

PRESS RELEASE

報道関係者各位

2025年12月2日

神奈川大学

日本大学

北九州市立大学

地方独立行政法人東京都立産業技術研究センター

**幅広い材料系に適用可能なナノ粒子分散基盤技術を開発
—特許技術で産業応用へ—**

神奈川大学化学生命学部 原 秀太 特別助教、池原 飛之 教授らの研究グループは、日本大学理工学部 伊掛 浩輝 教授、清水 繁 教授、北九州市立大学国際環境工学部 郡司 貴雄 准教授、地方独立行政法人東京都立産業技術研究センター 小出 優一郎 研究員らとの共同研究により、幅広い材料系に適用可能なナノ粒子分散基盤技術の開発に成功しました。ナノ粒子は、光学、電子、触媒、医療など幅広い分野で不可欠な機能性材料として注目されていますが、均一に分散させることが大きな課題となっており、従来の分散技術では個別の材料に限定されていました。本研究で開発した新規分散剤 TPC (tributyl(3-((3,4-dihydroxyphenylamino)-3-oxopropyl)phosphonium chloride) は「幅広い溶媒・多様なポリマー」に適用可能で、さらにアニオン交換^(注1)による自在な設計が可能となるため、共通基盤(プラットフォーム)^(注2)として機能することが期待されます。なお、本共同研究には神奈川大学、日本大学の大学院生も参加しており、研究の遂行にあたって大きな貢献がありました。本研究成果は、2025年11月26日付で Nature Portfolio が刊行する国際科学誌「Communications Chemistry」に掲載されました。

今後の展開について、本技術は特許を取得しており^(注3)、学術的成果だけに留まらず、幅広い産業に広がる可能性があります。既に神奈川大学と化学系製造業を中心にメーカ 6 社と MTA (Material Transfer Agreement: 有体物譲渡契約) を締結し、TPC の産業利用の実現に向けた調査・検討が始まっており、内 1 社とは社会実装に向けた共同研究を進めるなど産業界への応用を見据えています。

研究成果のポイント

- 幅広い溶媒・多様なポリマー系に適用可能な新規低分子分散剤(TPC)を開発
- アニオン交換により分散特性を自在にチューニング可能
- 高い再現性とリサイクル耐性を有する分散技術
- 産業応用に向けて、既にメーカとの MTA 締結や社会実装に向けた共同研究を開始

社会的インパクト

- 次世代通信・半導体デバイスへの展開
低誘電損失・高熱伝導性のナノコンポジット設計が可能となり、5G/6G 通信やパワーデバイスの信頼性向上に貢献。
- 自動車・建設・エネルギー分野での応用

高透明・高強度材料として、軽量構造材や窓材への応用が期待されるほか、電気触媒電極や熱伝導シートとしても展開可能。

●リサイクル可能なサステナブル材料開発の促進

分散状態を保ったまま再成形可能なことから、樹脂製品の再資源化技術としても社会的意義が大きい。

研究の背景

ナノ粒子は、光学、電子、触媒、医療など幅広い分野で不可欠な機能性材料として注目されています。例えば、酸化チタンや酸化亜鉛は光触媒・紫外線遮蔽材として、また、クレイやカルシウムカーボネートは補強材として広く利用されてきました。しかし、これらのナノ粒子は表面自由エネルギーが高いため凝集しやすく、均一に分散させることが大きな技術課題となっていました。

また、従来の分散剤は、特定の溶媒や高分子にしか適用できず、材料ごとに個別の条件設定が必要でした。このため研究や製造・生産を担う産業界では「広範に使える分散剤」の開発が待望されていました。また、リサイクルや再加工の過程で分散性が損なわれることも課題であり、持続可能な材料開発の観点からも革新的な分散技術が必要とされていました。

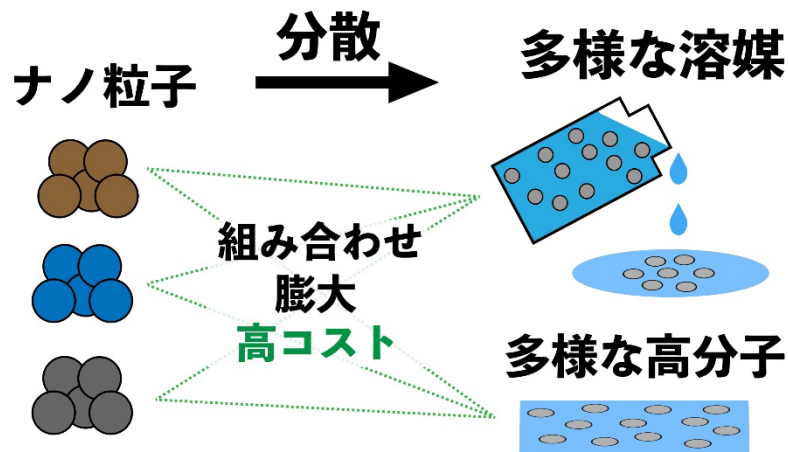


図1 ナノ粒子の産業プロセスの課題
ナノ粒子と分散媒体の組み合わせが膨大

研究の内容

カテコール基による強吸着性とホスホニウムカチオンによる高い親和性を一体化し、アニオン交換で自在に設計できる分散剤を実現した点に、本研究の革新性があります。

本研究では、カテコール基とホスホニウムカチオンを有機的に統合した新規低分子分散剤 TPC (tributyl(3-((3,4-dihydroxyphenylamino)-3-oxopropyl)phosphonium chloride)を開発しました。

TPC は、カテコール基による強固な無機表面吸着能と、ホスホニウムカチオンによる高い溶媒・ポリマー親和性を併せ持つ特徴があります。この分子設計により、ナノ粒子の凝集を防ぎ、広範な系で安定した分散状態を維持できます。

■ 溶媒・ナノ粒子適合性

ビーズミル処理を施すことで TPC で表面修飾した TiO_2 、 Fe_2O_3 、 ZnO ナノ粒子を各種有機溶媒（クロロホルム、メチルエチルケトン、アセトン、メタノール、ジメチルホルムアミドなど）に分散させた結果、極性・誘電率の異なる多種の溶媒においても粒径の変化が小さく、高い安定性を示しました（図2左）。

特に、TiO₂や Fe₂O₃では凝集体形成が抑制され、動的光散乱 (DLS) 測定で平均粒径約 30~40 nm の均一分散が得られました。これにより、TPC が多様な溶媒環境に対応するユニバーサルな分散剤であることが実証されました。

■ ポリマー適合性と界面制御

TPC 修飾ナノ粒子は、スチレン・ブタジエンゴム (SBR)、ポリ乳酸 (PLLA および PDLLA)、ポリ(2-ヒドロキシエチルメタクリレート) (PHEMA) など、化学構造・極性が異なる多種のポリマーにも安定した分散が可能であることがわかりました (図2中央)。

透過型電子顕微鏡 (TEM) 観察ではいずれも凝集が見られず、動的粘弾性 (DMA) 測定および引張試験から、ナノ粒子とマトリクスとの界面相互作用の強化が確認されました。

特に PHEMA 系では、TPC 修飾ナノ粒子を添加した後に光重合開始剤を用いてモノマーの光反応を促すことで、高い透明性を保ちながら優れた材料強度を示しました。この結果は、光重合過程においても TPC が界面で安定に機能し、光硬化型複合材料への適用の可能性を示しています。

■ リサイクル性の実証

PDLLA をマトリクスとした TPC 修飾ナノ粒子フィルムでは、再溶解・再成膜 (recasting) 後も均一分散状態を保持し (図2右)、初回リサイクル後も引張強度や破断伸びなどの機械特性がほぼ維持されました。

この結果は、ホスホニウムカチオンがポリエステル界面と非共有結合でありながら強固な物理的相互作用を形成していることを示唆しています。したがって、TPC はリサイクル工程にも耐える持続可能な分散技術として機能することが期待できます。

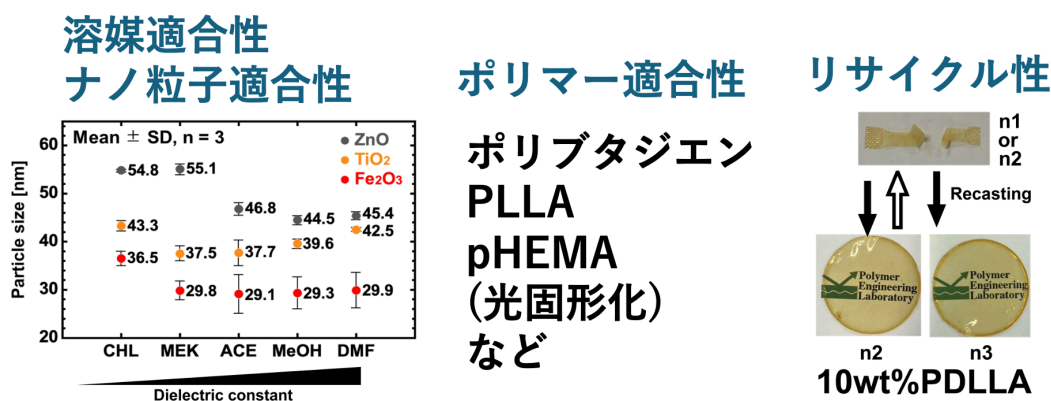


図 2 多様な分散媒体
開発コストを削減

今後の研究の展開

本研究で開発した TPC 分散剤は、「幅広い溶媒・多様なポリマー」に適用可能であり、アニオン交換により分散特性を自在に設計できることから、ナノ粒子分散の共通基盤 (プラットフォーム) として高い拡張性を有しています。

今後は、この基盤技術をもとに、以下の新たな材料展開を進めていきます。

● 成形プロセスの拡張

TPC 修飾ナノ粒子を繊維形成プロセス (静電紡糸や延伸) に組み込むことで、界面での応力伝達を制御し、導電・高電圧耐性・熱伝導性を兼ね備えた複合ナノファイバーの創出を目指します。

● 熱伝導性・誘電特性の精密設計

TPC 分散剤のアニオン骨格を調整することで、界面熱抵抗の低減や誘電損失の抑制が可能となり、ポリマー系放熱シートや高周波デバイス材料など、次世代通信・半導体分野に適したハイブリッド材料の開発へとつながります。

● ナノ粒子複合化による多機能化^{(注3)(2)}

TPCで被覆された粒子を他種ナノ粒子の分散核として利用することで、導電性・磁性・光学特性などの異なる機能を同時に発現させることが可能となります。このアプローチにより、分散と複合を一体とした“自己組織化型ナノコンポジット”の設計を進めていきます。

掲載論文

本研究成果は、2025年11月26日、Nature Portfolio が刊行する国際科学誌「*Communications Chemistry*」に掲載されました。

題名: Versatile Phosphonium-Catechol Dispersant for Inorganic Nanoparticle Stability across Diverse Media and Manufacturing Processes

著者名: Shuta Hara, Keiya Kawamura, Atsushi Furukawa, Yuumi Takeoka, Yuichiro Koide, Keisuke Fukasawa, Genza Sanae, Hiroyuki Hirata, Takao Gunji, Hiroki Ikake, Takayuki Ikehara, Shigeru Shimizu

掲載誌: *Communications Chemistry*

掲載 URL: <https://doi.org/10.1038/s42004-025-01761-2>

謝辞

地方独立行政法人神奈川県立産業技術総合研究所 令和6年度神奈川県まち・ひと・しごと創生基金科学技術政策大綱推進事業、日本学術振興会 科学研究費助成事業(基盤研究C): 課題番号 JP25K08294 の支援を受けています。

関連特許^(注3)

(1) 特許 6736121 号: 「化合物, 分散剤, 複合体, 分散液, および複合体の製造方法」

発明者: 原 秀太, 伊掛 浩輝, 清水 繁(日本大学)

(2) 特願 2023-039180: 「分散剤、それにより表面修飾された複合体及び磁性複合体、並びに分散液」

発明者: 原 秀太, 池原 飛之(神奈川大学)

【用語解説】

(注1) アニオン交換(anion exchange)

分散剤 TPC(トリブチルホスホニウムカテコール)は、分子内のホスホニウムカチオン(陽イオン)部分に任意の陰イオン(アニオン)を組み入れることができます。この「アニオン交換」により、分散剤の性質を自在に変化させることが可能です。

例えば、親水性アニオンを導入すれば水系分散液を、高分子親和性の高いアニオンを導入すれば有機樹脂中での分散性を高められます。これにより、材料や溶媒ごとに分散剤を作り分ける必要がなくなり、1種類の基本骨格で多様な環境に対応できるのが大きな特徴です。

(注2) ナノ粒子分散の共通基盤(プラットフォーム)

従来の分散剤は特定の溶媒やポリマーにしか適さず、研究・製造のたびに条件を個別に最適化する必要がありました。本研究の TPC は、酸化チタンや酸化鉄などさまざまなナノ粒子を、クロロホルムやメタノールなど極性の異なる溶媒においても安定した分散が可能です。さらに、ポリ乳酸(PLLA・PDLLA)や PHEMA といったバイオ系・光硬化性ポリマーにも対応するため、次世代の材料開発を加速させる“分散の共通言語”として機能することが期待できます。

【研究に関すること】

神奈川県大学化学生命学部 特別助教 原 秀太(はら しゅうた)

TEL:045-481-5661

E-mail:ft102160vg@kanagawa-u.ac.jp

【報道に関すること】

神奈川県大学企画政策部 広報課

TEL:045-481-5661

E-mail:kohou-info@kanagawa-u.ac.jp

日本大学工学部 庶務課

TEL:03-3259-0514

E-mail:cst.koho@nihon-u.ac.jp

北九州市立大学企画管理課 企画・研究支援係

TEL:093-695-3311

E-mail:kikaku-info@kitakyu-u.ac.jp