川中・川下ユーザーを追跡することにより、ナノマテリアル等が含有される最終製品を特定し、その含有形態、濃度(使用量)等を調査した。また、それらの開発状況についても調査した。

### 1.1. 調査方法

#### (1) 調査対象物質

本調査では、以下の 18 物質等を調査対象とした。

- フラーレン(水酸化フルーレンや誘導体を含む)
- 単層カーボンナノチューブ
- 多層カーボンナノチューブ
- グラフェン
- 酸化チタン(ルチル型、アナターズ型、の両方を対象とする)
- ナノシリカ
- プラチナ
- 金
- 銀
- 鉄
- 亜鉛(主に酸化亜鉛)
- ニッケル
- ナノクレイ
- ナノセルロース
- 量子ドット
- デンドリマー
- カーボンブラック
- 酸化アルミニウム
- 上記のサブナノマテリアルを含む

#### (2) 調査方法

調査対象物質のうち、既に製品化されている物質について、主要なナノマテリアル等原料製造業者をそれぞれ 2~3 社選定し、ナノマテリアル等が含有される最終製品に関する情報について調査を行い、最終製品の特定を行った。なお、必要に応じて、川中・川下ユーザーについても調査対象とした。また、最終製品における各対象物質の含有形態、濃度(使用量)等については、開発段階のものが中心で、新規に開発された商品がほとんど確認できなかったことから、平成 28 年度までの調査結果を基にした。さらに、各最終製品のリスク評価に関する考え方についても、可能な限り製造業者の情報を得るようにした。なお、平成 27 年度及び 28 年度本事業の調査対象物質については、その調査結果も参考とした。

### 1.2. 調査結果概要

#### (1) 調査対象物質の使用状況のまとめ

調査結果のまとめを表 1.2-1 に示した。

フルーレン、酸化チタン、ナノシリカ、銀、ナノクレイ、ナノセルロース、量子ドット、デンドリマーについては、市場は横ばい傾向もしくは研究開発中であり、フルーレン、ナノシリカ及びナノクレイ以外の物質については、現在も、研究開発や用途開発が盛んに行われていた。なお、ナノシリカ、プラチナ、酸化亜鉛については、市場規模はわずかながら年々拡大しているものの、平成 29 年度調査から新たな研究開発事例や用途開発事例を確認することはできなかった。また、金・鉄について

は開発中ではあるものの、平成 29 年度調査から新たな研究開発事例や用途開発事例を確認することはできなかった。こうした国内の市場動向を整理すると、今年度も継続して研究開発や用途開発が盛んに行われている物質、あるいは今年度製品化された事例がある物質、市場規模が大きく変化した物質は以下の 11 物質であった。

- 単層カーボンナノチューブ
- 多層カーボンナノチューブ
- グラフェン
- 酸化チタン(ルチル型、アナターズ型、の両方を対象とする)
- 銀
- ニッケル
- ナノセルロース
- 量子ドット
- デンドリマー
- カーボンブラック
- 酸化アルミニウム

そこで、上記 11 物質を平成 29 年度調査対象物質として選定した。

多層カーボンナノチューブについては、2014 年度以降、生産量が増加傾向にあり、2020 年には 2014 年比 3 倍の増加が予想されている。これに対して、単層カーボンナノチューブの用途開発は、依然として盛んである。他方、グラフェンについては、日本での用途開発は世界に比べると遅れているのが現状ではあるが、2015 年度の用途開発は目覚ましく、大量生産技術に関する特許も取得したことから、今後、国内での市場が拡大することが期待される。

表 1.2-1 調査対象候補物質の使用実態

物質名	市場動向	研究開発・用途開発・製品化等の状況	平成 29 年度本事業の調査結果の記載
フラーレン	横ばい	新たな研究開発は行われていない	-
単層カーボンナノチューブ	開発中	研究開発が盛んである	○
多層カーボンナノチューブ	回復	用途開発が盛んである	○
グラフェン	開発中	用途開発が盛んである	○
酸化チタン	拡大基調	研究開発・用途開発ともに盛んである	○
ナノシリカ	横ばい	新たな研究開発はほとんど行われていない 新たな用途開発も確認できない	-
プラチナ	微増	新たな研究開発は行われていない	-
金	開発中	新たな研究開発はほとんど行われていない	-
銀	横ばい	研究開発、製品化ともに盛んである	○
鉄	開発中	新たな研究開発はほとんど行われていない	-
亜鉛			
酸化亜鉛	微増	新たな研究開発は行われていない	-
ニッケル	増加傾向	新たな研究開発はほとんど行われていない	○
ナノクレイ	横ばい	新たな研究開発はほとんど行われていない	○
ナノセルロース	開発中	研究開発・用途開発ともに盛んである	○
量子ドット	開発中	研究開発・用途開発ともに盛んである	○
デンドリマー	開発中	研究開発・用途開発ともに盛んである	○
カーボンブラック	微増	用途開発は盛んである	○

物質名	市場動向	研究開発・用途開発・製品化等の状況	平成 29 年度 本事業の調査 結果の記載
酸化アルミニウム	開発中	研究開発・用途開発ともに盛んである	○

(2) 調査対象物質ごとの調査結果

(ア) 単層カーボンナノチューブ (SWCNT)

(i) 製品概要

サイズ	直径：0.5nm～3 nm 長さ：～10 μm																																												
形状	アスペクト比の大きな凝集体（バンドル構造）																																												
計測技術	SEM、TEM																																												
物性	<p>・ SWCNT は一般にナノマテリアルの中でも非常に直径が小さくサブナノメートルのものもある。またアスペクト比が大きい。目的により、特性と純度の要求が大きく変わり、研究用に多様な種類が販売されている。以下に例を示す。</p> <table border="1" data-bbox="496 835 1289 1137"> <tbody> <tr> <td>製品</td> <td>ZEONANO SG101</td> </tr> <tr> <td>外観</td> <td>黒色粉体</td> </tr> <tr> <td>比表面積</td> <td>800m<sup>2</sup>/g 以上</td> </tr> <tr> <td>CNT 配向集合体の長さ</td> <td>100～600μm</td> </tr> <tr> <td>平均直径</td> <td>3～5nm</td> </tr> <tr> <td>Fe 不純物量</td> <td>1%未満</td> </tr> <tr> <td>炭素純度</td> <td>99%以上</td> </tr> </tbody> </table> <p>出典：ゼオンナノテクノロジー株式会社 ホームページ <a href="http://www.zeonnanotech.jp/products.html">http://www.zeonnanotech.jp/products.html</a></p> <table border="1" data-bbox="406 1232 1378 1532"> <thead> <tr> <th>製品</th> <th>SWeNT® SG-76</th> <th>SWeNT® SG-65</th> <th>SWeNT® CG-100</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>炭素含量</td> <td>&gt;90%</td> <td>&gt;90%</td> <td>&gt;90%</td> </tr> <tr> <td>SWNT 炭素含量</td> <td>≥77% (carbon as SWNT)</td> <td>≥77% (carbon as SWNT)</td> <td>≥70% (carbon as SWNT)</td> </tr> <tr> <td>直径</td> <td>0.7～1.13 nm</td> <td>0.7～0.93 nm</td> <td>0.7～1.0 nm</td> </tr> <tr> <td>長さ</td> <td>300～2,300 nm</td> <td>≥700 nm</td> <td>450～2,300 nm</td> </tr> <tr> <td>融点</td> <td colspan="3">3,652～3,697 °C (文献値)</td> </tr> <tr> <td>密度</td> <td colspan="3">1.7～1.9 g/cm<sup>3</sup> at 25 °C (文献値)</td> </tr> </tbody> </table> <p>出典：シグマアルドリッチ ジャパン (同) ホームページ <a href="https://www.sigmaaldrich.com/content/dam/sigma-aldrich/docs/SAJ/Brochure/1/j_aldrich_cnt_list.pdf">https://www.sigmaaldrich.com/content/dam/sigma-aldrich/docs/SAJ/Brochure/1/j_aldrich_cnt_list.pdf</a></p>			製品	ZEONANO SG101	外観	黒色粉体	比表面積	800m <sup>2</sup> /g 以上	CNT 配向集合体の長さ	100～600μm	平均直径	3～5nm	Fe 不純物量	1%未満	炭素純度	99%以上	製品	SWeNT® SG-76	SWeNT® SG-65	SWeNT® CG-100	炭素含量	>90%	>90%	>90%	SWNT 炭素含量	≥77% (carbon as SWNT)	≥77% (carbon as SWNT)	≥70% (carbon as SWNT)	直径	0.7～1.13 nm	0.7～0.93 nm	0.7～1.0 nm	長さ	300～2,300 nm	≥700 nm	450～2,300 nm	融点	3,652～3,697 °C (文献値)			密度	1.7～1.9 g/cm <sup>3</sup> at 25 °C (文献値)		
製品	ZEONANO SG101																																												
外観	黒色粉体																																												
比表面積	800m <sup>2</sup> /g 以上																																												
CNT 配向集合体の長さ	100～600μm																																												
平均直径	3～5nm																																												
Fe 不純物量	1%未満																																												
炭素純度	99%以上																																												
製品	SWeNT® SG-76	SWeNT® SG-65	SWeNT® CG-100																																										
炭素含量	>90%	>90%	>90%																																										
SWNT 炭素含量	≥77% (carbon as SWNT)	≥77% (carbon as SWNT)	≥70% (carbon as SWNT)																																										
直径	0.7～1.13 nm	0.7～0.93 nm	0.7～1.0 nm																																										
長さ	300～2,300 nm	≥700 nm	450～2,300 nm																																										
融点	3,652～3,697 °C (文献値)																																												
密度	1.7～1.9 g/cm <sup>3</sup> at 25 °C (文献値)																																												
性能／特性	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ Sp<sup>2</sup> 炭素構造に基づく高強度（鋼鉄の約 100 倍）</li> <li>・ CNT 構造に基づく高い柔軟性</li> <li>・ 軽量である（アルミの半分程度）</li> <li>・ 均一性が高く分散性にも優れている</li> <li>・ 結晶性が高くアスペクト比が大きい</li> <li>・ 熱伝導性がよい（銅の約 10 倍、ダイヤモンドより高い）</li> <li>・ 耐食性、摺動性が高い</li> <li>・ 比表面積が大きい</li> <li>・ 導電性が高い（銅の約 1,000 倍、銀よりも高い）</li> <li>・ SWCNT の直径とねじれの度合いによって、電子的特性が大きく変わり金</li> </ul>																																												

	属様の伝導体として挙動するものやバンドキャップ半導体としての挙動を示す。
製造会社	<p>【国内】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 日本ゼオン（株）</li> <li>・ （株）名城ナノカーボン</li> <li>・ （株）マイクロフェーズ</li> <li>・ 本荘ケミカル（株）</li> </ul> <p>【海外】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ NanoIntegriss（販売：（株）オプトサイエンス、シグマアルドリッチ ジャパン（同））</li> <li>・ KH Chemicals（販売：（株）巴工業）</li> <li>・ CNano Technology（販売：丸紅情報システムズ（株））</li> <li>・ South West Nano Technologies（販売：シグマアルドリッチ ジャパン（同））</li> <li>・ OCSiAl（販売：楠本化成）</li> </ul>

#### (ii) 市場規模

SWCNT は、開発段階であり、市場規模は小さく、2014 年の世界市場規模はメーカーの出荷量ベースで 0.8 トンと報告されている（矢野経済研究所 ニュースリリース）。SWCNT は非常に高価であるため、量産化のための技術開発が進められてきたが、2015 年 11 月には、日本ゼオンが産業技術総合研究所（以下、「産総研」とする）で開発した「スーパーグロース法」を利用した量産工場が稼働した。また、OCSiAl 社は、生産能力 50t/年の新工場建設を発表した。2017 年稼働予定であり、現状の能力 10t/年と合わせて 60t/年の生産能力となる。日本ゼオンの量産化や OCSiAl の生産能力増強など供給体制は整いつつあり、富士キメラ総研の推定による 2016 年の SWCNT の販売量は 10 トンと大幅に増加している。

SWCNT の量産技術も確立しつつあり、今後は二次電池用途に加え、キャパシタなどのさらに高付加価値の市場をターゲットとしており、新規用途への展開も期待されている。

#### (iii) 主な用途

SWCNT はその非常に特徴的な性質により多くの用途が期待される。代表的なものを以下に示す。

- ・ エレクトロニクス分野：透明導電膜、トランジスタ、LSI 配線、薄膜半導体
- ・ エネルギー分野：リチウムイオン電池、キャパシタ、燃料電池
- ・ マテリアル：導電性塗料／樹脂、導電性ペーパー／繊維、強化樹脂／強化金属、放熱部材
- ・ バイオ：細胞培養、バイオセンサー、ドラッグデリバリー
- ・ 構造材料：軽量部材
- ・ 医療分野：再生医療

SWCNT は多層カーボンナノチューブ (MWCNT) に比べ、非常に均一性が高く、また構造により電氣的性質が大きく変わるため、エレクトロニクス分野での利用の期待が高い。半導体性 SWCNT は薄膜トランジスタの活性層への利用が期待されている。また、半強度と柔軟性という機械的特性と電子的特性との組み合わせによって、プリンタブル及びフレキシブルエレクトロニクス用の材料として有望である。

#### (iv) 研究開発事例

##### ①カーボンナノチューブを用いた塗料で電磁波遮蔽

開発者：国立研究開発法人産業技術総合研究所 ナノチューブ実用化研究センター CNT 用途チーム研究員 阿多 誠介、特定集中研究専門員 堅田 有信、物理計測標準研究部門電磁気計測研究グループ研究員 加藤 悠人  
開発機構：国立研究開発法人 産業技術総合研究所

概要:国立研究開発法人 産業技術総合研究所 ナノチューブ実用化研究センターCNT 用途チーム 阿多 誠介 研究員、堅田 有信 特定集中研究専門員、物理計測標準研究部門電磁気計測研究グループ 加藤 悠人研究員らは、スーパーグロース法で作製した単層カーボンナノチューブ (SGCNT)を用いて、高い電磁波遮蔽能を持つ膜を形成する塗料を開発した。さまざまな電子機器の電磁波を遮蔽する方法として、電子機器やそれに接続する部品を金属の筐体に収納する方法が従来用いられている。最近では、電子機器の多様化や小型軽量化に伴い、樹脂やゴムの複雑な形状の筐体やそれらの材料で覆われた部品が用いられることも多くなっており、複雑な形状の筐体や部品を基材として電磁波遮蔽塗料を塗布し、電磁波遮蔽能を付与する方法が注目されている。しかし、既存の電磁波遮蔽塗料は、基材の選択性に制限があったり、付与できる電磁波遮蔽能が低いなどの課題があった。今回、電磁波遮蔽能を持つ塗布膜を形成できる、SGCNTを用いた水性塗料(SGCNT系水性塗料)を開発した。この塗料は、基材の選択性が高く、バーコート法、スプレー法、ディップ法などのさまざまな塗布方法が利用できる。そのため平面ばかりではなく複雑な形状の基材にも塗布膜を形成することができる。さらに形成した塗布膜は高い電磁波遮蔽能と高温での耐久性を持ち、柔軟性があり、基材の変形にも追従できる。今後、高温環境で使用される自動車用ワイヤーハーネスや、可動部や複雑形状を持つ産業用ロボットなど、さまざまな分野での電磁波遮蔽対策への活用が期待される。

出典:産総研ホームページ(2017/06/12 掲載)

[http://www.aist.go.jp/aist\\_j/press\\_release/pr2017/pr20170612/pr20170612.html](http://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2017/pr20170612/pr20170612.html)

### ②スーパーグロース単層カーボンナノチューブの生分解性を確認

開発者:国立研究開発法人 産業技術総合研究所ナノチューブ実用化研究センターCNT 評価チーム主任研究員 張 民芳、研究チーム長(兼)同研究センター 副研究センター長 岡崎 俊也

開発機構:国立研究開発法人 産業技術総合研究所、日本ゼオン株式会社

概要:国立研究開発法人 産業技術総合研究所ナノチューブ実用化研究センターCNT 評価チーム 張 民芳 主任研究員、岡崎 俊也 研究チーム長(兼)同研究センター 副研究センター長らは、日本ゼオン株式会社(以下「日本ゼオン」という)と共同で、近赤外光吸収測定法を用いてカーボンナノチューブ(CNT)の細胞への取り込み量を定量化する産総研独自の技術により、スーパーグロース法で作成した単層CNT(SGCNT)量の免疫細胞内での経時変化を測定し、SGCNTが生分解されることを明らかにした。さらに、発生する活性酸素の経時変化を測定した結果、SGCNTが生分解されると活性酸素の発生量は減少し、細胞への毒性が低下することが示唆された。この測定技術は、CNTの安全管理に重要な新しい定量測定法を提供するのみならず、現在産業化が進んでいる単層CNTの安全性に関わる重要な知見をもたらし、CNT産業の発展に貢献することが期待される。

出典:産総研ホームページ(2017/09/12 掲載)

[http://www.aist.go.jp/aist\\_j/press\\_release/pr2017/pr20170912/pr20170912.html](http://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2017/pr20170912/pr20170912.html)

### ③耐久性、経済性に優れた実用的な耐熱Oリングを開発

開発者:国立研究開発法人 産業技術総合研究所ナノチューブ実用化研究センターCNT 用途チーム特定集中研究専門員 小松 正明、小坂井 暁史、主任研究員 阿多 誠介

開発機構:国立研究開発法人 産業技術総合研究所

概要:国立研究開発法人 産業技術総合研究所ナノチューブ実用化研究センターCNT 用途チーム 小松 正明 特定集中研究専門員、小坂井 暁史 特定集中研究専門員、阿多 誠介 主任研究員らは、フッ素ゴム(FKM)とスーパーグロース法で作製した単層カーボンナノチューブ(SGCNT)を複合化して、耐久性と経済性を満たした耐熱Oリングを開発した。技術移管先企業からの2018年度中の上市を目指し、CNT複合材料研究拠点からサンプル提供を開始する。今回開発した耐熱Oリングは230℃程度までの高温域での使用を想定している。こ

れを実現するために、初期の強度だけでなく、長時間高温にばく露した後での 230 °Cでの強度を保持できること、長時間シール性を保持する圧縮永久ひずみを有すること、および、耐薬品性を備えることなどの耐久性を満たすための材料設計を CNT 複合材料研究拠点で行った。さらに、経済性を満たすために、同拠点にて低コスト量産プロセスを開発した。

出典：産総研ホームページ(2018/02/08 掲載)

[http://www.aist.go.jp/aist\\_j/press\\_release/pr2018/pr20180208/pr20180208.html](http://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2018/pr20180208/pr20180208.html)

(v) 利用事例

日本ゼオンでは、スーパーグロース法による SWCNT「ZEONANO™MSG101」を製造・販売している。同製品の代表性状は製品概要に示した。同社は、同製品の個々の特性に応じた用途例を提案している(表 1.2-2)。

表 1.2-2 ZEONANO™MSG101 の特徴と用途例

特徴	利点	用途例
単層	単位重量当たりの強度：大	高強度ポリマー
比表面積大	電荷を多く蓄えることが可能	蓄電デバイス電極
長尺(数 100µm)・ 高アスペクト比	バインダーフリーで自立膜形成	蓄電デバイス電極
	パーコレーション閾値：低	導電性ポリマー、帯電防止ポリマー、導電性塗料
高純度	電解液などと反応しにくい	蓄電デバイス電極

(※ゼオンテクノロジーウェブサイトより)

日本ゼオンでは上記 SWCNT の量産工場を 2015 年より稼働しており、工場の生産能力は、SGCNT の長さや基板上的密度によって変わるが、数トン/年程度である。現在は、まだサンプル出荷がほとんどであり、商品化に至ったものはまだない。

また、日本ゼオンでは従来よりゴム製品の開発・販売を行っており、自社では、既成事業とコラボして、ゴムに SWCNT を練りこむことで、高温でも耐久性が向上し、疲労に強い用途を開発中である。実際の用途としては、高温・高圧装置のリース剤や石油掘削のシール材等をサンプル出荷している。この用途ではシール材交換によるプラント停止が減り稼働率が上がるため、高価なシール材でも適用可能としている。

(vi) ナノリスク評価

単層カーボンナノチューブを製造している事業者は、ばく露等の対策として、CNT を取扱う際には、クリーンルーム内で作業を行い、排気は HEPA フィルター、スクラバー経由で大気に排出している。また、CNT 製造装置は、クリーンルーム内に設置されており、作業とは隔離されている。保管は、密閉性の高い容器での保管を行い、作業記録を徹底している。他の事業者においても、製造設備は完全密閉であり、後工程の製品の取り出し、梱包時には、可能な限り粉じんを除去するように、局所排気設備等を使用している。また、作業者の装備についてもエアラインマスク等を装着する等して、可能な限りの防塵強化を行っている。出入口にはエアシャワー室を設置しているほか、集塵にはバグフィルター、HEPA フィルターを設置している。

労働者に対しては、作業従事者にばく露対策を説明するほか、作業時には、ウェア、手袋、マスク、ゴーグルの保護具の着用を徹底して実施している。また、労働者教育として、関係官庁の動向を説明している。別の事業者では、既に発せられている通知、ガイドラインについては、労働者に教育しているほか、労働安全衛生法上の各種教育、ISO9001、ISO14001 に基づく力量教育等により、資格取得に努め、理解度の向上を進めている。

(経済産業省 ナノマテリアル情報提供シート

[http://www.meti.go.jp/policy/chemical\\_management/other/nano\\_program.html](http://www.meti.go.jp/policy/chemical_management/other/nano_program.html))

また、日本ゼオンでは、TASC(技術研究組合単層 CNT 融合新材料研究開発機構)とともに、自主安全管理支援のために排出・ばく露評価技術の開発、自主安全管理支援のための簡易で迅速な有害性評価手法の開発、自主安全管理支援のための安全性情報の提供と技術普及活動、を行っている。その成果として、TASC と AIST(独立行政法人 産業技術総合研究所)の安全科学研究部門(RISS)とともに、「CNT の安全性試験のための試料調整と計測、および細胞を用いたインビトロ試験の手順」、「CNT の作業環境計測の手引き」、「ケーススタディ報告書(安全性データおよび TASC 自主安全管理の紹介)」、「SG-単層 CNT データ&自主安全管理」を作成し、AIST-RISSあるいはゼオンナノテクノロジーのウェブサイトに公開している。また、NEDO 研究プロジェクト「ナノ粒子特性評価手法の研究開発」(2006-2011 年)の結果として策定したリスク評価書、その考え方の概略、有害性試験のための試料調整と計測のための手順書、排出・ばく露評価書、有害性評価のための手順書、気中粒子の校正に関する手順書、フィルタに関する手順書、社会受容のためのビジョンを、ゼオンナノテクノロジーのほか、NEDO、AIST 等のウェブサイトに公開している。(ゼオンテクノロジー ウェブサイト <http://www.zeonnanotech.jp/>)

(イ) 多層カーボンナノチューブ (MWCNT)

(i) 製品概要

サイズ	直径：30～100 nm 長さ：～数 10 μm																																																																		
形状	アスペクト比の大きな凝集体 (バンドル構造)																																																																		
計測技術	SEM、TES																																																																		
物性	<ul style="list-style-type: none"> <li>一般的な MWCNT は SWCNT が数層重なった形状を持つ。目的により、特性と純度の要求が大きく変わり、研究用に多様な種類が販売されている。一方、GSI クレオス(株)の製品はカップ型が重なった形を持ち、全体としては長い繊維状の形状であるが、その性質はかなり違っている。また、最近、東レ(株)では2層のカーボンナノチューブを開発している。</li> </ul> <p>1) 一般的な多層カーボンナノチューブ</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">項目</th> <th rowspan="2">単位</th> <th colspan="3">代表値</th> <th rowspan="2">測定法</th> </tr> <tr> <th>NT-7</th> <th>CT-12</th> <th>CT-15</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>繊維径</td> <td>nm</td> <td>65</td> <td>110</td> <td>150</td> <td rowspan="2">FE-SEM</td> </tr> <tr> <td>アスペクト比</td> <td>—</td> <td>&gt;100</td> <td>&gt;100</td> <td>&gt;1</td> </tr> <tr> <td>かさ密度</td> <td>g/cm<sup>3</sup></td> <td>0.007</td> <td>0.012</td> <td>0.014</td> <td>沈降嵩密度法(HCC法)</td> </tr> <tr> <td>真密度</td> <td>g/cm<sup>3</sup></td> <td>2.1</td> <td>2.1</td> <td>2.1</td> <td>ピクノメーター</td> </tr> <tr> <td>比表面積</td> <td>m<sup>2</sup>/g</td> <td>28</td> <td>17</td> <td>1</td> <td>Ni 吸着法</td> </tr> <tr> <td>D/G 比</td> <td>—</td> <td>0.1</td> <td>0.1</td> <td>0.1</td> <td>ラマン分光光度法</td> </tr> <tr> <td>酸化温度</td> <td>°C</td> <td>600</td> <td>600</td> <td>600</td> <td>TG-DTA</td> </tr> <tr> <td>純度(炭素純度≒CNT純度)</td> <td>%</td> <td>&gt;99.5</td> <td>&gt;99.9</td> <td>&gt;99.9</td> <td>蛍光 X 線</td> </tr> </tbody> </table> <p>出典：保土ヶ谷化学工業(株)カタログデータ</p> <p>2) カップ積層型カーボンナノチューブ 構造はカップ形状で積層し、中空構造である。分散性の良さと線長調整と表面処理を行いやすい点の特徴である。</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>項目</th> <th>24PS</th> <th>AR10</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>外径 (nm)</td> <td>70～80</td> <td>70～80</td> </tr> </tbody> </table>					項目	単位	代表値			測定法	NT-7	CT-12	CT-15	繊維径	nm	65	110	150	FE-SEM	アスペクト比	—	>100	>100	>1	かさ密度	g/cm <sup>3</sup>	0.007	0.012	0.014	沈降嵩密度法(HCC法)	真密度	g/cm <sup>3</sup>	2.1	2.1	2.1	ピクノメーター	比表面積	m <sup>2</sup> /g	28	17	1	Ni 吸着法	D/G 比	—	0.1	0.1	0.1	ラマン分光光度法	酸化温度	°C	600	600	600	TG-DTA	純度(炭素純度≒CNT純度)	%	>99.5	>99.9	>99.9	蛍光 X 線	項目	24PS	AR10	外径 (nm)	70～80	70～80
項目	単位	代表値			測定法																																																														
		NT-7	CT-12	CT-15																																																															
繊維径	nm	65	110	150	FE-SEM																																																														
アスペクト比	—	>100	>100	>1																																																															
かさ密度	g/cm <sup>3</sup>	0.007	0.012	0.014	沈降嵩密度法(HCC法)																																																														
真密度	g/cm <sup>3</sup>	2.1	2.1	2.1	ピクノメーター																																																														
比表面積	m <sup>2</sup> /g	28	17	1	Ni 吸着法																																																														
D/G 比	—	0.1	0.1	0.1	ラマン分光光度法																																																														
酸化温度	°C	600	600	600	TG-DTA																																																														
純度(炭素純度≒CNT純度)	%	>99.5	>99.9	>99.9	蛍光 X 線																																																														
項目	24PS	AR10																																																																	
外径 (nm)	70～80	70～80																																																																	

		長さ (μm)	5	1
		比表面積 (m <sup>2</sup> /g)	50	70
		かさ密度 (m <sup>2</sup> /g)	0.05	0.23
		粉体低効率 (Ω・cm)	0.033	0.045
	出典：GSI クレオス（株）のカルベール®カタログデータ			
性能／特性	<p>製品の種類により多様な物性のものが得られるが、一般的な MWCNT の特徴は以下のとおりである；</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 機械的特性（軽量・強度・柔軟性）：アルミニウムの約半分の軽さ、鋼鉄の 100 倍の引張り強度、硬さはダイヤモンドの 2 倍。また、破断しにくく復元性、柔軟性に富む。</li> <li>・ 導電性：銅と比べ、約 1,000 倍という高い電流密度耐性を持つ。LSI に使用される微細な配線幅でも、銅などが断線してしまうような高密度の電流を流しても断線せず効率よく電子を伝える。複合材料内に適切に導入することで高い伝導性材料を得ることができる。ただし、電気伝導に寄与するのは外層のみで、内側の層は関与しない。</li> <li>・ 熱伝導性・耐熱性：銅の約 10 倍の熱を伝える。半導体回路の熱を放出し半導体の高温化を抑制するヒートシンクなどで活用が期待されている。また、空気中で 750℃、真空中では 2,300℃程度の耐熱性がある。</li> <li>・ 電磁波吸収性：CNT は電磁波をよく吸収する。CNT 繊維内で電磁波が反射を繰り返し減衰し、CNT が光を吸収して熱に変換すると考えられている。</li> <li>・ 化学的安定性：CNT は耐薬品性が高く、化学的に安定である。ほとんどの薬品に反応せず、溶けにくい。</li> </ul>			
製造会社	<p>【国内】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 昭和電工（株）</li> <li>・ GSI クレオス（株）</li> <li>・ 宇部興産（株）</li> <li>・ 本荘ケミカル（株）</li> <li>・ 三菱マテリアル（株）</li> <li>・ 東レ（株）</li> <li>・ 名城ナノカーボン</li> </ul> <p>【海外】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ Nanocyl（巴工業（株））</li> <li>・ CNano Technology（販売：丸紅情報システムズ（株））</li> <li>・ Hyperion Catalysis International</li> <li>・ Arkema（アルケマ（株））</li> </ul>			

(ii) 市場規模

MWCNT の世界市場規模推移及び予測

	2014 年	2015 年	2016 年 見込	2017 年 予測	2018 年 予測	2019 年 予測	2020 年 予測
販売量(トン)	250	400	450	550	600	670	750
販売金額(百万円)	3,750	5,400	6,000	7,000	7,500	8,000	8,700

※販売金額はメーカー出荷ベース

出典：(株)富士キメラ総研「2017 年 高機能添加剤・ハイブリッドマテリアルの将来展望」

MWCNT の NBCI 会員企業の製造量

	2014 年度	2015 年度	2016 年度
製造量(トン)	70-120	80-130	120-170

出典：経済産業省ナノマテリアル情報提供シート

[http://www.meti.go.jp/policy/chemical\\_management/other/nano\\_program.html](http://www.meti.go.jp/policy/chemical_management/other/nano_program.html)



上記のように、MWCNT の 2015 年度の世界需要は 400 トンと推定され、年々拡大傾向にあると予測されている(富士キメラ総研推定)。国内で経済産業省に報告されたナノマテリアル情報提供シートによれば、ナノテクノロジービジネス推進協議会(NBCI)の会員企業の製造量合計も 2014 年度から年々増加している。

### (iii) 主な用途

- ・ エレクトロニクス分野
- ・ エネルギー分野:リチウムイオン電池電極添加剤、キャパシター、燃料電池
- ・ マテリアル:導電性塗料/樹脂、導電性ペーパー/繊維、強化樹脂/強化金属、放熱部材
- ・ バイオ:細胞培養、バイオセンサー、ドラッグデリバリー
- ・ ナノテクノロジー:走査型プローブ顕微鏡、マニピュレーション

### (iv) 研究開発事例

#### ①新規多層カーボンナノチューブポリアミドナノ複合逆浸透(RO)膜の耐ファウリング性発現メカニズムの解明

開発者:信州大学特別特任教授 遠藤守信、信州大学 COI 拠点研究員 滝沢善洋、信州大学カーボン科学研究所特任教授 手島正吾、信州大学カーボン科学研究所特任教授 川口武  
開発機構:信州大学アクア・イノベーション拠点

概要:信州大学 COI 拠点の研究グループでは、これまでのナノカーボンに関する研究実績を基盤とし、MWCNT-PA ナノ複合 RO 膜を開発し、高い脱塩率に加え高透水性と耐ファウリング性を兼備していることを報告した。今回、MWCNT-PA ナノ複合 RO 膜について、実験的手法と分子動力学法を用いた理論的手法を組み合わせることで、優れた耐ファウリング性発現メカニズムを解明することに成功した。実験的手法として、蛍光成分フルオロセインイソチオシアネート(FITC)を標識としたタンパク質のウシ血清アルブミン(BSA)をモデルファウラントとして用い、ファウリングの試験によって膜表面への付着の様子を蛍光顕微鏡でその場観察した。その結果、膜上へのファウラントの付着は、通常の PA 膜や市販 PA 膜に比べて顕著に少ないことを確認した。さらに、BSA 付着による透水量については、実験室で調製した PA 膜および市販の PA 膜では 34%~50% の低下であり、MWCNT-PA ナノ複合膜では元の値の 15% の低下で極めて劣化レベルは少なくなっている。これにより、開発膜の極めて高い耐ファウリング性を発現することを見出した。

実験的手法と分子動力学法を用いた解析によって、MWCNT が PA 中に存在すると、(1) PA の剛直性が増加することで PA の表面官能基が物理的に拘束されるため、タンパク質の官能基との結合が困難になる、(2)膜の表面構造がより平滑になることでタンパク質が膜の表面に引っかかりにくくなる、(3)PA から MWCNT への電荷移動による効果によって膜表面に一様に薄い界面水が形成、覆うことで、膜表面にタンパク質が付きにくくなるのが理論的にも証明された。さらに、付いたタンパク質膜が離脱して透水性能が自己回復する優れた新機能も見出され、付着した BSA が離れやすいという耐ファウリング性が発現するメカニズムも解明した。今回、MWCNT-PA ナノ複合 RO 膜の耐ファウリング性の実証およびその発現メカニズムを解明したことで、今後、更なる高い耐ファウリング性を有する高ロバスト性(頑強性)の先進 RO 膜の開発を進めることが可能となった。本成果により、我々の開発した革新的な MWCNT-PA ナノ複合 RO 膜を用いることで、ファウリングに対するメンテナンスの所要作業を低減し、低コストで、の運用が可能な海水淡水化システムの実現が期待される。

出典:信州大学アクア・イノベーション拠点ホームページ(2018/09/308 掲載)

[http://www.shinshu-u.ac.jp/coi/news/20170920\\_press%20release\\_shinshu-u\\_COI.pdf](http://www.shinshu-u.ac.jp/coi/news/20170920_press%20release_shinshu-u_COI.pdf)

f

#### ②世界最高の放熱性能を持つ純カーボンナノチューブ放熱シートの開発に成功

開発者:株式会社富士通研究所

開発機構:株式会社富士通研究所

概要:株式会社富士通研究所は、高熱伝導性と耐熱性を両立する垂直配向カーボンナノチューブから構成された、世界最高の放熱性能を持つ高熱伝導カーボンナノチューブシートの開発に成功した。電気自動車の急速な発展に伴い、高電圧下で電力を制御する車載パワーモジュールには低消費電力・高耐圧が求められており、モジュールの小型化に伴う高温動作への信頼性確保も同時に必要とされている。これに対して、低消費電力・高耐圧の特徴をもつシリコンカーバイド(炭化ケイ素、SiC)がシリコン(Si)に置き換わり利用されつつあるが、200°C以上の高温領域でも安定動作させるため、SiC素子の熱を効率良く排熱する必要がある。今回、高い熱伝導性をもつ素材として知られる円筒状構造のカーボンナノチューブの製造プロセスにおいて、熱伝導性が高い円筒の軸と排熱方向を合わせるため、製造条件である温度と圧力の組み合わせを最適に制御することで、カーボンナノチューブを、垂直方向に高密度かつ均一に成長させる、カーボンナノチューブ成長制御技術を開発した。また、SiCを用いたパワーモジュールの排熱に利用するために、配向成長したカーボンナノチューブを2000°C以上の高温で加熱処理することでシート状に成形し、可搬を容易とするカーボンナノチューブシート化技術の開発に成功した。本技術により作製した放熱シートは、既存のインジウムを原料とする放熱材料と比べて約3倍の放熱性能であり、カーボンナノチューブ放熱シートとして世界最高の放熱性能を確認した。今後、本技術を次世代自動車向け放熱材料として2020年以降の製品化を目指すとともに、次世代HPCや次世代通信機器への適用など、新たな分野への展開も検討する。

出典:富士通ホームページ(2018/02/08掲載)

<http://pr.fujitsu.com/jp/news/2017/11/30.html>

### ③高性能カーボンナノチューブ/無機金属酸化物ハイブリッド電池触媒の開発に成功

開発者:九州大学大学院工学研究院/カーボンニュートラル・エネルギー国際研究所 教授中嶋直敏、准教授 藤ヶ谷剛彦、特任助教 Jun Yang

開発機構:九州大学

概要:九州大学大学院工学研究院/カーボンニュートラル・エネルギー国際研究所(I2CNER)の中嶋直敏教授、藤ヶ谷剛彦准教授、Jun Yang 特任助教の研究グループは、白金の代わりにポリマー及び無機金属酸化物を用いて高い活性を持つ燃料電池用触媒を開発することに成功した。多くの無機金属酸化物は、酸素還元反応、酸素発生反応、水素発生反応等のエネルギー変換の基幹反応の触媒として注目されてきた。しかしながら、多くの場合、これらの反応に対する触媒能は必ずしも高くないのが現状であった。原因として、無機金属酸化物の電導性の低さ、及び触媒活性サイト面積の小ささが挙げられる。本研究では、電導性が高い高純度多層カーボンナノチューブ(CNT)を素材として用いて、まずこれをポリマー(ポリベンズイミダゾール(PBI))で被覆し、この上にスピネル型無機金属酸化物( $NixCo_{3-x}O_4$ )のナノ粒子をソルボサーマル法で作製した。この方法により作製した触媒は、非常に効率的な酸素還元反応及び酸素発生反応を示すことが明らかになった。さらに高い耐久性も示すことが判明した。この方法は、九州大学が開発してきたCNT/PBI/Pt触媒作製方法を無機金属材料に応用したものであり、導電性のナノチューブ上にスピネル型無機金属酸化物のナノクリスタルを均質にコートすることを可能にし、これが触媒の高活性に繋がっている。燃料電池の本格普及には、高い活性を持つ(すなわち、現行の白金ベースの触媒に匹敵する)完全非白金型触媒の開発が極めて重要である。本触媒が、完全非白金型触媒であることから、白金を全く使用しない効率的な燃料電池及び酸素発生触媒の開発は、今後のエネルギー材料(触媒)研究へ大きく貢献するものである。

出典:九州大学ホームページ(2017/03/30掲載)

<https://www.kyushu-u.ac.jp/ja/researches/view/109>

(v) 利用事例

新たな利用事例は確認できなかった。

(vi) ナノリスク評価

CNT を輸入している事業者が国内で加工する際には、閉鎖系で加工を行っているほか、局所排気装置等を使用して粉じんの除去を行っている。

また、労働者については、加工装置に CNT を投入する際、あるいは取り出す際に、平成 21 年 3 月公表の経済産業省、厚生労働省、環境省のナノ粒子取扱いガイドラインを参考として、労働者は保護具を着用し、局所排気装置で粉じんを除去し、労働者にばく露しないように管理するとともに、加工記録を管理している。

環境への排出に関しては、CNT の加工は極めて限定された空間で行っており、閉鎖系ない、もしくは局所排気装置を用いており、既存の手法で判断する限りは、環境への排出はほとんどない。

出典：経済産業省 ナノマテリアル情報提供シート

[http://www.meti.go.jp/policy/chemical\\_management/other/nano\\_program.html](http://www.meti.go.jp/policy/chemical_management/other/nano_program.html)

(ウ) グラフェン

(i) 製品概要

サイズ	厚さ：約 0.335nm (1 層分、炭素原子 1 個分に相当) 形状：葉身形状 (1 層) が 1~10 層重なったもの																																
形状	極薄のシート状																																
計測技術	TEM、SEM																																
物性	<ul style="list-style-type: none"> <li>グラフェンは、炭素同素体の 1 つで、炭素原子が六角形のメッシュ状に整列した、原子 1 個分の厚みしかないシートであり、グラフェンが多層に積み重なったものがグラファイトである。各炭素原子の 4 個の価電子は 3 個の <math>sp^2</math> 混成軌道と <math>2p_z</math> 軌道に分布し、<math>2p_z</math> 軌道を占める価電子は自由電子となって、シート内を自由に行き来しているため、バンドギャップのない半導体または半金属とみなされる。電子移動度の大きさからポストシリコンとして着目されるほか、化学的に安定で機械的強度にも優れ、様々な用途開発への応用が期待される。</li> </ul> <table border="1" data-bbox="592 1323 1163 1458"> <tr> <td>製品名</td> <td>xGnP® Graphen Nanoplatelets</td> </tr> <tr> <td>融点</td> <td>3,600°C</td> </tr> <tr> <td>比重</td> <td>0.03~0.1 g/cm<sup>3</sup></td> </tr> </table> <p>出典：XG Sciences HP <a href="http://www.newmetals.co.jp/cat07/cat0701/list.html">http://www.newmetals.co.jp/cat07/cat0701/list.html</a></p> <table border="1" data-bbox="375 1554 1380 1816"> <thead> <tr> <th>型番</th> <th>iGurafen-α</th> <th>iGurafen-αS</th> <th>iGurafen-Σ</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>表面処理</td> <td>無</td> <td>無</td> <td>無</td> </tr> <tr> <td>粒子径</td> <td>100μm</td> <td>10μm</td> <td>100μm</td> </tr> <tr> <td>厚さ</td> <td>約 10nm</td> <td>約 10nm</td> <td>約 10nm</td> </tr> <tr> <td>比表面積 (BET)</td> <td>20~27 m<sup>2</sup>/g</td> <td>27 m<sup>2</sup>/g</td> <td>20 m<sup>2</sup>/g</td> </tr> <tr> <td>吸油量</td> <td>4.5mL/g</td> <td>2.5mL/g</td> <td>8mL/g</td> </tr> </tbody> </table> <p>出典：AS ONE Corporation HP <a href="https://axel.as-1.co.jp/asone/g/NC3-7633-01/">https://axel.as-1.co.jp/asone/g/NC3-7633-01/</a></p>			製品名	xGnP® Graphen Nanoplatelets	融点	3,600°C	比重	0.03~0.1 g/cm <sup>3</sup>	型番	iGurafen-α	iGurafen-αS	iGurafen-Σ	表面処理	無	無	無	粒子径	100μm	10μm	100μm	厚さ	約 10nm	約 10nm	約 10nm	比表面積 (BET)	20~27 m <sup>2</sup> /g	27 m <sup>2</sup> /g	20 m <sup>2</sup> /g	吸油量	4.5mL/g	2.5mL/g	8mL/g
製品名	xGnP® Graphen Nanoplatelets																																
融点	3,600°C																																
比重	0.03~0.1 g/cm <sup>3</sup>																																
型番	iGurafen-α	iGurafen-αS	iGurafen-Σ																														
表面処理	無	無	無																														
粒子径	100μm	10μm	100μm																														
厚さ	約 10nm	約 10nm	約 10nm																														
比表面積 (BET)	20~27 m <sup>2</sup> /g	27 m <sup>2</sup> /g	20 m <sup>2</sup> /g																														
吸油量	4.5mL/g	2.5mL/g	8mL/g																														
性能／特性	<ul style="list-style-type: none"> <li>電子移動度：最も大きい物質の 1 つで、室温で 15,000cm<sup>2</sup>/Vs</li> <li>高い熱的・化学的安定性</li> <li>キャリア運動の相対論性</li> <li>熱伝導性：現在知られる物質の中で最大 (室温)</li> </ul>																																

	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 電気伝導度：現在知られる物質の中で最大（室温）。バンドキャップをもたず金属的な電気伝導を示す。シートを2枚重ねて垂直電場を加えるとバンドキャップが生じる。</li> <li>・ 重量：現在知られる物質の中で最軽量</li> <li>・ 強度：現在知られる物質の中で最も丈夫な物質。同じ厚さの鉄シートの約100倍の強度</li> <li>・ 引張り強度：0.1%グラフェン含有ポリエチレンの引張り強度は、ポリエチレン単体の約5倍。</li> <li>・ 光透過性：単層グラフェンは可視光に対してほぼ透明（透過度98%）。分散の仕方により、光透過性が大きく異なる。0.1%グラフェン含有ポリエチレンでも分散が良いと、光を透過しないが、分散が悪いと光を透過する。</li> <li>・ ガスバリア性：六角形の結晶格子構造の炭素間結合距離が0.1nm程度であるために、水素分子やHe分子であっても透過できない。</li> <li>・ 疎水性である</li> </ul>
製造会社	<p>【国内】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ グラフェンプラットフォーム（株）</li> <li>・ （株）インキュベーション・アライアンス</li> <li>・ 東芝（株）</li> <li>・ （株）ニューメタルスエンドケミカルスコーポレーション（XG Science社、Nanointegris社製など）</li> <li>・ イーエムジャパン（株）</li> </ul> <p>【海外】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ XG-Science（インド）</li> <li>・ Angstrom（米国）</li> <li>・ Vorbeck（フランス）</li> </ul>

(ii) 市場規模

グラフェンの世界市場規模推移及び予測：グラフェンインクベース

	2014年	2015年	2016年 見込	2017年 予測	2018年 予測	2019年 予測	2020年 予測
販売量(トン)	5	50	70	130	223	335	505
販売金額(百万円)	350	750	870	1,365	1,925	3,050	4,250

※販売金額はメーカー出荷ベース

出典：(株)富士キメラ総研「2017年 高機能添加剤・ハイブリッドマテリアルの将来展望」

グラフェンインクは2015年に50トン、7.5億円程度の市場規模とみられる。研究・開発向けのサンプル販売が中心であったが、2015年にグラフェンプラットフォームが大量生産技術を確立し、市場が本格化しつつあり、今後も拡大が見込まれる。

グラフェンは少量添加するだけで、強度、潤滑性、導電性、帯電防止性、放熱性、バリア性、抗菌性、機水性などさまざまな機能の向上、付与が可能な材料である。そのため、幅広い用途への応用が期待されている。現在も研究・開発向けのサンプル販売が中心であるが、そのなかでもスポーツ用品や包装用品など樹脂・エラストマー添加用途や塗料・潤滑油用途への販売が先行しているとみられる。

当該品の注目度は高く、需要は著しく拡大しているものの、ユーザー側の合成技術や攪拌技術が確立していないことが、抑制要因となっている。

グラフェンプラットフォームは、当該品の分散性を高めた表面改質処理済みグラフェンの供給を行っている。また、樹脂への添加まで一貫生産できる工場を建設中であるため、当該品の採用ハードルが低くなり、市場は大きく拡大していくと考えられる。

将来的には、LiB用導電助剤や電極向けの検討が進められ、採用の増加が予測される。特に車載用LiB向けでは当該品の採用により、走行距離の大幅な伸長や、自動運転技術の向上につ

ながるとされており、実用化が期待される。(富士キメラ総研「2017年 高機能添加剤・ハイブリッドマテリアルの将来展望」)。

当該品は現状、日本や欧米のみで量産しているとみられる。市場が本格化するにつれて、参入する企業が増加する可能性があるが、グラフェンプラットフォームが結晶構造や応用用途に関する特許を取得しているため、ハードルが高い。少量添加でさまざまな機能が付与できる注目の材料であり、市場が本格化してきたことから、各国で需要が拡大している。

2017年4月 - 6月期の価格帯は6,000~1万5,000円/kg(※富士キメラ総研推定)であるが各社で量産体制が確立されたことで、価格は大きく下落している。今後も市場拡大に伴い価格低下が見込まれる。将来的には、5,000円/kg前後の価格にまで下がる見通しである。

### (iii) 主な用途

主な用途は以下のとおりである;

- ・ **コンポジット(樹脂・ゴム分野)**: フィルム包材(ラップ、真空パック)、構造部材、ギア、タイヤ、ガasket  
樹脂に0.1~0.5%添加することで、強度を30~40%向上させることができる。樹脂に添加することで、強度や帯電防止機能のほかに、抗菌性や酸素バリア性があることから、フィルムや樹脂成形品に対しての機能性アップアイテムとして注目される。
- ・ **エレクトロニクス(電気電子分野)**: 透明電極(タッチパネル、太陽電池、LED)、電池負極材、RFIDタグ、光電変換素子、超高速トランジスタ、テラヘルツ発振素子、パワー半導体)
- ・ **電池(エネルギー分野)**: リチウムイオン電池負極材、空気酸化電池、燃料電池用Pt触媒代替、キャシター、太陽電池、など

そのほか、以下のような用途でも使用されている;

- ・ **塗料・潤滑油分野**: エンジンオイル、塗料  
グラフェンを添加するだけで潤滑性が得られるという特性を有する。
- ・ **放熱素材**: 放熱シート、放熱グリース、ヒーター、放熱板
- ・ **バイオ・生体**: 人工網膜、バイオセンサー、生体膜
- ・ **その他**: 海水淡水化膜  
海水淡水化膜として、脱塩処理が可能であるとの研究事例がある。グラフェンの膜における孔のサイズをコントロールすることで、透過/非透過物質の選択を行うことが可能である。

### (iv) 研究開発事例

#### ①グラフェンとSiC(シリコンカーバイド)の界面に潜む低エネルギーのフォノンの発見

開発者: 東北大学多元物質科学研究所 教授 米田忠弘、東京大学大学院工学系研究科 講師 南谷英美、物質材料研究機構 主任研究員 荒船竜一、Donostia International Physics Center 教授 Thomas Frederiksen、東北大学電気通信研究所 准教授 吹留博一

開発機構: 東北大学、東京大学、物質材料研究機構、Donostia International Physics Center

概要: 東北大学多元物質科学研究所 米田忠弘教授、東京大学大学院工学系研究科 南谷英美講師、物質材料研究機構 荒船竜一主任研究員、Donostia International Physics Center Thomas Frederiksen 教授、東北大学電気通信研究所 吹留博一准教授らの研究グループは、シリコンカーバイド(SiC)上のエピタキシャルグラフェンにおいて、走査トンネル顕微鏡(STM)による電流測定に現れるフォノンのシグナルの空間依存性を高精度に測定し、SiC基板とグラフェンの界面に潜む低エネルギーフォノンの存在を明らかにした。SiCの熱分解によるエピタキシャルグラフェン形成は高品質なグラフェンを絶縁体基板上に作成する方法として着目されているが、グラフェン中での電子移動度が理論値よりも大幅に低下するという問題があった。電子移動度が下がる重要な原因の一つが、基板とグラフェンの界面に存在する

フォノンである。しかし、界面のフォノンを観測することは非常に難しく、その詳細は明らかになっていなかった。今回の研究では、トンネル電子がフォノンと衝突することによってエネルギーを失う非弾性過程の空間依存性を測定する STM 実験と、界面構造と電子・フォノン状態の相関を第一原理計算によって明らかにすることによって、ダングリングボンドを持ったシリコン (Si) 原子によって特徴的な界面フォノンが生じていることを解明した。本研究成果は、界面制御によるグラフェンデバイス性能向上につながることを期待される。

出典: 東北大学多元物質科学研究所 (2017/10/19 掲載)

<https://www.tohoku.ac.jp/japanese/2017/10/press20171019-01.html>

## ②単一原子層薄膜によって赤外光を 1 桁波長の短い可視光に変換することに成功 — グラフェンの新しい光機能の発見 —

開発者: 京都大学理学研究科教授田中耕一郎、理学研究科博士課程学生 吉川尚孝、研究員 玉谷知裕

開発機構: 京都大学

概要: 田中耕一郎 理学研究科教授 (高等研究院物質—細胞統合システム拠点連携主任研究者)、吉川尚孝 理学研究科博士課程学生、玉谷知裕 同研究員 (現・産業技術総合研究所研究員)らの研究グループは、グラフェン (炭素原子が蜂の巣状に結合した、1 原子の厚さのシート) に赤外パルス光を照射すると、波長が 5 分の 1、7 分の 1、9 分の 1 の可視パルス光が生成されることを発見した。これは「高次高調波発生」と呼ばれる現象であり、炭素の単一原子層 (厚さ 0.335 ナノメートル) 超薄膜であるグラフェンで実現したのは世界で初めての発見である。

光の波長を変換する技術は重要な技術であり、すでに社会のいろいろなところで使われている。例えば、緑色のレーザーポインターは 532nm (ナノメートル) の波長の光であるが、これはレーザーポインターの中でまず波長 1064nm のレーザー光を発生し、非線形光学結晶という透明な固体を用いて半分の波長 (周波数は 2 倍) である 532nm のレーザー光を生成している。これは 2 倍高調波発生と呼ばれる現象である。同様な現象はエレクトロニクスの世界で扱う電波の領域の光でも知られており、周波数を 2 倍、3 倍にする周波数逓倍器やオームの法則から逸脱する非線形なデバイスとして利用されている。1980 年代後半にパルス幅が 100 フェムト秒 (100 超分の 1 秒) の高強度のパルスレーザーを希ガス原子気体に照射すると、波長が数 10 分の 1 (周波数が数十倍) の高次の高調波が発生することが発見された。これは「高次高調波発生」と呼ばれ、強いレーザー光照射下で媒質の非線形性に由来する現象である。高次高調波発生については多くの研究が積み重ねられてきたが、固体のように、気体と異なり高い密度の物質では最近まで成功していなかった。これは、レーザー加工に代表されるように高強度のレーザーを物質に照射すると固体が破壊されてしまうことに起因している。しかし、数年前に照射するレーザーの波長を赤外の領域に持っていくことで、破壊現象を起こさずに高次高調波を発生可能であることが報告されて以来、研究が盛んになってきた。固体結晶に関する論文が矢継早に出され、様々な理論モデルも提案されていますが、未だに統一見解が取れていないのが現状である。一つには、これまでの研究は厚い固体の結晶が用いられてきたので、光の伝播方向の積み重ね効果が状況を複雑にしてきたことが挙げられる。そこで本研究グループは、厚さ方向の複雑性を取り除くとともに、なるべくシンプルな構造を持つ固体で実験を行うという狙いのもと、炭素の単一原子層超薄膜であるグラフェンで実験を行った。その結果、世界で初めてグラフェンにおける高次高調波発生を実現したとともに、赤外光の偏光状態を楕円偏光にすると可視光の生成効率が最大となり、その際生成された可視光の偏光状態は元の赤外光とほぼ垂直になることが明らかとなった。本研究グループは、このような特異な偏光特性は、グラフェンの電子状態がバンドギャップ (結晶中の電子が存在し得ない禁制帯のエネルギー幅) を持たない「ディラック電子状態」に起因することを理論的に示した。本発見は、これまで統一見解が得られていない固体を用いた高次高調波発生の物理的メカニズムに、大きな進展を与えるものと期待される。

出典:京都大学ホームページ(2017/5/22 掲載)

[http://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research/research\\_results/2017/170519\\_4.html](http://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research/research_results/2017/170519_4.html)

③グラフェンの厚さの違いと電子の動きの関係を世界で初めて観察

開発者:高エネルギー加速器研究機構(KEK) 物質構造科学研究所 特任助教 福本恵紀、東京工業大学 理学院 化学系 教授 腰原伸也、フランス国立科学研究センター(CNRS)、ピエール アンド マリー キュリー大学 准教授 Mohamed Boutchich

開発機構:高エネルギー加速器研究機構、東京工業大学、フランス国立科学研究センター、ピエール アンド マリー キュリー大学

概要:高エネルギー加速器研究機構(KEK) 物質構造科学研究所の福本恵紀特任助教は、東京工業大学 理学院 化学系の腰原伸也教授、フランス国立科学研究センター(CNRS)、ピエール アンド マリー キュリー大学の Mohamed Boutchich 准教授らと共同で、グラフェン内の超高速な電子の動きが場所ごとに異なることを世界で初めて観測した。理想的なグラフェンは炭素原子 1 層の厚さをもつ二次元物質であり、高速デバイスなどへの応用が期待されている。しかし実際に作成されるグラフェンの構造はナノスケールで不均一なため、その構造の違いが電子の運動に影響を与えると予測されている。グラフェンの実用化のためには、デバイスの動作を阻害する構造、また高性能化に利用できる構造を明確にする必要がある。本研究では、一般的に使われている方法で作成されたグラフェンの結晶構造の違いに由来した電子輸送特性の観察に成功した。具体的には、ラマン顕微鏡を用いて局所的な結晶構造から電子状態を計算し、同じ試料の同じ場所を独自に開発したフェムト秒時間分解光電子顕微鏡法(TR-PEEM)で観察することで、構造と電子輸送特性を直接関連付ける結果を得た。本研究では、グラフェンの不均一な構造の特性を特定し、電子デバイスの性能を決定する電子輸送特性を直接評価することに成功した。構造と電子輸送特性の直接対比が可能であることを証明した本研究成果は、今後のグラフェン素子作成の重要なツールとなりうる。

出典:東京工業大学ホームページ(2017/9/27 掲載)

<https://www.titech.ac.jp/news/2017/039321.html>

(v) 利用事例

株式会社デザート(本社:大阪府大阪市、代表取締役社長:石本 雅敏)の子会社であるINOVEIGHT LTD.(本社:英国カンブリア州、CEO:Ian Bailey(イアン ベイリー))(以下「イノヴェイト社」)は、マンチェスター大学との共同開発により、グラフェンを使用した画期的な商品を『イノヴェイト』ブランドで“G-Series(ジーシリーズ)”シューズとして2018年から発売する。

イノヴェイト社は、2003年に英国に設立され、トレイル・丘陵・山などあらゆる地表を走るランナー、およびジムでワークアウトをするフィットネスアスリート向けの、革新的でグリップ力の高いシューズブランド『イノヴェイト』を展開している。現在同社は、鉄の200倍の強度を持つ最強の素材グラフェンをスポーツシューズのアウトソールに使用する開発を、同大学のアラビンド ビジャヤラガバン博士と共同で行い、世界で初めて同素材を使用したランニングシューズ、フィットネスシューズの商品化に成功した。2018年に発売予定の新シューズのアウトソールは、従来品と比較してより強く、より伸縮性に富み、より耐久性が高いという実験結果が出ている。

主な特徴は以下の通りである。

- ① 2004年にグラファイトから分離することに成功した世界初の二次元素材
- ② 地球上で最薄(原子一枚分の薄さ)でありながら、最も強度が高い素材(鉄の200倍の強度)
- ③ 非常にしなやかで、損傷することなく折り曲げたり、ひねったり、折りたたんだり、伸ばしたりすることが可能(デザート社ホームページ)

[http://www.descente.co.jp/jp/press\\_releases/post-44072.html](http://www.descente.co.jp/jp/press_releases/post-44072.html)

(vi) ナノリスク評価

国内でグラフェンを生産している小規模事業者は、黒鉛等の粉体状の炭素を長期的に扱ってきた経験を有する大手事業者と共同で製造しており、それらの黒鉛等の製造事業者の工場において、製造時のリスク管理を行っている。(平成 27 年度本調査事業報告書より)

(エ) 酸化チタン

(i) 製品概要

サイズ	超微粒子：(粒径) 10~50 nm、光触媒用：(粒径) ~200nm																																																																										
形状	粒子状、紡錘状																																																																										
計測技術	粉末 X 線回折法、SEM、TEM																																																																										
物性	<p>・酸化チタンにはルチル型とアナターゼ型、ブルカイト型の 3 種の結晶形態があるが、工業的に利用されているのはルチル型とアナターゼ型のみである。ルチル型はアナターゼ型に比べて原子配列が緻密で物理的性質もより安定している。ルチル型、アナターゼ型ともに、熱濃硫酸、フッ酸、熔融アルカリ塩には溶解するが、それ以外の酸、アルカリ、有機溶媒、水には溶解せず、化学的にも安定な物質である。</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>結晶形 結晶系</th> <th>ルチル 正方晶系</th> <th>アナターゼ 正方晶系</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>密度 (g/cm<sup>3</sup>)</td> <td>4.27</td> <td>3.90</td> </tr> <tr> <td>屈折率 (<i>n<sub>D</sub></i>)</td> <td>2.72</td> <td>2.52</td> </tr> <tr> <td>モース (度)</td> <td>7.0~7.5</td> <td>5.5~6.0</td> </tr> <tr> <td>比熱 (cal/°C·g at 25°C)</td> <td>0.169</td> <td>0.169</td> </tr> <tr> <td>熱伝導率 (cal/cm/sec/°C)</td> <td>0.148</td> <td>0.430</td> </tr> <tr> <td>電気伝導度 (mho/cm)</td> <td>10<sup>-13</sup>~10<sup>-14</sup></td> <td>10<sup>-13</sup>~10<sup>-14</sup> 5.5×10<sup>-8</sup> (500°C)</td> </tr> <tr> <td>誘電率</td> <td>114</td> <td>48</td> </tr> <tr> <td>融点 (°C)</td> <td>1,825</td> <td>ルチル形に転位</td> </tr> </tbody> </table> <p>出典：酸化チタン(ナノ酸化チタンを含む)の安全性等について(日本酸化チタン工業会 <a href="http://www.sankatitan.org/sankatitan/2016.12ansen.pdf">http://www.sankatitan.org/sankatitan/2016.12ansen.pdf</a>)</p> <p>テイカ微粒子酸化チタン</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>銘柄</th> <th>平均一次粒子径 (nm)</th> <th>表面処理剤</th> <th>撥水性</th> <th>特徴</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>MT-01</td> <td>10</td> <td>Al、ステアリン酸</td> <td>有</td> <td>高透明性、分散性に優れる</td> </tr> <tr> <td>MT-10EX</td> <td>10</td> <td>Al、イソステアリン酸</td> <td>有</td> <td>高透明性、分散性に加え、油相分散時の粘度が低い</td> </tr> <tr> <td>MT-05</td> <td>10</td> <td>Si、Al</td> <td>有</td> <td>高透明性、活性が低い</td> </tr> <tr> <td>MT-100TV</td> <td>15</td> <td>Al、ステアリン酸</td> <td>有</td> <td>化粧品用 UV 散乱剤の定番、世界で最も普及している銘柄</td> </tr> <tr> <td>MT-100Z</td> <td>15</td> <td>Al、ステアリン酸</td> <td>有</td> <td>高透明性、分散性に優れ、活性が低い</td> </tr> <tr> <td>MT-150EX</td> <td>15</td> <td>Al、イソステアリン酸</td> <td>有</td> <td>透明性、分散性に優れ、活性が低く、油相分散時の粘度が低い</td> </tr> <tr> <td>MT-150W</td> <td>15</td> <td>メタリン酸ソーダ</td> <td>-</td> <td>水への親和性、分散性に優れる</td> </tr> <tr> <td>MT-100AQ</td> <td>15</td> <td>Si、Al、アルギン酸ナトリウム</td> <td>-</td> <td>水への親和性、分散性に優れ、安定性も非常によい</td> </tr> </tbody> </table>			結晶形 結晶系	ルチル 正方晶系	アナターゼ 正方晶系	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	4.27	3.90	屈折率 ( <i>n<sub>D</sub></i> )	2.72	2.52	モース (度)	7.0~7.5	5.5~6.0	比熱 (cal/°C·g at 25°C)	0.169	0.169	熱伝導率 (cal/cm/sec/°C)	0.148	0.430	電気伝導度 (mho/cm)	10 <sup>-13</sup> ~10 <sup>-14</sup>	10 <sup>-13</sup> ~10 <sup>-14</sup> 5.5×10 <sup>-8</sup> (500°C)	誘電率	114	48	融点 (°C)	1,825	ルチル形に転位	銘柄	平均一次粒子径 (nm)	表面処理剤	撥水性	特徴	MT-01	10	Al、ステアリン酸	有	高透明性、分散性に優れる	MT-10EX	10	Al、イソステアリン酸	有	高透明性、分散性に加え、油相分散時の粘度が低い	MT-05	10	Si、Al	有	高透明性、活性が低い	MT-100TV	15	Al、ステアリン酸	有	化粧品用 UV 散乱剤の定番、世界で最も普及している銘柄	MT-100Z	15	Al、ステアリン酸	有	高透明性、分散性に優れ、活性が低い	MT-150EX	15	Al、イソステアリン酸	有	透明性、分散性に優れ、活性が低く、油相分散時の粘度が低い	MT-150W	15	メタリン酸ソーダ	-	水への親和性、分散性に優れる	MT-100AQ	15	Si、Al、アルギン酸ナトリウム	-	水への親和性、分散性に優れ、安定性も非常によい
結晶形 結晶系	ルチル 正方晶系	アナターゼ 正方晶系																																																																									
密度 (g/cm <sup>3</sup> )	4.27	3.90																																																																									
屈折率 ( <i>n<sub>D</sub></i> )	2.72	2.52																																																																									
モース (度)	7.0~7.5	5.5~6.0																																																																									
比熱 (cal/°C·g at 25°C)	0.169	0.169																																																																									
熱伝導率 (cal/cm/sec/°C)	0.148	0.430																																																																									
電気伝導度 (mho/cm)	10 <sup>-13</sup> ~10 <sup>-14</sup>	10 <sup>-13</sup> ~10 <sup>-14</sup> 5.5×10 <sup>-8</sup> (500°C)																																																																									
誘電率	114	48																																																																									
融点 (°C)	1,825	ルチル形に転位																																																																									
銘柄	平均一次粒子径 (nm)	表面処理剤	撥水性	特徴																																																																							
MT-01	10	Al、ステアリン酸	有	高透明性、分散性に優れる																																																																							
MT-10EX	10	Al、イソステアリン酸	有	高透明性、分散性に加え、油相分散時の粘度が低い																																																																							
MT-05	10	Si、Al	有	高透明性、活性が低い																																																																							
MT-100TV	15	Al、ステアリン酸	有	化粧品用 UV 散乱剤の定番、世界で最も普及している銘柄																																																																							
MT-100Z	15	Al、ステアリン酸	有	高透明性、分散性に優れ、活性が低い																																																																							
MT-150EX	15	Al、イソステアリン酸	有	透明性、分散性に優れ、活性が低く、油相分散時の粘度が低い																																																																							
MT-150W	15	メタリン酸ソーダ	-	水への親和性、分散性に優れる																																																																							
MT-100AQ	15	Si、Al、アルギン酸ナトリウム	-	水への親和性、分散性に優れ、安定性も非常によい																																																																							



	MT-100WP	15	Si	-	水への親和性、分散性に優れ、水活性増粘剤との相性がよい
	MT-100SA	15	Si、Al	-	透明性、屋外耐候性に優れる
	MT-500B	35	-	-	未処理の微粒子酸化チタン
厚生労働省平成 29 年度 第 1 回 化学物質による労働者の健康障害防止措置に係る検討会 資料 1 <a href="http://www.mhlw.go.jp/file/05-Shingikai-11201000-Roudoukijunkyoku-Soumuka/sochi29_1_siryou1.pdf">http://www.mhlw.go.jp/file/05-Shingikai-11201000-Roudoukijunkyoku-Soumuka/sochi29_1_siryou1.pdf</a>					
性能／特性	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 紫外線遮蔽能</li> <li>・ 吸着能</li> <li>・ 光触媒活性</li> <li>・ 触媒活性</li> <li>・ 透明性</li> </ul>				
製造会社	<b>【国内】</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ テイカ（株）</li> <li>・ 石原産業（株）</li> <li>・ 堺化学工業（株）</li> <li>・ 昭和電工（株）</li> </ul> <b>【海外】</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ Sachtleben Chemie（ドイツ）</li> </ul>				

## (ii) 市場規模

超微粒子酸化チタンの市場規模推移および予測

	2014 年	2015 年	2016 年 見込	2017 年 予測	2018 年 予測	2019 年 予測	2020 年 予測
販売量(トン)	2,850	2,930	3,010	3,100	3,190	3,280	3,370
販売金額(百万円)	11,360	11,730	12,190	12,400	12,700	13,000	13,310

※販売金額はメーカー出荷ベース

出典：(株)富士キメラ総研「2016 年 微粉体市場の現状と将来展望」

酸化チタン(二酸化チタン)の日本酸化チタン工業会会員企業の生産量(触媒用途を含む)

	2014 年度	2015 年度	2016 年度
製造量(トン)	5,780	5,372	5,900

出典：経済産業省ナノマテリアル情報提供シート

[http://www.meti.go.jp/policy/chemical\\_management/other/nano\\_program.html](http://www.meti.go.jp/policy/chemical_management/other/nano_program.html)

上記のように、ナノサイズの酸化チタンの世界需要は、年々拡大しており、2017 年には超微粒子で 3,100 トンと予測されている(富士キメラ総研推定)。一方、国内の生産量は、経済産業省マテリアル情報提供シートによれば、日本酸化チタン工業会会員企業の合計で、2014 年度は 5,780 トン、2015 年度は 5,372 トン、2016 年度は 5,900 トンとほぼ横ばいである。

## (iii) 主な用途

ルチル型は化粧品や塗料などの主用途に利用されるのに対して、アナターゼ型は、発電プラント脱臭等の排煙脱硝触媒用途のほか、光触媒として利用される。

- ・ 電気・電子材料：誘導体材料、抵抗体材料、電解質材料、電解液材料、セパレータ
- ・ 化学プロセス調節剤：触媒、触媒担体
- ・ 印刷インキ、複写用薬剤(トナー等)：電荷制御剤、流動性付与剤、研磨性付与剤、滑り性付与剤

- ・ 医薬品、医薬部外品、化粧品及び医療機器：外用品医薬部外品の有効成分、製剤用基剤及び添加剤、化粧品用の基剤及び添加剤
- ・ 塗料、コーティング剤：着色剤（染料、顔料、色素、色材、光輝剤）、その他
- ・ 着色剤（染料、顔料、色素、色材）：着色剤（染料、顔料、色素、色材）  
（出典：経済産業省 ナノマテリアル情報提供シート）

また、光触媒用の酸化チタンについては、外装材、内装材、清浄機器、等が主な用途である；

- ・ 外装材：外装建材（タイル、サイディングなど）、塗料・コーティング、テント・幕材、他
- ・ 内装材：内装用タイル、ブラインド、壁、カーテン、照明器具、他
- ・ 清浄機器：空気清浄器、エアコン用フィルター、水処理機用フィルター、他
- ・ その他：道路資材（舗装・ブロック、ガードレール、防音壁、反射鏡など）、生活用品（家電など）、他

#### (iv) 研究開発事例

##### ①酸化チタンの新機能を発見 —薄膜形状で超伝導を実現—

開発者：東京工業大学 物質理工学院 助教 吉松公平、東京工業大学 物質理工学院 教授 大友明、物質・材料研究機構

開発機構：東京工業大学、物質・材料研究機構

概要：東京工業大学 物質理工学院の吉松公平助教と大友明教授は、物質・材料研究機構と共同で、光触媒材料として知られる二酸化チタンの類縁化合物である七酸化四チタン ( $\text{Ti}_4\text{O}_7$ ) とガンマ型の五酸化三チタン ( $\gamma\text{-Ti}_3\text{O}_5$ ) で超伝導が発現することを発見した。また、研究グループは、パルスレーザ堆積法と呼ばれる手法を用いて、高温・強還元的环境下で酸化チタンの薄膜合成を行った。大型放射光施設 SPring-8 での高輝度放射光 X 線回折実験で、合成した薄膜の組成・結晶構造を  $\text{Ti}_4\text{O}_7$  と  $\gamma\text{-Ti}_3\text{O}_5$  と決定した。また、電気抵抗率の温度依存性から極低温で電気抵抗がゼロになる超伝導現象が発現することを見出した。これらの超伝導は、過去に理論的に予測されていたながら、実験的には実証されていないバイポーロン超伝導である可能性が考えられる。今回発見した超伝導体の最高転移温度は、液体ヘリウム温度を超える 7 ケルビンであり、安価で安定な酸化物超伝導体として応用が期待される。

出典：東京工業大学ホームページ(2017/10/3 掲載)

<https://www.titech.ac.jp/news/2017/039414.html>

##### ②光触媒ナノ粒子における光照射後 10 兆分の 1 秒での電子の動きを X 線自由電子レーザーで観測

開発者：東京農工大学大学院工学研究院 教授 三沢和彦、京都大学大学院理学研究科 教授鈴木俊法、理化学研究所放射光科学総合研究センターグループ ディレクター 矢橋牧名、高輝度光科学研究センター 研究員 片山哲夫

開発機構：東京農工大学、京都大学、理化学研究所、高輝度光科学研究センター

概要：東京農工大学大学院工学研究院の三沢和彦教授、京都大学大学院理学研究科の鈴木俊法教授、理化学研究所放射光科学総合研究センターの矢橋牧名グループディレクター、高輝度光科学研究センターの片山哲夫研究員らの共同研究グループは、光触媒としてガラスやテントの汚れ防止、殺菌などに用いられるアナタース型酸化チタンナノ粒子に光を照射した直後の超高速な電子状態の変化を、X 線自由電子レーザー施設 SACLA を用いて観測することに成功した。10 兆分の 1 秒 (100 フェムト秒) 程度で起こる変化を観測したことで、電子が酸化チタン結晶のどこから、どのようなプロセスで生じるかという、これまで未知だった光触媒反応の初期過程を明らかにした。これは反応効率を議論するうえで非常に重要な成果である。近年では、異金属を付着させたり不純物を添加したりして可視光応答性を持たせた酸化チタンの研究も広く行われており、そのような新規材料を本研究と同様の手法で測定し比較することで、反応効率に関わるメカニズムの理解がより一層進むと期待される。

出典:京都大学ホームページ(2017/6/3 掲載)

[http://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research/research\\_results/2017/documents/170630\\_1/01.pdf](http://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research/research_results/2017/documents/170630_1/01.pdf)

③水素生成量が 1 桁増加する光触媒の開発に成功

開発者:神戸大学分子フォトサイエンス研究センター 准教授 立川貴士、大阪大学産業科学研究所 教授 真嶋哲朗

開発機構:神戸大学、大阪大学

概要:神戸大学分子フォトサイエンス研究センターの立川貴士准教授らと、大阪大学産業科学研究所の真嶋哲朗教授らの研究グループは、光触媒作用による水素生成量が 1 桁増加する光触媒の開発に成功した。水素は、再生可能エネルギーである太陽光と水から製造できる、次世代のエネルギー源として注目されており、水素を高効率に製造できる光触媒の開発が望まれている。しかしながら、従来の光触媒では、電子と同時に生成する正孔(電子が抜けた孔)のほとんどが触媒表面上で再結合して消失してしまうため、水から水素への光エネルギー変換効率が伸び悩んでいた。今回、立川准教授らは、電子と正孔を空間的に分離できる、光触媒の大きさ・配列の均一性をあえて崩したメソ結晶光触媒の合成方法を開発した。その結果、従来をはるかに超える水素生成の光エネルギー変換効率(約7%)を有する光触媒の開発に成功した。今後は、有用性が実証されたメソ結晶化技術を応用することで、太陽光による高効率な水素製造の実現を目指す。

出典:神戸大学ホームページ(2017/4/10 掲載)

[http://www.kobe-u.ac.jp/research\\_at\\_kobe/NEWS/news/2017\\_04\\_10\\_01.html](http://www.kobe-u.ac.jp/research_at_kobe/NEWS/news/2017_04_10_01.html)

(v) 利用事例

ルチル型は主に化粧品に利用されている。このうち、日焼け止め化粧品へのナノサイズの酸化チタンの配合量は、3~5%(新化粧品学)、多いもので 15~20 重量%の製品がある。また、ファンデーションへの配合量は 5~20%が報告されている(化粧品科学, 1990)。

印刷インキ用途では、白インキ皮膜層に用いられる白色無機顔料としての酸化チタンは、インキ組成物に対して、5~50 質量%が適量であるとされ、使用されている。

そのほか、光触媒作用を利用した抗菌・消臭効果を付与するために繊維製品に浸透させて機能性を持たせる製品や、インテリア材表面に塗布することで、シックハウス症候群の原因となる有害物質の分解・無害化や抗菌・消臭効果を付与するための塗料が製品化されている。

(vi) ナノリスク評価

製造事業者は、ばく露等に関して、厚労省局長通知(基発 331013 号)に沿った管理を行っており、局所排気や捕集効率 99.9%の防塵マスクやエアラインマスク及び専用の防塵衣を使用している。袋詰め作業では、プッシュプル型局所排気装置によりばく露低減をはかり、作業場と外部との区画化により外部への排出を防いでいる。製造設備においても密閉化度の向上を進めている。別の事業者においても、労働安全衛生法(粉じん則)及び厚生労働省労働基準局長通知に基づいて、保護具基準の見直しや、密閉化と局所排気の強化による設備対策を検討・実施している。

労働者については、粉じん特別教育を実施しているほか、ナノマテリアルの特性及びばく露防止対策についての教育を行っている。別の事業者では、一般的な労働安全衛生法(粉じん則、特化則)の機会を利用した教育のほか、ナノマテリアルに該当する製品の MSDS を中心とした特性教育を実施している。さらに別の事業者では、年に 1 度程度、全従業員を対象に粉じん作業の安全教育を実施しているほか、厚生労働省等からの通達、その他ナノ粒子に関する安全性に関する情報を、掲示板等を通じて従業員に周知しているところもある。

(経済産業省 ナノマテリアル情報提供シート)

[http://www.meti.go.jp/policy/chemical\\_management/other/nano\\_program.html](http://www.meti.go.jp/policy/chemical_management/other/nano_program.html)

(オ) ナノ銀

(i) 製品概要

サイズ	<p>銀ナノ粒子；</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 抗菌用の銀粒子は、数 nm～200μm のものまで幅広く利用されている。</li> <li>・ 導電性インクとしては数 nm～数 10nm のものが使用されるが、10nm 以下のより小さいものが求められている。</li> </ul> <p>銀ナノワイヤー；</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 直径数 10μm、長さ数 10μm のものが導電フィルム等に使用されている。</li> </ul>																																																							
形状	粉体、ペースト、分散液																																																							
計測技術	SEM、TEM、AFM（原子間力顕微鏡）																																																							
物性	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 銀ナノ粒子は独特の光学的、電気的、熱的特性を有する。銀ナノ粒子は、他の多くの色素や段量と異なり、光の吸収や散乱が極めて効率的であり、粒子の大きさや形状に応じて色を持つ。銀ナノ粒子は、特定の波長の光で励起された際に金属表面の伝導電子が集団的な振動を起こす、表面プラズモン共鳴を生じ、この振動は、通常にはない散乱や吸収特性の原因となる。そのため、銀ナノ粒子は、物理的断面積の 10 倍までの有効消光断面積を示す。</li> <li>・ 銀ナノワイヤーは、透明性、導電性、柔軟性、伸縮性が非常に高く、ITO フィルム代替として低いコストが期待されている。</li> </ul> <p>(銀ナノ乾粉)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>品番</th> <th>銀ナノ粒子乾粉-1</th> <th>銀ナノ粒子乾粉-2</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>粒径</td> <td>20 nm</td> <td>60 nm</td> </tr> <tr> <td>比表面積</td> <td>15～20 m<sup>2</sup>/g</td> <td>5～8 m<sup>2</sup>/g</td> </tr> <tr> <td>TAP 密度</td> <td>2～4 g/cm<sup>3</sup></td> <td>2～4 g/cm<sup>3</sup></td> </tr> <tr> <td>Ag 含量</td> <td>≥95wt%</td> <td>≥98wt%</td> </tr> </tbody> </table> <p>出典：DOWA エレクトロニクス（株）HP</p> <p>(銀ナノ粒子分散水溶液)：濃度 0.02mg/l</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>品番</th> <th>730785</th> <th>730793</th> <th>730807</th> <th>730815</th> <th>730777</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>粒径 (nm)</td> <td>10</td> <td>20</td> <td>40</td> <td>60</td> <td>100</td> </tr> <tr> <td>密度 (g/ml[25℃])</td> <td>0.997</td> <td>0.986</td> <td>0.990</td> <td>0.9976</td> <td>0.9978</td> </tr> <tr> <td>粒子数</td> <td>3.6×10<sup>12</sup></td> <td>4.5×10<sup>11</sup></td> <td>5.7×10<sup>10</sup></td> <td>1.7×10<sup>10</sup></td> <td>3.6×10<sup>9</sup></td> </tr> <tr> <td>蛍光スペクトル</td> <td>λ<sub>em</sub> = 388nm FWHM59 nm</td> <td>λ<sub>em</sub> = 401nm FWHM6 6nm</td> <td>λ<sub>em</sub> = 412nm FWHM6 3nm</td> <td>λ<sub>em</sub> = 431nm FWHM8 1nm</td> <td>λ<sub>em</sub> = 504nm FWHM1 67nm</td> </tr> </tbody> </table> <p>出典：シグマ・アルドリッチ（同）カタログ</p> <p>(銀ナノワイヤー)</p> <table border="1"> <tbody> <tr> <td>サイズ</td> <td>φ30nm×20μm、φ50nm×40μm、φ75nm×45μm、φ100nm×10μm</td> </tr> <tr> <td>溶媒種類</td> <td>エタノール、イソプロピルアルコール、エチレングリコール、水</td> </tr> <tr> <td>標準濃度</td> <td>0.625wt%（エタノール）</td> </tr> <tr> <td>標準密度</td> <td>5mg/ml（エタノール）</td> </tr> <tr> <td>外</td> <td>灰色懸濁液</td> </tr> </tbody> </table> <p>出典：イーエムジャパン（株）HP</p>	品番	銀ナノ粒子乾粉-1	銀ナノ粒子乾粉-2	粒径	20 nm	60 nm	比表面積	15～20 m <sup>2</sup> /g	5～8 m <sup>2</sup> /g	TAP 密度	2～4 g/cm <sup>3</sup>	2～4 g/cm <sup>3</sup>	Ag 含量	≥95wt%	≥98wt%	品番	730785	730793	730807	730815	730777	粒径 (nm)	10	20	40	60	100	密度 (g/ml[25℃])	0.997	0.986	0.990	0.9976	0.9978	粒子数	3.6×10 <sup>12</sup>	4.5×10 <sup>11</sup>	5.7×10 <sup>10</sup>	1.7×10 <sup>10</sup>	3.6×10 <sup>9</sup>	蛍光スペクトル	λ <sub>em</sub> = 388nm FWHM59 nm	λ <sub>em</sub> = 401nm FWHM6 6nm	λ <sub>em</sub> = 412nm FWHM6 3nm	λ <sub>em</sub> = 431nm FWHM8 1nm	λ <sub>em</sub> = 504nm FWHM1 67nm	サイズ	φ30nm×20μm、φ50nm×40μm、φ75nm×45μm、φ100nm×10μm	溶媒種類	エタノール、イソプロピルアルコール、エチレングリコール、水	標準濃度	0.625wt%（エタノール）	標準密度	5mg/ml（エタノール）	外	灰色懸濁液
品番	銀ナノ粒子乾粉-1	銀ナノ粒子乾粉-2																																																						
粒径	20 nm	60 nm																																																						
比表面積	15～20 m <sup>2</sup> /g	5～8 m <sup>2</sup> /g																																																						
TAP 密度	2～4 g/cm <sup>3</sup>	2～4 g/cm <sup>3</sup>																																																						
Ag 含量	≥95wt%	≥98wt%																																																						
品番	730785	730793	730807	730815	730777																																																			
粒径 (nm)	10	20	40	60	100																																																			
密度 (g/ml[25℃])	0.997	0.986	0.990	0.9976	0.9978																																																			
粒子数	3.6×10 <sup>12</sup>	4.5×10 <sup>11</sup>	5.7×10 <sup>10</sup>	1.7×10 <sup>10</sup>	3.6×10 <sup>9</sup>																																																			
蛍光スペクトル	λ <sub>em</sub> = 388nm FWHM59 nm	λ <sub>em</sub> = 401nm FWHM6 6nm	λ <sub>em</sub> = 412nm FWHM6 3nm	λ <sub>em</sub> = 431nm FWHM8 1nm	λ <sub>em</sub> = 504nm FWHM1 67nm																																																			
サイズ	φ30nm×20μm、φ50nm×40μm、φ75nm×45μm、φ100nm×10μm																																																							
溶媒種類	エタノール、イソプロピルアルコール、エチレングリコール、水																																																							
標準濃度	0.625wt%（エタノール）																																																							
標準密度	5mg/ml（エタノール）																																																							
外	灰色懸濁液																																																							
性能／特性	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 高い電気伝導率</li> <li>・ 安定性</li> <li>・ 低い焼結温度</li> <li>・ 抗菌性（抗菌コーティングなどに利用）</li> <li>・ 光学特性（粒子サイズにより、紫外・可視吸収スペクトルが変わり、また、</li> </ul>																																																							

	凝集によっても変化するという、ナノ銀特有の光学的特性を有する。) <ul style="list-style-type: none"> <li>銀ナノ粒子が溶液中に存在する場合、ナノ粒子表面に粒子を安定化させ凝集を伏せず電気二重層が形成される。</li> </ul>
製造会社	<b>【国内】</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>DOWA エレクトロニクス (株) : ナノ銀乾粉、インク、ペースト</li> <li>三ツ星ベルト (株) : ナノ銀ペースト</li> <li>三菱マテリアル (株) : ナノ銀インク</li> <li>三菱製紙 (株) : ナノ銀インク</li> <li>(株) アルバック : ナノ銀インク</li> <li>DIC (株) : ナノ銀インク</li> <li>日本イオン (株) : ナノ銀分散液</li> <li>イーエムジャパン (株)</li> </ul> <b>【海外】</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Sigma-Aldrich</li> <li>Nanopoly など</li> </ul>

#### (ii) 市場規模

銀ナノ粒子は主に、プリンタブルエレクトロニクス向け(配線材料)に応用されているが、ナノサイズの銀粉の販売量は少ない(2012年度4トン程度、平成26年度本調査事業報告書より)。

#### (iii) 主な用途

銀ナノ粒子;

- 診断薬: 定量的検出のための生物学的タグとして、バイオセンサーや多くの分析法で利用
- 抗菌: 衣服や靴、塗料、創傷被覆材、電化製品、化粧品、プラスチックなどに、その抗菌作用が利用
- 導電性: 導電性インクへの利用、熱的特性や電気伝導度の向上のために複合材料の成分として利用
- 光学性: 効率的な集光のために、また、金属増強蛍光(MEF: metal-enhanced fluorescence)や表面増強ラマン散乱(SERS:surface-enhanced Raman scattering)などの光学分光法の性能向上に利用

銀ナノワイヤー;

- 導電性コーティング: 透明導電性膜、フレキシブルエレクトロニクス用途での導電性コーティング
- プラズモンアンテナ: 銀ナノワイヤーに金属性ナノ粒子を付与することで、高いプラズモン効果をもつ、センサーやイメージング用のアンテナとして機能。
- 分子センサー: 銀ナノワイヤーの単層は、ラマン分光法と組み合わせた特定分子の検出の可能なセンサー用アレイの作製に用いられる。
- ナノコンポジット: ナノコンポジット用材料として研究されており、これらシステムにおいて高い誘電率を示す。

#### (iv) 研究開発事例

①世界最高性能の伸縮性導体を実現～ゴム内で銀ナノ粒子の自然形成現象発見による新素材への応用に期待～

開発者: 東京大学大学院工学系研究科 松久 直司、東京大学大学院工学系研究科 教授 染谷 隆夫

開発機構: 東京大学、科学技術振興機構、理化学研究所

概要: 科学技術振興機構(JST)の戦略的創造研究推進事業において、東京大学大学院工学系研究科の松久 直司 博士と染谷 隆夫 教授を中心とした研究チームは、元の長さの5倍の長さに伸ばしても 935 S/cmという世界最高の導電率を示す伸縮性導体の開発に成功し

た。この伸縮性導体は、ペースト状の材料を印刷することによって、ゴムやテキスタイルなど伸縮する素材の上に自由形の配線パターンを形成することができる。また、新素材の構造を高解像度の電子顕微鏡で詳細に調べたところ、ゴムにマイクロメートル寸法の銀フレークを混ぜるだけで、ナノメートル寸法の銀の粒子がゴムの中に均一に自然に発生する現象を発見した。印刷できる伸縮性導体は、高い伸縮性が要求されるスポーツウェア型のウェアラブルデバイスや人間よりも高い伸縮性を必要とするロボットの人工皮膚を実現する上で必要不可欠な技術である。従来の伸縮性導体は伸長させると導電率が大幅に減少するという課題があったが、本研究で発見した新現象によって解決される。この成果により、スポーツウェアやロボットの関節に簡単に高伸縮性センサーを形成できるようになり、今後ヘルスケアや人工触覚などさまざまな応用が期待される。

出典:JST ホームページ(2017/5/16 掲載)

<https://www.jst.go.jp/pr/announce/20170516-3/index.html>

## ②光で抗菌作用をコントロールできる銀ナノ粒子を開発

開発者:熊本大学 教授 新留琢郎、慶應義塾大学 准教授 寺川光洋、大日本塗料株式会社 溝口大剛

開発機構:熊本大学、慶應義塾大学、大日本塗料株式会社

概要:銀は様々な細菌の増殖を抑制する抗菌効果を持ち、特に薬剤耐性菌に対しても抗菌作用を示すため、抗生物質が効かない感染症にも効果があると期待されている。銀は、銀イオンあるいは銀ナノ粒子の形で抗菌剤として用いられるが、銀ナノ粒子は不安定で、その抗菌作用がすぐに失われてしまうという欠点があった。今回、熊本大学の新留琢郎教授、慶應義塾大学の寺川光洋准教授、大日本塗料株式会社の溝口大剛博士らの共同研究グループは、銀ナノ粒子を金でコーティングし、銀ナノ粒子の安定性を高めると共に、パルスレーザー光を照射することで、その抗菌作用をコントロールできる技術を開発した。光照射部位のみで抗菌作用を発揮させることができる本技術は、薬剤耐性菌対策や感染症治療への応用が期待できる。

出典:熊本大学ホームページ(2017/11/2 掲載)

<http://www.kumamoto-u.ac.jp/daigakujuhou/kouhou/pressrelease/2017-file/release171102-1.pdf>

## ③DIC 金属めっき膜の下地となる銀ナノ粒子および高分子密着層材料のパイロット生産を開始

開発者:DIC株式会社

開発機構:DIC株式会社

概要:DIC株式会社(本社:東京都中央区、社長執行役員:中西義之)は、金属めっき膜の触媒として用いる銀ナノ粒子と、銀ナノ粒子と基材の層間で優れた密着性を示す高分子密着層材料を開発し、2013年からサンプルワークを進めてきた。エレクトロニクス関連材料としての採用決定とともに、当社独自の分散・高分子設計技術を活用することで銀ナノ粒子の量産化が可能となったことから、パイロットプラント設備を整え、1月より生産を開始した。同開発品を用いためっき工法は、高密着性を有する高分子層を用いることで、基材表面を粗化(傷つけ)しない平滑な接合面において無電解金属めっき膜を形成できる画期的なプロセスである。一般的な無電解めっき工法では、粗化处理した基材表面にパラジウム触媒を付与し、金属膜を生成させる。高価なパラジウムを使用するためコスト負荷が高いことに加えて、回路基板などでは金属膜のエッチング後にパラジウムが残留し、絶縁信頼性を低下させる懸念があることから、再度パラジウムを除去するためエッチングを行っている。今回開発したプロセスでは、高分子密着層を銀ナノ粒子と組み合わせて使用することで、粗化しない平滑な基材表面に密着力が優れためっき膜下地を形成する。同プロセスは、極薄膜な高分子密着層の上に銀ナノ粒子を塗布し、その上に無電解金属めっきを施して金属めっき膜を生成する。同プロセスにより作製したプリント基板用途では、基材と銅めっき膜の界面が平滑なため、高周波信号の伝送ロスの縮小が可能となる。2020年の実用化が目標とされている第5世代移動体通信システム(5G通信)

や現状の無線 LAN より高速に通信できる超高速近距離無線通信、次世代の大容量無線通信システムなど、適用範囲の拡大が期待されている。また、同プロセスでは、銀ナノ粒子層が銅めっき膜と同じエッチング液で除去できるため、エッチング工程が1度で済み、工程短縮化や微細回路の形成を実現する。また、より厚いめっき膜が必要な場合には、電解めっきを施すことで任意の膜厚に調整することかできる。昨今、耐熱性や耐薬品性に優れるため、自動車部品や住設機器で使用されているポリフェニレンサルファイド(PPS)は、めっき工法や接着剤を使用したラミネート法による金属膜形成が難しいとされてきた。同プロセスは PPS に対しても平滑面での高い密着性を実現するため、金属部品の軽量化として PPS に金属めっき膜を密着させた新たな部品などへの展開が期待できる。

出典: DIC株式会社ホームページ(2017/4/4 掲載)

[http://www.dic-global.com/ja/release/2017/20170404\\_01.html](http://www.dic-global.com/ja/release/2017/20170404_01.html)

#### (v) 利用事例

日本イオン(株)では、銀ナノ粒子の抗菌性を利用して、銀ナノ粒子を添加した抗菌プラスチック原料である、ナノピュア抗菌プラスチックを製造している。ナノピュア抗菌プラスチック内の銀の含有量は、2,000ppm であり、素材プラスチック 90~95%に対して、本製品を5~10%混合し、加熱成形することで、抗菌プラスチック製品が製造可能であり、抗菌剤としての配合率は、最終製品で、0.02~0.05%程度となる。

また、東京大学初のベンチャー企業 AgIC は、東京大学で開発された銀ナノインクを使った電位回路プリント技術をもとに、電子回路印刷キット「AgIC Print」としてクラウドファンディングサイト Kickstarter で資金調達を開始した。この技術は、AgIC の技術アドバイザーである東京大学の川原圭博准教授の研究成果をベースに事業化したものであり、専用の紙に銀ナノインクでペンを使って回路を書いたり、インクジェットプリンタで回路を印刷したりして、導電性テープや導電性接着剤で電位部品をつけることにより、基板製作やはんだ付けなどの手間なしに、また電子回路の試作に使われるブレッドボードなどと比べても簡単に電子回路が作成できる。これにより、製品のプロトタイプの開発期間が飛躍的に短縮され、低コストで開発できる。紙工作や折り紙のように手軽に電子工作を楽しめ、電子回路の教育や学習ツールへの応用も期待できる。

(平成 26 年度本調査事業報告書より)

#### (vi) ナノリスク評価

主な企業のナノ銀の製造現場では、排気やマスク等の保護具など、作業者の保護対策(マスクや作業着)や排気、装置の設置といった厚生労働省の通知(平成21年3月31日付け基発第0331013号 厚生労働省労働基準局長通達「ナノマテリアルに対するばく露防止等のための予防的対応について」)に基づく対策をとっている。

販売先に対しては、SDS の中で、安全対策や保管、廃棄に関する注意書きをはじめ、取扱いにおける注意や応急措置など細かく説明している場合が多い。

有害性情報についても各種毒性に関する情報について SDS 中に記載しているケースが多い。(平成 27 年度本調査事業報告書より)

#### (カ) ナノニッケル

##### (i) 製品概要

サイズ	ニッケルナノ粒子； ・ ニッケル粉には、平均粒径が 2.2 $\mu$ m~7 $\mu$ m 程度のニカド電池や粉末冶金、ゲッター、溶接棒などに使用される製品(輸入品)がある。 ・ 積層セラミックコンデンサー(MLCC:Multi-layerCeramic Capacitor)の内部電極に使用されるニッケルナノ粒子は平均粒子 0.1~0.4 $\mu$ m である。；
形状	粉体、ペースト
計測技術	SEM、TEM

物性	<ul style="list-style-type: none"> <li>MLCC は、誘電体セラミック材料と誘電体を挟む内部電極、内部電極を並列して接続し、印制回路基板へ接合する外部電極（端子）から構成される。</li> <li>ニッケル超微粉は MLCC の内部電極として印刷・焼成する際に、膜の連続性に優れ、焼結性も均一で安定しており、MLCC の多層・薄膜化に適している。</li> <li>電極材料には、かつて銀-パラジウム系ペーストが主に使用されていたが、パラジウム価格の高騰により非金属化が進み、ニッケル超微粉が使用されるようになった。</li> <li>MLCC では電極材料と誘電材料を何層にも積層して同時焼成するため、誘電体と同レベルの焼結挙動を示す電極材料を選択する必要がある。この点でニッケルは融点が高く、BaTiO<sub>3</sub> などの焼成温度 (&gt;1300℃) と同様の温度で溶融し始めることから金属電極層の形成に適している。</li> </ul> <p>(ニッケル超微粉)</p> <table border="1" data-bbox="371 678 1347 1137"> <thead> <tr> <th>製品</th> <th>平均径 (μm)</th> <th>比表面積 (m<sup>2</sup>/g)</th> <th>タップ密度 (g/cm<sup>3</sup>)</th> <th>粗粒カットポイント</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>NFP401</td> <td>0.4</td> <td>1.7</td> <td>3.9</td> <td>非分級品</td> </tr> <tr> <td>NFP401S</td> <td>0.4</td> <td>1.7</td> <td>3.9</td> <td>2μm</td> </tr> <tr> <td>NFP301S</td> <td>0.3</td> <td>2.6</td> <td>3.5</td> <td>2μm</td> </tr> <tr> <td>NFP201S/S D</td> <td>0.2</td> <td>3.4</td> <td>3.4/3.1</td> <td>2μm</td> </tr> <tr> <td>NFP201X/X D</td> <td>0.2</td> <td>3.7</td> <td>3.7/2.8</td> <td>0.8μm</td> </tr> <tr> <td>NFP201H</td> <td>0.2</td> <td>3.9</td> <td>3.8</td> <td>0.6μm</td> </tr> <tr> <td>NFP201Z</td> <td>0.2</td> <td>4.4</td> <td>3.7</td> <td>0.4μm</td> </tr> <tr> <td>NFP117J</td> <td>0.17</td> <td>5</td> <td>3.4</td> <td>0.5μm</td> </tr> <tr> <td>NFP113J</td> <td>0.13</td> <td>7</td> <td>3.1</td> <td>0.5μm</td> </tr> </tbody> </table> <p>出典：JFE ミネラル（株）HP  <a href="http://www.jfe-mineral.co.jp/seihin/pdf/nickel1607_05.pdf">http://www.jfe-mineral.co.jp/seihin/pdf/nickel1607_05.pdf</a></p>	製品	平均径 (μm)	比表面積 (m <sup>2</sup> /g)	タップ密度 (g/cm <sup>3</sup> )	粗粒カットポイント	NFP401	0.4	1.7	3.9	非分級品	NFP401S	0.4	1.7	3.9	2μm	NFP301S	0.3	2.6	3.5	2μm	NFP201S/S D	0.2	3.4	3.4/3.1	2μm	NFP201X/X D	0.2	3.7	3.7/2.8	0.8μm	NFP201H	0.2	3.9	3.8	0.6μm	NFP201Z	0.2	4.4	3.7	0.4μm	NFP117J	0.17	5	3.4	0.5μm	NFP113J	0.13	7	3.1	0.5μm
製品	平均径 (μm)	比表面積 (m <sup>2</sup> /g)	タップ密度 (g/cm <sup>3</sup> )	粗粒カットポイント																																															
NFP401	0.4	1.7	3.9	非分級品																																															
NFP401S	0.4	1.7	3.9	2μm																																															
NFP301S	0.3	2.6	3.5	2μm																																															
NFP201S/S D	0.2	3.4	3.4/3.1	2μm																																															
NFP201X/X D	0.2	3.7	3.7/2.8	0.8μm																																															
NFP201H	0.2	3.9	3.8	0.6μm																																															
NFP201Z	0.2	4.4	3.7	0.4μm																																															
NFP117J	0.17	5	3.4	0.5μm																																															
NFP113J	0.13	7	3.1	0.5μm																																															
性能／特性	<ul style="list-style-type: none"> <li>球形</li> <li>粒子径の精密な制御が可能 平均粒子径 0.1~0.4μm</li> <li>シャープな粒度分布 幾何標準偏差 1.3~1.5</li> <li>高い結晶性 平均結晶子サイズ&gt;0.1μm</li> <li>安定した表面酸化膜 表面が約 3nm の酸化膜で覆われている</li> <li>平滑な粒子表面</li> <li>高純度 Ni&gt;99.9%</li> </ul>																																																		
製造会社	<p>【国内】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>JFE ミネラル</li> <li>昭栄化学工業</li> <li>住友金属鉱山</li> <li>東邦チタニウム</li> </ul> <p>【海外】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>寧波広博納米新材料 など</li> </ul>																																																		

(ii) 市場規模

ニッケルナノ粒子の市場規模推移および予測

	2014年	2015年	2016年 見込	2017年 予測	2018年 予測	2019年 予測	2020年 予測
販売量(トン)	2,450	2,900	3,050	3,200	3,360	3,520	3,680
販売金額(百万円)	32,000	35,500	37,000	38,800	41,000	43,000	45,000

※販売金額はメーカー出荷ベース

出典：(株)富士キメラ総研「2016年 微粉体市場の現状と将来展望」



(iii) 主な用途

積層セラミックコンデンサー (MLCC:Multi-layerCeramic Capacitor) の内部電極

(iv) 研究開発事例

①小さな触媒格納庫－非晶質ニッケルナノ粒子の特異な触媒機能を初めて明らかに－  
開発者:大阪大学大学院基礎工学研究科 教授 真島和志、准教授 劔隼人、特任助教 百合野大雅、産業技術総合研究所触媒化学融合研究センター 研究センター長 佐藤一彦、研究員 田中真司、ナノ材料研究部門 主任研究員 清水禎樹

開発機構:大阪大学、産業技術総合研究所

概要:大阪大学大学院基礎工学研究科の真島和志教授、劔隼人准教授、百合野大雅特任助教および産業技術総合研究所触媒化学融合研究センターの佐藤一彦研究センター長、田中真司研究員、ナノ材料研究部門の清水禎樹主任研究員の共同研究グループは、安価で入手容易なニッケルを用いて直径が最大 15 nm (nm は 10<sup>-9</sup> m) の非晶質ナノ粒子を世界で初めて合成し、このニッケルナノ粒子を用いることで触媒的な炭素－炭素結合形成反応を達成した。一般的に、安価で毒性の低い非金属(ニッケルや鉄など)のナノ粒子は触媒活性が低く、有機合成反応への応用が難しいことが問題となっていた。今回の研究成果は、ニッケルナノ粒子でこれまで知られていた触媒活性の限界を打ち破り、炭素－炭素結合形成反応に対して、パラジウムや白金などの貴金属ナノ粒子より高活性な触媒として利用可能であることを明らかにしたものである。本研究によって、導電性高分子や医薬品などの部分骨格も安価に合成でき、身近な製品の大幅なコストダウンなど、実用的な展開が期待される。また、本研究の合成手法を用いることで鉄、銅、コバルトなど、ニッケル以外の金属粒子も容易に形成できることから、金属ナノ粒子の代表的な応用法であるナノマシンや量子ドットといった次世代のマテリアルを実現する大きなきっかけとなることが期待される。

出典:産総研ホームページ(2015/10/05 掲載)

[http://www.aist.go.jp/aist\\_j/press\\_release/pr2015/pr20151005/pr20151005.html](http://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2015/pr20151005/pr20151005.html)

(v) 利用事例

ニッケルナノ粒子は主に積層セラミックコンデンサー (MLCC:Multi-layerCeramic Capacitor) の内部電極に使用される。MLCC は、PC や携帯電話、デジタル家電、自動車電装などのキーデバイスであり、ニッケルナノ粒子は、MLCC の製造に欠かせない材料となっている。

(vi) ナノリスク評価

主な企業のナノニッケルの製造現場では、排気やマスク等の保護具など、作業者の保護対策(マスクや作業着)や排気、装置の設置といった厚生労働省の通知(平成21年3月31日付け基発第0331013号 厚生労働省労働基準局長通達「ナノマテリアルに対するばく露防止等のための予防的対応について」)に基づく対策をとっている。

販売先に対しては、SDS の中で、安全対策や保管、廃棄に関する注意書きをはじめ、取扱いにおける注意や応急措置など細かく説明している場合が多い。

有害性情報についても各種毒性に関する情報について SDS 中に記載しているケースが多い。

(キ) ナノセルローズ

(i) 製品概要

サイズ	セルローズナノファイバー：幅 4~100nm、長さ 5µm 以上 セルローズナノクリスタル：幅 10~50nm、長さ 100~500nm
形状	繊維状
計測技術	SEM
物性	セルローズナノファイバー (補強用繊維)；

	密度	1.5 g/cm <sup>3</sup>
	弾性率	140 GPa
	強度	3 GPa (推定値)
	熱膨張	0.1 ppm/K
	出典：京都大学 生存圏研究所 生物機能材料分野	
性能／特性	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 軽くて強い（鋼鉄の 1/5 の軽さで 5 倍以上の強さ）</li> <li>・ 大きな比表面積（250m<sup>2</sup>/g 以上）</li> <li>・ 熱による変形が小さい（ガラスの 1/50 程度）</li> <li>・ 植物由来</li> <li>・ ガスバリア性が高い</li> <li>・ 水中で特徴的な粘性を示す</li> </ul>	
製造会社	<b>【国内】</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 王子ホールディングス（株）</li> <li>・ 三菱化学（株）</li> <li>・ 日本製紙（株）</li> <li>・ （株）スギノマシン</li> <li>・ 旭化成せんい（株）</li> <li>・ ダイセルファインケム（株）</li> </ul>	

### (ii) 市場規模

セルロースナノファイバー(CNF)は現時点では研究開発段階で、サンプル供給が中心であり、年間数トン規模の需要と推定されている。研究開発が進められているシングル CNF については、本格的な量産開始は数年先となる見込みである。また、2013 年には国内で各社が実証試験設備などを建設または稼働させ、サンプル販売に乗り出したことから、今後順調に用途開拓および技術確立が進めば、2020 年には年間数百トン～1,000 トンレベルまで市場拡大する潜在需要があると予測されている。

ただし、課題も多く、初期段階では食品添加用や増粘剤用途での採用がスタートしているが、これだけでは市場の広がりが期待できないため、市場規模の大きいフィルム用途の需要創出が鍵となると考えられている。

現時点で想定されている用途は、フレキシブル製品向けの透明基板、食品や化粧品・医療などに応用可能なバリアフィルム包材、細胞培養基材、医療用フィルム・シート、電池用のセパレータなどである。高付加価値ニーズが高く、比較的高コストでも採用可能性はある。これらの用途での採用増加により量産性を高め、コストダウンを図る必要がある。中長期的な方向性としては、フィルター用途への展開が期待されるものの、すでにある炭素繊維やアラミド繊維、CNT などの代替にはやはりコストがネックとなる。また、現段階では添加後の均一分散性、樹脂との密着性・相溶性など、技術的課題も残るため、さらなる研究開発が進められている。なお、構造材などの各種用途では、従来の鉄鋼材料やコンクリート材料から、成形性や軽量性に優れる樹脂材料に置き換える動きがあり、その際課題となる機械的強度を補完するために補強用繊維が使用される。潜在的な需要は大きく、今後の高成長が期待できる。CNF はコストを含め、まだ市場の方向性は不透明であるが、植物由来で持続可能な次世代ナノマテリアルとして大きなポテンシャルを秘めた材料と考えられている(富士キメラ総研「2014 年高機能添加剤・ハイブリッドマテリアルの将来展望」)。

なお、CNF は自動車部品や食品の鮮度を保つ包装材、液晶ディスプレイなど様々な用途に利用可能であると考えられており、経済産業省では、2030 年に 1 兆円規模の市場に育てている目標を掲げ、産学連携の支援も始まっている。

### (iii) 主な用途

CNF の応用用途は広く、様々な用途が提案されている。現在検討が進められている主要な用途を分野別に以下に示す；

- ・ エレクトロニクス:フレキシブル透明基板、電池用セパレータ、他
- ・ 自動車:構造材、自動車部品

- ・ 包装:ガスバリアフィルム(食品、化粧品、医薬品など)
- ・ 建材:高機能内装材、他
- ・ 医療・医薬:生体適合材料、止血剤、医療用フィルム、他
- ・ その他:増粘剤、化粧品原料、食品添加物、各種補強剤、他

#### (iv) 研究開発事例

##### ①耐水性に優れたセルロースナノファイバーシート開発

開発者:王子ホールディングス株式会社

開発機構:王子ホールディングス株式会社

概要:王子ホールディングス株式会社は世界で唯一、細さ3~4ナノメートルの超微細CNFを用いたCNF連続透明シートを開発、製造し、商品名「アウロ・ヴェール」「アウロ・ヴェール 3D」としてサンプルワークを進めている。従来品の弱点をカバーする耐水性に優れたCNF連続透明シート「アウロ・ヴェール WP」の開発に成功した。CNFは植物繊維であるため、従来のCNFシートは耐水性に劣るという欠点があったが、「アウロ・ヴェール WP」は、当社CNF透明シートの特長である、高い透明性、フレキシブル性、低熱膨張性、優れた成形加工性、ガスバリア性に加え、更に耐水性を有するという、まったく新しい特徴を持った画期的なシートである。これにより、従来のCNFシートでは困難であった高湿環境下での使用が可能となり、新たな分野・用途への展開が期待できる。

出典:王子ホールディングス株式会社ホームページ(2017/10/26掲載)

[https://www.ojiholdings.co.jp/Portals/0/resources/content/files/news/2017/171026\\_jp.pdf](https://www.ojiholdings.co.jp/Portals/0/resources/content/files/news/2017/171026_jp.pdf)

##### ②次世代新素材「セルロースナノファイバ」を使用した電子材料を開発 電子材料を開発

開発者:太陽ホールディングス株式会社

開発機構:太陽ホールディングス株式会社

概要:太陽ホールディングス株式会社は、植物由来の次世代新素材として注目される「セルロースナノファイバー(以下、CNF)」を、世界で初めて電子部品用絶縁材料に使用する独自技術を開発した。エレクトロニクス製品の小型軽量化により電子部品の高密度化が進んでおり、電子部品に使われる絶縁材料には、高性能化、高信頼性化が求められている。今回、CNFの高強度、低熱膨張率などの特性に注目し、研究の結果、さらに高性能な電子部品用絶縁材料を実現した。電子部品のプリント配線板に使われる絶縁材料は、プリント配線板上の配線や半導体などと同様の低熱膨張率化が求められる。一般的に、電子部品用絶縁材料に使われる樹脂は、熱膨張率が高く、充填剤を混ぜ合わせて低熱膨張化させる方法が採られている。しかし、充填剤には絶縁材料を脆くする性質があり、現在の方法では、低熱膨張率化と高強度化の両立に限界がある。そこで、CNFが樹脂中で相互作用をもち、少量でも樹脂物性改善に大きな効果が発現することに着目し、電子部品用絶縁材料に応用することで、さらなる低熱膨張率化を図ると同時に強度を向上させる新たな方法を開発した。CNFは親水性が高く、一般的な樹脂に均一に分散することは困難であった。これを解決するため、各種CNF材料と樹脂との組み合わせや、複合化方法を研究し、世界に先駆けて、CNFを使用したより高性能な電子部品用絶縁材料を実現した。

出典:太陽ホールディングス株式会社ホームページ(2017/5/25掲載)

[http://www.taiyo-hd.co.jp/\\_cms/wp-content/uploads/2017/05/20170525\\_01.pdf](http://www.taiyo-hd.co.jp/_cms/wp-content/uploads/2017/05/20170525_01.pdf)

##### ③セルロースナノファイバー(CNF)と日本の伝統工芸「漆」の融合

開発者:日本製紙株式会社

開発機構:日本製紙株式会社

概要:日本製紙株式会社は、明治大学名誉教授の宮腰 哲雄氏、および漆芸家の石井 昭氏と共同で、日本古来の天然塗料である漆への、木材から得られる最先端素材であるセルロース

ナノファイバー(以下CNF、当社製品名「セレンピア TM」)の添加について研究を進めてきたが、今回「セレンピア TM」添加の漆塗料は、通常の漆塗料よりも高光沢、高強度の性能を発揮することを確認した。漆の木から採取した樹液は、古来、精製することにより、主に塗料として使われてきた。木や紙などを原料とする器物に漆を塗る漆器は、漆の効果により強度が増して長持ちさせることができ、また、塗り上がりの美しさから、日本各地で伝統的な美術工芸品としての歴史を誇る。近年、漆の需要増を背景に、漆の塗面の長寿命化など漆自体の性能向上が求められていることから、日本製紙株式会社、宮腰教授および石井氏は、CNFが木質バイオマスであることに着目し、昨年1月より、「セレンピア TM」を漆塗料に添加する共同研究を開始した。共同研究では、漆塗料へのCNF添加の手法確立とともに、その効果の確認を行ってきたが、「セレンピア TM」の添加により、添加しない場合に比べて、塗面の光沢が向上すること、また、曲げ強度は応力として数十パーセント以上アップすることが確認でき、漆の機能性向上に成功した。

さらに、「セレンピア TM」の添加により、高光沢、高強度に加えて、肉持ち感が良く、経時劣化を遅らせる効果も期待できることから、今後は、伝統と最先端の技術を融合させた新しい漆塗料としての商品開発を進めていく。

出典：日本製紙株式会社ホームページ(2017/11/29 掲載)

<http://www.nipponpapergroup.com/news/year/2017/news171129004002.html>

#### (v) 利用事例

王子ホールディングスと三菱化学は共同で研究開発を行っている。また、両者は NEDO プロジェクトに参加し、京都大学と共同研究開発を行っている。2社はCNFを利用した透明連続シートを開発し、2013年3月よりサンプル供給を開始している。透明性、温度変化による寸法安定性、強度などに優れ、OLEDなどのフレキシブル透明基板向けへの展開が期待される。

スギノマシンは同社独自の加工技術「超高速ウォータージェット技術」により、CNFの製造を行っている。キッチン・キトサンも合わせて製造し、バイオマスナノファイバー「BiNFis(ビんフィス)」シリーズとして販売している。なお、スギノマシンが販売しているCNFはシングル品ではなく、径が約20nm、長さが2 $\mu$ mのもので、触媒などを使用せずに、水とCNFのみで構成された素材を生産できるため、食品や医療向けへの展開がしやすいことが強みである。

旭化成せんいでは、球状のセルロースナノビーズを開発し、着色したセルロースナノビーズが、イムクロマト診断キットの高感度化に寄与できるとして、インフルエンザ診断キットの着色粒子として利用されている。同社の開発したセルロースナノビーズは、高い分散安定性と優れた耐薬品性をもち、沈降回収が可能であるという特徴を有する。高い分散安定性では、界面活性剤を添加しなくても長期間の安定分散が可能であり、耐薬品性では、水だけでなく有機溶媒中でも安定分散が可能であるという特徴を示す。また、沈降回収に関しては、遠心分離により、容易に回収が可能であるという特徴がある。着色したセルロースナノビーズをイムクロマト診断キットに採用することで、少ない検査対象物質でも検出可能で、病気の早期発見・診断が可能となる。

日本製紙では、セルロースナノファイバーを含有する製紙用コーティング材を開発している。このコーティング材の固形分中のセルロースナノファイバーの含有量は、0.02~0.05重量%である。

(平成27年度本調査事業報告書より)

#### (vi) ナノリスク評価

・PFI(Paper and Fiber Research Institute)(ノルウェー)

様々な食品、医薬品にセルロースが使用されており、セルロースそれ自身には毒性は無いと考えている。ナノセルロースが毒性を示すとすれば、ナノの形態、残存薬品、添加剤の影響が考えられる。

前処理法や乾燥方法、表面修飾法が異なる様々なタイプのCNF材料の細胞毒性をISO 10993-5(Biological Evaluation of Medical Devices - Part 5: Tests for *In Vitro* Cytotoxicity)で評価した結果、界面活性剤の一種であるCTAB(Cetyl trimethyl ammonium

bromide)を吸着させたCNF 以外のCNF には細胞毒性は認められなかった(イタリアのモテナ大学と共同で実施)。

・UPM-Kymmene Oyj(フィンランド)

Occupational Safety(労働者の安全)については、UPM とStora Enso の両社がフィンランド労働健康研究所(Finnish Institute of Occupational Health)にサンプルを提出し、評価を受けている。製造物の安全関連については、EU 委員会や、ユーザーと協力している。UPM が製造した各種CNF(Biofibrils)に関しては、UPM 独自に試験を行い、細胞毒性、炎症性、遺伝毒性などが無いことを確認。環境、安全、健康問題や標準化の課題については他国のパートナーと協力出来る分野である。

・メイン州立大学(米国)

自らのサンプルについては外部機関に評価を依頼し、無毒との結果を得ている。FPL (ForestProducts Laboratory)が安全性評価に関する費用を出しており、米国ではFPL が主導していると推測される。

・FPInnovations

硫酸基を持ったCNF についてはカナダの安全性評価をクリアし、食品、医薬品に利用できるまでの許可を得ている。現在、同様の申請を米国、EU にて実施中である。国内で開発を行っている企業においても、ナノセルロース自体が健康被害を起こす可能性は低いと様々な食品、医薬品にセルロースが使用されており、セルロースそれ自身には毒性は無いと考えている。ナノセルロースが毒性を示すとすれば、ナノの形態、残存薬品、添加剤の影響が考えられる。

前処理法や乾燥方法、表面修飾法が異なる様々なタイプのCNF 材料の細胞毒性をISO 10993-5(Biological Evaluation of Medical Devices - Part 5: Tests for *In Vitro* Cytotoxicity)で評価した結果、界面活性剤の一種であるCTAB(Cetyl trimethyl ammonium bromide)を吸着させたCNF 以外のCNF には細胞毒性は認められなかった(イタリアのモテナ大学と共同で実施)。

(平成27年度本調査事業報告書より)

(ク) 量子ドット

(i) 製品概要

サイズ	通常、2-10 nm の直径で、10-50 個ほどの原子で構成
形状	コロイドナノ結晶
計測技術	SEM、ゼータ電位
物性	現在のところ、量産された商品での物性値を開示したデータは確認できなかった。
性能/特性	<ul style="list-style-type: none"> <li>量子ドットは3次元かつナノサイズの半導体結晶に電子が量子力学的に閉じ込められており、従来の材料とは異なる。</li> <li>量子ドットのサイズが小さくなると、半導体のバンドギャップが大きくなり、サイズによって半導体の光ルミネセンス発光波長を調節することが可能である。</li> <li>量子ドットが非常に鋭い発光スペクトルと高い量子効率をもち、オプトエレクトロニクスおよびイメージングの多くの用途において理想的な発光団となっている。</li> </ul>
製造会社	<p>【海外】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Mknano (Canada)</li> <li>Attonuclei (France)</li> <li>Qlight Nanotech (Israel)</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ NanoAxis (USA)</li> <li>・ Antibodies Incorporated (USA)</li> <li>・ Cromoz (USA)</li> <li>・ Crystalplex (USA)</li> <li>・ Evident Technologies (USA)</li> <li>・ Ocean Nano Tech (USA)</li> <li>・ Quantum Materials Corp. (USA)</li> <li>・ NANOSYS Inc. (USA)</li> </ul> <p style="text-align: right;">出典：平成 28 年度本調査事業報告書より</p>
--	--

(ii) 市場規模

QD ディスプレイは、これまで QD TV を生産する韓国大手 TV メーカー向けに限定して生産されてきており、2016 年の QD 材料世界出荷数量(メーカー出荷ベース)は 30t(前年比 200.0%)、QD シート用バリアフィルム世界出荷数量は 640 万㎡(同 200.0%)となった。今後、中国の複数の TV メーカーが QD TV の量産を開始する予定であり、QD ディスプレイ部材市場も大きく伸長する見通しである。2017 年の QD 材料世界出荷数量(メーカー出荷ベース)を 77t(前年比 256.7%)、QD シート用バリアフィルム世界出荷数量は 1,600 万㎡(同 250.0%)と予測されている(矢野経済研究所)。

(iii) 主な用途

CNF の応用用途は広く、様々な用途が提案されている。現在検討が進められている主要な用途を分野別に以下に示す；

- ・液晶ディスプレイ
- ・LED 照明
- ・太陽電池
- ・熱電変換材料
- ・バイオイメージング

(iv) 研究開発事例

①シリコン量子ドット構造で超高精度量子ビットを実現

開発者：東京大学 大学院工学系研究科 教授 樽茶 清悟、理化学研究所 基礎科学特別研究員 米田 淳

開発機構：科学技術振興機構、理化学研究所、東京大学、東京工業大学、慶應義塾大学、名古屋大学

概要：JST 戦略的創造研究推進事業において、樽茶 清悟 理化学研究所 グループディレクター／東京大学 大学院工学系研究科 教授、米田 淳 理化学研究所 基礎科学特別研究員らの研究グループは、シリコン量子ドットにおいて世界最高水準の演算精度をもつ電子スピン量子ビット素子を開発した。量子コンピューターは次世代コンピューターの候補として注目され、その情報を担う量子ビットの開発競争が、超伝導素子を筆頭にさまざまなシステムにおいて世界的に激化している。半導体素子を用いた量子ビットの実装は、産業応用の観点から重要である一方で、量子演算速度と情報保持時間の両立が難しく、高性能化が大きな課題となっていた。本研究グループは、慶應義塾大学の伊藤 公平 教授と名古屋大学の宇佐美 徳隆 教授らが新たに開発した、磁氣的雑音の極めて少ない同位体制御シリコン基板を用いて量子ドット素子を作製した。これと特殊な形状の微小磁石を用いた高速スピン操作を組み合わせ、従来の量子ビットに比べて約 100 倍の演算速度と約 10 倍の情報保持時間を同時に達成し、量子演算の誤り率の最高値を従来値より約 1 桁減少させることに成功した。半導体同位体技術を適用したことで、この素子における電子スピンの量子情報喪失は、通常の磁氣的雑音ではなく、電荷雑音が支配していることを初めて明らかにした。本研究成果は、産業集積化に適したシリコン・ナノ構造における超高性能の電子スピン量子ビットの実装方法を確立するもの

で、今後これを用いたシリコン量子コンピューター開発の加速が見込まれる。本研究は、東京工業大学の小寺 哲夫 准教授、慶應義塾大学の伊藤 公平 教授、名古屋大学の宇佐美徳隆 教授らと共同で行った。

出典:JST ホームページ

<https://www.jst.go.jp/pr/announce/20171219/index.html> (2017/12/19 掲載)

②DIC 米・Nanosys とともにインクジェット印刷方式によるディスプレイ向け量子ドットカラーフィルタ用インキを共同開発中。

開発者:DIC株式会社、Nanosys, Inc.

開発機構:DIC株式会社、Nanosys, Inc.

概要:DIC株式会社は、Nanosys, Inc. (本社:米国カリフォルニア州ミルピタス)とともにインクジェット印刷方式によるディスプレイ向け量子ドットカラーフィルタ用インキを共同開発している。量子ドット(QD)は、発光性の無機半導体ナノ粒子である。粒子径を変えることで発光色を自在に制御できることから、次世代ディスプレイ材料として注目を集めている。その中でも、量子ドットカラーフィルタ(QD-CF)は、液晶ディスプレイや有機 EL ディスプレイと組み合わせることで、既存のディスプレイと比較して、低消費電力化、色再現範囲拡大、視野角拡大が実現できるデバイスである。また、QD-CF を大型ディスプレイへ適用するためには、既存のカラーフィルタの主要製法であるフォトリソ方式よりも、QD 材料のロスを最小化できるインクジェット印刷方式が理想的である。最先端材料である QD は、その製造コストが高価であることも需要拡大へのハードルとなっているが、インクジェット印刷方式であれば、より低コストで QD-CF を製造することができる。QD のディスプレイへの応用は、カドミウム系材料で先行していたが、サステナビリティの観点から、カドミウムフリーQD の開発が強く望まれている。Nanosys は世界有数のカドミウムフリーQD メーカーであるとともに、QD 材料のノウハウ、特許を多数所有しているトップ QD メーカーである。DIC は、世界最大のインキメーカーであり、これまで培った分散技術、配合技術、樹脂をはじめとした豊富なインキ材料リソースなどのインキ設計に必要な技術を多数所有している。Nanosys のカドミウムフリーQD と、DIC のインキ設計技術をコラボレーションすることで、世界初のカドミウムフリーQD インクジェットインキの開発を目指す。QD インキ設計に際して、現在、さまざまなインクジェットヘッドの種類や生産ラインに対応できるよう、熱硬化型インキおよび UV 硬化型インキでの開発を進めている。DIC では、この QD インクジェットインキを、液晶材料、カラーフィルタ用有機顔料に続くディスプレイ材料として、2020 年の上市を目指して開発を進めていく。

出典:DIC ホームページ(2017/12/06 掲載)

[http://www.dic-global.com/ja/release/2017/20171206\\_01.html](http://www.dic-global.com/ja/release/2017/20171206_01.html)

③分子を用いた縦型共鳴トンネルトランジスタを開発。

開発者:物質・材料研究機構 国際ナノアーキテクトニクス研究拠点 量子デバイス工学グループ  
主任研究員 早川竜馬、グループリーダー 若山裕、統合型材料開発・情報基盤部門 情報  
統合型物質・材料研究拠点 副拠点長 知京豊裕

開発機構:国立研究開発法人物質・材料研究機構

概要:国立研究開発法人物質・材料研究機構 国際ナノアーキテクトニクス研究拠点 量子デバイス工学グループの早川竜馬 主任研究員、若山裕 グループリーダー、統合型材料開発・情報基盤部門 情報統合型物質・材料研究拠点の知京豊裕 副拠点長の研究グループは、分子を量子ドットとして用いた縦型共鳴トンネルトランジスタの作製および動作の実証に成功した。シリコンデバイスと同じ微細化プロセスを適応し、分子の持つ離散的なエネルギー準位を利用して、“0”と“1”の 2 値だけでなくトランジスタの多値制御に繋がる成果を得た。次世代トランジスタに求められる微細化、高集積化、低消費電力化に加え、高速化を同時に実現する分子デバイスの開発につながると期待される。単一分子をトランジスタやメモリの素子に用いる分子デバイスの開発は、究極のナノエレクトロニクスとして期待されており、ここ 20 年の間に、単一分

子の電気伝導を計測する技術が確立され、分子の優れた機能が示されてきた。しかし、分子デバイスを集積する技術が確立されておらず、いまだ基礎物性の評価に留まっている。一方、シリコントランジスタのさらなる高速化、高集積化、低消費電力化を実現するため、電子のトンネルリングを用いたトンネルトランジスタや、多値制御を可能とする単電子トランジスタが注目されている。ただ、トンネルトランジスタは、“0”と“1”の2値動作という点では従来のトランジスタと変わらず、単電子トランジスタも量子ドットのサイズをナノスケールで均一に制御することが難しいため、いまだ実用化されていない。これらの問題を解決するため、本研究グループはこれまで、絶縁体の間に分子を壊すことなく集積する技術を確認し、分子を量子ドットとして、絶縁体間に共鳴トンネル電流が流れることを実証してきた。分子はナノスケールで均一に合成できるため、サイズの制御も容易である。さらに、分子のエネルギー準位が分子設計や外場によって制御できる利点を活かして、共鳴トンネル電流の多値制御も可能であることを2端子構造において実証してきた。今回、上記成果をさらに発展させ、絶縁体部分に分子を内包したチャンネル層を、既存のリソグラフィ技術を用いて微細加工することにより、縦型共鳴トンネルトランジスタを作製した。既存の微細化技術は、有機材料であるレジストや有機溶媒を使用するため、通常の分子デバイスでは使用できない。しかし今回提案したトランジスタ構造では、分子が絶縁膜で保護されているためシリコンプロセスで培った微細化技術が適応できる。さらに、作製したトランジスタを用いて、低温条件下（20K）にて、ゲート電圧によってトンネル電流が階段状に変化する様子を観測した。今回作成したトランジスタ構造は、縦型のため高集積化が可能で、トンネル電流を使うことで低消費電力化も実現できる。さらに、分子設計に基づいたトランジスタの多値制御が実現できることを示しており、シリコントランジスタの限界を超えた高速化、高集積化、低消費電力化を実現する次世代ナノトランジスタの開発が期待できる。

出典:NIMS ホームページ(2017/07/31 掲載)

<http://www.nims.go.jp/news/press/2017/07/201707310.html>

#### (v) 利用事例

(株)QDレーザは光通信量子ドットレーザを世界で初めて開発した。温度無依存で高速に動作する量子ドットレーザを世界で初めて実用化、量産化することを開発のターゲットとした。開発した量子ドットレーザは、省電力性(85°Cの高温で従来比30%減)、高温度耐性(150°C以上)、温度安定性(100°Cまで発振しきい値電流がほぼ安定)に優れ、光通信装置の小型化・省電力化と高密度実装、及び、温度安定化回路の省略や調整・検査工数の削減を可能とする。また、(株)QDレーザは、コア技術であるGaAs基板上に量子ドットを形成する工程を自社で行い、ウエハをチップ化する工程では既存の大量生産ラインを活用することで、高い生産スループットと、コスト競争力を備え持つ。今後、量子ドットレーザ市場シェアの拡大が進み、地球規模の光通信インフラの発展に寄与すると期待される。開発した量子ドットレーザは、2010年度に20万台出荷され、2011年度は100万台の出荷を見込んでいる。

(NEDO ホームページ <http://www.nedo.go.jp/content/100186175.pdf>)

#### (vi) ナノリスク評価

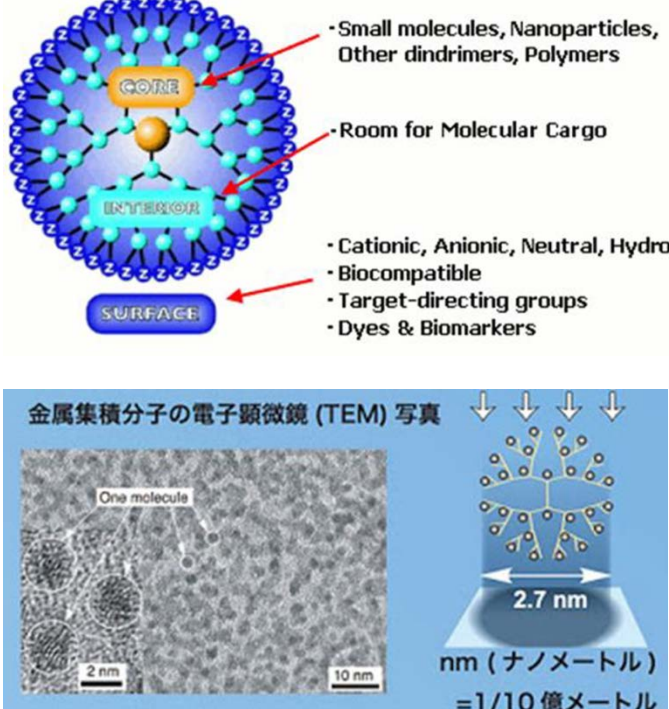
現在、研究開発段階であり、ナノリスク評価に関する情報は得られなかった。

#### (ケ) デンドリマー

##### (i) 製品概要

サイズ	〔一次粒子〕 1~10nm 〔二次粒子〕 該当なし
形状	球状：構造が正確にコントロールされた1~10nmサイズの大きさの樹木状のポリマーである。大きく分けて2つのタイプ「Fréchetタイプ」と「Tomaliaタイプ」に分けられる。



	 <p>金属集積分子の電子顕微鏡 (TEM) 写真</p> <p>nm (ナノメートル) = 1/10 億メートル</p>
物性	<p>「core」、「interior」、および「surface」の 3 つの要素から構成される。各構成要素が特異な機能を発現すると同時に、ジェネレーションごとに成長していく dendrimer 特有のナノ構造の物性を決定する。</p>
性能／特性	<p>一般的に、単一分子量、粘度が低い、非晶性、コアおよび外殻による機能性付与が可能、単分子ミセル形成が可能、直径約 10nm 以下、内部に他分子や金属の包含が可能など、従来の高分子材料には見られない特長を持っている。また高世代 dendrimer では球状の分子形態と見なし、その球状の形態や分子表面に多数の官能基を導入できることから、医薬分野、電子材料、化学分野等において新しい高機能材料として期待されている。</p>
製造会社	<p>【国内】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 大阪有機化学工業 「STAR-501」</li> <li>・ 日産化学工業 「ハイパーブランチポリマー」</li> <li>・ 伯東 「エステル型 dendrimer」</li> <li>・ ナード研究所 (受託)</li> <li>・ 東京工業大学 / 山元・今岡研究室</li> <li>・ 大阪府立大学 / 河野教授</li> </ul>

出典：平成 28 年度本調査事業報告書

(ii) 市場規模

大学や各社で研究開発が進められているが、工業用、医療用としては未だに製品化されたという情報はない。価格が高ことから工業用製品としては特殊用途に限定されるため、実際に製品化されるのかは疑問である。潜在的な市場として、dendrimer の特長である様々なゲスト分子を内部に取り込むことができるため、医療用ドラッグデリバリーシステム (DDS) に採用される可能性がある。採用されれば DDS 分野で大きな市場が立ち上がると見られる。(平成 28 年度本調査事業報告書)

(iii) 主な用途

現在検討が進められている主要な用途を分野別に以下に示す；

- ・ 医療用ドラッグデリバリーシステム (DDS)

- ・光学材料
- ・電子材料
- ・生医学材料などの高機能材料（平成 28 年度本調査事業報告書）

#### (iv) 研究開発事例

①溶媒蒸気の識別が可能な新しい分子集合体材料を作成一取り込む分子に応じて蛍光が大きく変化する多孔性 dendrimer 結晶

開発者:筑波大学数理物質系 教授 山本洋平、西堀英治、数理物質科学研究科大学院生 中嶋紗英、東京工業大学科学技術創成研究院化学生命科学研究所助教 アルブレヒト建、教授 山元公寿、京都大学工学研究科 教授 植村車史准、博士 北尾岳史

開発機構:筑波大学、東京工業大学、京都大学、ハイデルベルグ大学

概要:筑波大学数理物質系山本洋平教授、西堀英治教授、数理物質科学研究科大学院生 中嶋紗英(物性・分子工学専攻博士前期課程)は、東京工業大学科学技術創成研究院化学生命科学研究所アルブレヒト建助教、山元公寿教授、京都大学工学研究科植村車史准教授、北尾岳史博士とハイデルベルグ大学との共同研究で、 $\pi$  共役 dendrimer から形成する多孔性マイクロ結晶注 2) の作成に成功した。Dendrimer は分子量が単一の巨大分子で、樹状高分子とも呼ばれている。その立体的な高高さから、Dendrimer はアモルファスな凝集構造を形成することが多く、特に世代の大きな dendrimer においてその傾向は顕著である。今回、本研究グループは、第 3 世代の dendron を有する  $\pi$  共役 dendrimer の自己組織化について詳細に検討した。その結果、この dendrimer が極めて多孔質な結晶を形成することを見出した。この dendrimer 結晶は、大きな細孔表面積と特異な電子状態を備えているために、溶媒蒸気のばく露により蛍光強度が顕著に増大すると同時に大きな蛍光色変化を示すことを明らかにした。蛍光特性と多孔性を併せもつ dendrimer 集合体は、溶媒蒸気や気体分子などを識別する新しい蛍光プローブとしての応用が期待できる。

出典:筑波大学ホームページ(2018/02/21 掲載)

<http://www.tsukuba.ac.jp/wp-content/uploads/180221yamamoto-1.pdf>

②蛍光特性を示す CdS 量子ドットと液晶性を示す dendron から"有機無機ハイブリッド dendrimer"を開発

開発者:東北大学 多元物質科学研究所准教授 蟹江澄志、博士 松原正樹、教授村松淳司、シェフィールド大学 教授 Goran Ungar

開発機構:東北大学、シェフィールド大学

概要:東北大学 多元物質科学研究所 蟹江澄志 准教授、松原正樹 博士(現 仙台高等専門学校 助教)、村松淳司 教授(同研究所所長)、シェフィールド大学 Goran Ungar 教授らの研究グループは、東北大学 多元物質科学研究所 秩父重英 教授グループおよび九州大学 先導物質化学研究所 玉田 薫 教授グループと連携して、硫化カドミウム(CdS)量子ドット表面に液晶性を示す dendron を密に修飾することで、CdS 量子ドットに dendron 由来の液晶性を付与した。得られた dendron 修飾量子ドットはこれまでで最も非対称性の高い液晶性立方晶構造を形成し、長周期的に規則配列することを見出した。さらに、CdS 量子ドットが自己集積すると、外部の光エネルギーにより CdS 量子ドット内部に生じた励起エネルギーが周囲の dendron にほぼ全てエネルギー遷移することで量子ドットの発光強度を自在に制御できることを明らかにし、その機構を解明した。このような量子ドットの発光を制御するエネルギー遷移機構は光のエネルギーを直接電気エネルギーに変換できる可能性があり、高効率太陽電池や高輝度発光ダイオード(LED)の開発につながる事が期待できる。さらに外部の温度変化により発光強度が変化することから生鮮食品の熱履歴センサーなどの開発にもつながると期待できる。

出典:東北大学ホームページ(2017/6/9 掲載)

<https://www.tohoku.ac.jp/japanese/2017/06/press20170605-02.html>

(v) 利用事例

デンドリマーは、そのコアはデンドロンで覆われており周囲から孤立した環境にあるため、特異な発光挙動や反応性を示すことが見出されて新しい機能性物質として期待され、下記に示すような応用が研究されている。

・ドラッグデリバリー

病気の治療の過程で、医薬品の投与に際して体内に持ち込まれた薬剤が、対象の部位・臓器に到達してその効力を発揮することが期待される。治療薬の投与は経口・注射・皮膚への塗布などを通して行われるが、患部に到達する薬の濃度は高くない。一方がんの治療薬では、がん細胞だけではなく健康な細胞も損なわれてしまうこともある。このようなケースでは、薬剤投与後、がん細胞に到達して初めて攻撃を開始することが望まれる。さらにがん治療の対象となっている細胞が、投与する薬の分子を呼び寄せることができれば、大きな治療の効果が期待できる。

デンドリマーはその分子の構成から、薬の分子を抱き込んで運ぶ機能、攻撃対象となる病気の細胞と接触したら薬を放出する機能、さらに例えばがんに侵された細胞が引きつける機能などをデンドリマーが保有するよう、様々な工夫をする必要がある。

(平成 28 年度本調査事業報告書)

(vi) ナノリスク評価

現在、研究開発段階であり、ナノリスク評価に関する情報は得られなかった。

(コ) カーボンブラック (導電性)

(i) 製品概要

サイズ	粒径 30~40nm		
形状	CB の最小単位の集合体は炭素 6 員環が 30 ~ 40 個結合したもの (層平面 (プレート)) であり、この層平面が 3~5 層ファンデルワールス力で約 3.5 Å の間隔に積み重なったものが結晶子である。この結晶子は粒子の外周に沿って平行に配列しているが、内部にいくほどその配列は不規則になっている。この結晶子が 1000 ~ 2000 個集合して 1 個の粒子を形成し、さらにこの粒子が 20 ~ 40 個程度相互に化学的物理的に結合 (ストラクチャー) している。		
計測物性	SEM、TEM		
	(導電性カーボンブラック)		
		ケッチェンブラック EC300J	ケッチェンブラック EC600JD
	DBP 吸油量 (c m <sup>3</sup> /100g)	360 (9g 法)	495 (15g 法)
	BET 比表面積 (m <sup>2</sup> /g)	800	1,270
	揮発分 (%)	0.5	0.7
	pH	9	9
	灰分 (%)	0.05	0.1
	一次粒子径 (nm)	39.5	34
	出典：ライオン・スペシャリティ・ケミカルズホームページ <a href="http://www.lion-specialty-chem.co.jp/ja/catalog/01/k.php">http://www.lion-specialty-chem.co.jp/ja/catalog/01/k.php</a>		
	(導電性カーボンブラック (樹脂・ゴム配合時の体積固有抵抗データ))		
		トーカブラック #5500	トーカブラック #4500
		トーカブラック #4400	
	算術平均粒子径 (nm)	25	40
	窒素吸着比表面積 (m <sup>2</sup> /g)	225	58
	よう素吸着量 (mg/g)	254	63
	比着色力 (%)	98	68

	DBP 吸収量 (A 法) (c m <sup>3</sup> /100g)	155	168	135
	揮発分 (%)	1.4	0.6	0.7
	出典：東海カーボンホームページ <a href="http://www.tokaicarbon.co.jp/products/carbon_b/toka/conductive.html">http://www.tokaicarbon.co.jp/products/carbon_b/toka/conductive.html</a>			
性能／特性	<p>・導電性カーボンブラックとしては、アセチレンブラックやケッチェンブラックが代表的であるが、その他ファーネス法によって製造されるカーボンブラックのうち高導電性を有するものもある。</p> <p>・アセチレンブラックはケッチェンブラックよりも比表面積は小さいが、高純度のため、不純物による影響が極めて少なく、比較的Lowコストで導電性能を有しているため乾電池や二次電池、ゴムなどで採用されている。添加率は10~40%である。</p> <p>・ケッチェンブラックは比表面積が極めて高く、単位重量当たりの量子数をアセチレンブラックに比べて6~8倍に高めることができる。そのため、低添加で高導電性を付与し、二次電池の中でも車載用途で採用されている。添加率は5~20%である。</p> <p>・その他ファーネス法で生成された導電性カーボンブラックはLowコストであり、樹脂への添加用途として帯電防止塗料向けの採用があり、その他、中国向けLiBのLFP向け正極導電助剤としてCNTと一緒に導電性を付与させ、車載用途で採用されているとみられる。添加率は30~50%である。</p>			
製造会社	<p>【国内】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ デンカ</li> <li>・ ライオン・スペシャリティ・ケミカルズ</li> <li>・ 旭カーボン</li> <li>・ 東海カーボン</li> <li>・ 三菱ケミカル</li> </ul> <p>【海外】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ Imerys Graphite&amp;Carbon (ベルギー) 等</li> </ul>			

## (ii) 市場規模

導電性カーボンブラックの市場規模推移および予測

	2014年	2015年	2016年 見込	2017年 予測	2018年 予測	2019年 予測	2020年 予測
販売量(トン)	38,710	40,210	41,400	42,500	43,800	45,370	46,830
販売金額(百万円)	28,700	31,330	31,050	31,940	32,880	34,020	35,060

※販売金額はメーカー出荷ベース

出典：(株)富士キメラ総研「2017年高機能添加剤・ハイブリッドマテリアルの現状と将来展望」

## (iii) 主な用途

現在検討が進められている主要な用途を分野別に以下に示す；

- ・電線・ケーブル
- ・自動車
- ・一次電池
- ・二次電池
- ・導電ゴム
- ・ICトレイ

## (iv) 研究開発事例

ここ数年間の新たな研究開発事例は確認されなかった。

(v) 利用事例

・一次電池は主にマンガン電池用正極集電体で採用されており、主にアセチレンブラックが採用されている。

・高圧ケーブルは、地域による規格や特性などから、日本ではアセチレンブラック、欧米ではケッチェンブラックが主に採用されている。

・海外を中心にフロントフェンダーや外板などの自動車外装用向けに採用されている。欧州の自動車メーカーは軽量化に加えて成形性が高く、設計を反映しやすいことから、プラスチックの需要が増加している。導電性カーボンブラックを添加することで、静電塗装を実現している。

・二次電池においては、主に正極の導電助剤として利用されている。主に採用されているのは、アセチレンブラックであり、高容量タイプなどに少量添加で高導電性を発現するケッチェンブラックが利用されている。今後市場をけん引していく用途であり、ウェイトは拡大していくとみられる。

・ゴム用途として複写機のローラーや部品があるが、採用は一部であるものの、ペーパーレス化やインクジェットの拡大などにより減少傾向である。

((株)富士キメラ総研「2017年高機能添加剤・ハイブリッドマテリアルの現状と将来展望」)

(vi) ナノリスク評価

カーボンブラックの輸送・貯蔵、使用等取扱上の施設は極力密閉構造としている。容器や配管等も外部に漏れないものを用い、点検孔、マンホール等解放される部分もシールで密閉している。カーボンブラックの袋詰め、解袋等の発塵作業に当たっては局所排気設備を用いると共に、集塵設備も併用して発生した粉じんを発生場所で除去している。また屋内作業場において浮遊粉じん濃度を極力下げると共に、集塵設備も併用している。また、集塵設備で捕集した粉じんは産業廃棄物として処分している。

また労働者には、労働安全衛生法粉じん障害防止規則及びじん肺法の規則内容を教育している。例えば、保護具の使用:粉塵作業に従事する場合は、防じんマスク(国家検定に合格したもの)、防塵メガネ、ビニール又はゴム手袋の着用を指導徹底している。

出典:経済産業省 ナノマテリアル情報提供シート

[http://www.meti.go.jp/policy/chemical\\_management/other/nano\\_program.html](http://www.meti.go.jp/policy/chemical_management/other/nano_program.html)

(サ)酸化アルミニウム

(i) 製品概要

サイズ	0.1~0.2 $\mu$ m			
形状	単粒子			
計測技術	SEM、TEM			
物性	(高純度アルミナ)			
	グレード	TM-DA	TM-DAR	TM-5D
	結晶形	$\alpha$ -アルミナ	$\alpha$ -アルミナ	$\alpha$ -アルミナ
	BET 比表面積 (m <sup>2</sup> /g)	13.5	14.5	9
	1次粒子径 ( $\mu$ m)	0.1	0.1	0.2
	静嵩密度 (g/cm <sup>3</sup> )	0.8	0.9	0.8
	タップ密度 (g/cm <sup>3</sup> )	0.9	1	0.8
	成形密度 (g/cm <sup>3</sup> )	2.2	2.3	2.3
	焼結密度 (g/cm <sup>3</sup> )	3.95	3.96	3.93
出典: 大明化学工業ホームページ <a href="http://www.taimei-chem.co.jp/product/07.html">http://www.taimei-chem.co.jp/product/07.html</a>				
性能/特性	・ 低温(1250 $^{\circ}$ C~1300 $^{\circ}$ C)の焼成で理論密度の98%以上まで緻密化する。 ・ 高強度、高硬度、耐摩耗性および耐蝕性に優れたセラミックスとなる			
製造会社	【国内】 ・ 多木化学株式会社: 酸化アルミニウム分散液(アルミナゾル バイラー)			

	ル) を製造、販売 ・ 日揮触媒化成株式会社：アルミナ粒子の水分散ゾル Cataloid を製造、販売 ・ 大明化学工業株式会社：各種 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 微粒子を製造、販売 ・ 日産化学工業株式会社 <b>【海外】</b> ・ NANOSYS Inc. (USA) 出典：ナノ粒子応用研究会ホームページ <a href="https://www.nanoparticle.jp/nanoparticles-infomation/metal-oxide-nanoparticles/al2o3-nanoparticles/">https://www.nanoparticle.jp/nanoparticles-infomation/metal-oxide-nanoparticles/al2o3-nanoparticles/</a>
--	--

(ii) 市場規模

ナノ粒子については研究開発段階であり、量産化は未だなされていない。

(iii) 主な用途

- ・光透過性の耐摩耗性コーティング
- ・ナノ構造改質剤
- ・超高性能フィルター材料
- ・触媒担体

(iv) 研究開発事例

①耐熱性に優れ、光をよく反射する断熱アルミナ膜を開発－真珠に似た積層構造によって光を反射－

開発者：産業技術総合研究所化学プロセス研究部門膜分離プロセス研究グループ主任研究員 小平 哲也、客員研究員水上 富士夫

開発機構：産業技術総合研究所、川研ファインケミカル株式会社

概要：国立研究開発法人 産業技術総合研究所(以下「産総研」)化学プロセス研究部門膜分離プロセス研究グループ小平 哲也 主任研究員、水上 富士夫 客員研究員は、川研ファインケミカル株式会社(以下「川研」)と共同で、高い断熱性能と可視光～近赤外領域にて光反射率 70 %以上を併せ持つ銀色の高耐熱性アルミナ膜を開発した。

この膜は 1000 °Cの耐熱性と同時に光反射能力を有するアルミナ多孔質膜であり、アルミナナノファイバー(太さ約 6 nm、長さ約 3000 nm)のゾル溶液にアンモニアを加えて乾燥させるという簡単な方法により調製可能である点も特徴であり、さまざまな応用分野への展開が期待される。

出典：産総研ホームページ(2015/08/26 掲載)

[http://www.aist.go.jp/aist\\_j/press\\_release/pr2015/pr20150826/pr20150826.html](http://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2015/pr20150826/pr20150826.html)

②アルミニウムのナノ構造体で「色」を作る－半永久的に失われず塗料より軽い「メタマテリアル・カラー」－

開発者：理化学研究所 田中メタマテリアル研究室 主任研究員 田中拓男、国際特別研究員レニルクマール・ムダチャディ

開発機構：理化学研究所

概要：理化学研究所(理研)田中メタマテリアル研究室の田中拓男主任研究員(光量子工学研究領域フォトン操作機能研究チーム チームリーダー)、レニルクマール・ムダチャディ国際特別研究員の研究チームは、アルミニウム薄膜で作った「メタマテリアル」で、可視光全域をカバーする「色」を作り出すことに成功した。光の波長よりも小さいナノメートル(nm、1nm は 10 億分の 1m)サイズの構造体(以下、ナノ構造)を大量に集積化して自然界の物質では実現できない光学特性を持たせた人工物質をメタマテリアルと呼ぶ。ヒトの目は捉える光の波長の違いによって色を区別するので、ナノ構造の大きさや形を変えることでメタマテリアルが吸収する

光の波長を制御すれば、さまざまな色を作り出すことができる。従来のメタマテリアルでは、吸収する光の波長が一つに限定されていたり、吸収する光の波長幅が広いためパステルカラーのような彩度の低い色しか作り出せないといった課題があり、任意の色を自在に作ることはできなかった。今回、研究チームは電子ビームリソグラフィ法と真空蒸着法を用いて、シリコン基板上に厚さ150nmのポリメチルメタクリレート(PMMA)レジスト材料を塗布し、PMMA上に四角形パターンを描画後、その四角形上とそれ以外の部分に厚さ45nmのアルミニウム薄膜を塗布した。この座布団形状のナノ構造を持つメタマテリアルにより、赤色から紫色まで可視光全域をカバーする、さまざまな色を作り出すことに成功した。さらに異なる色を出す構造を混ぜると、絵の具を混ぜたときのように色が混ざり、黒色を作り出すこともできた。有機物質である絵の具やインクの色は、強い光、高温、酸化により除々に失われる。しかし、開発したメタマテリアルの表面は比較的安定な酸化皮膜を持つアルミニウムで覆われているため、ナノ構造が破壊されない限り、半永久的に退色することはない。また、インクなどの塗料と比較すると、はるかに薄くて軽いという特徴もある。研究チームが開発した「メタマテリアル・カラー」は、高解像度ディスプレイやカメラのカラーフィルターとしての利用や、光の散乱を避けたい光学機器の内壁、大型望遠鏡内の黒色塗装などの応用が期待できる。

出典:理化学研究所ホームページ(2017/04/26 掲載)

[http://www.riken.jp/pr/press/2017/20170426\\_1/](http://www.riken.jp/pr/press/2017/20170426_1/)

### ③世界で初めてアルミナのレーザー焼結に成功

開発者:ファインセラミックスセンター木村主任研究員

開発機構:ファインセラミックスセンター

概要:セラミックスの製造では、高温で焼く工程が不可欠である。多くの場合、電気炉やガス炉を用いて、数十時間の熱処理を行う。現在、試作や小ロット製品の製造にも同程度の時間を要していることから、積層造形(3Dプリンター)を用いた短時間製造プロセスへの期待が高まっている。ファインセラミックスセンターでは、高強度のレーザーを用いる新たな製造技術の研究開発を進め、「電気炉不要の夢の製造技術」と言われてきたレーザー焼結に、世界で初めて成功した。この技術は、セラミックスの積層造形のコア技術であり、新しいセラミックス製造プロセスの実現に向けた第一歩である。

同センターの木村主任研究員らは、汎用セラミックスのひとつであるアルミナ(酸化アルミニウム)のレーザー焼結に取り組み、新たに開発した2つの要素技術(①高密度に原料アルミナ粒子が充填した層を形成する技術、②レーザー吸収の低いアルミナを高効率でレーザー加熱する技術)によって、短時間・高効率のレーザー焼結を可能にした。この技術では、10秒間のレーザー照射で厚み300ミクロンの層を焼結することができるため、将来的には現在の金属造形と同程度のスピードでセラミックスの積層造形ができると期待される。本成果は、セラミックスのレーザー直接造形を実現する画期的成果である。要素技術の高度化、対象材料の拡大を進め、新たなものづくり技術としての実用化を進めていく。

出典:ファインセラミックスセンターホームページ(2017/07/03 掲載)

[http://www.jfcc.or.jp/25\\_press/r17\\_6.html](http://www.jfcc.or.jp/25_press/r17_6.html)

### (v) 利用事例

NEDOプロジェクトでは、アルミナナノファイバースルの特徴を活かした機能性部材の検討を行い、自己組織化能を有するアルミナナノファイバースルの量産化技術を確認し、絶縁膜、遮熱膜、酵素固定化担体、低熱膨張フィルムの実現した。今後発展が見込まれるエレクトロニクス分野、環境分野への展開、省エネ分野への貢献など幅広い分野での適用を図っていくとしている。

(NEDO ホームページ <http://www.nedo.go.jp/content/100554506.pdf>)

### (vi) ナノリスク評価

現在、研究開発段階であり、ナノリスク評価に関する情報は得られなかった。

