



産業用高機能化微粒子および界面活性剤の界面工学

Interfacial Engineering of Particulate & Surfactant Systems for Enhanced Performance in Industrial Applications

ブリジ M. モーギル

Brij M. MOUDGIL

フロリダ大学材料科学工学科, 微粒子・界面活性剤システム研究センター (CPaSS) 特別教授
Distinguished Professor, NSF IUCRC Center for Particulate and Surfactant Systems (CPaSS),
Department of Materials Science and Engineering, University of Florida, USA

藤 正督*

Masayoshi FUJI

名古屋工業大学工学研究科 教授
Professor, Graduate School of Engineering, Nagoya Institute of Technology, JAPAN

抄 録

微粒子および界面活性剤は、エネルギー・鉱物、製薬、農業・食品、マイクロエレクトロニクス、ヘルスケア、化粧品、消費者向け製品、分析計測の装置およびサービスなど、あらゆる主要産業において、プロセスや製造ラインに不可欠である。多くの応用において、表面特性とサスペンションの挙動が製品とプロセスの仕様を決定し、これは粒子と分子間の相乗的または競争的な相互作用に依存する。私たちの研究努力の第一の目標は、革新的で環境に優しく持続可能な製品とプロセスを開発するための企業向けの知識と技術的なプラットフォームを産み出す事である。表面、粒子、自己組織化界面活性剤システムの物理化学的および機械的特性の制御は、産業用途で、その性能を設計または向上させることにつながる。具体的には、粒子間のナノおよび原子スケールでの相互作用力の理解と制御および機能性粒子の合成は、生物医学、国土安全保障、防衛、先進材料、センサー、コーティング技術におけるターゲットを絞った貢献の基礎となる。このレビューでは、幾つかの厳選されたプロジェクトの概要を示した。詳細はこの原稿の最後に示した参考文献を参照して頂きたい。

ABSTRACT

Particulate and surfactant systems are an integral part, either in processing or product lines, in essentially every major industry, including Energy and Minerals, Pharmaceutical, Agriculture & Food, Microelectronics, Healthcare, Cosmetics, Consumer Products, and Analytical Instrumentation & Services. In most applications, surface properties and suspension behavior govern the product and process specifications and depend on the synergistic or competitive interactions between the particles and reagent schemes. The primary goal of our research efforts has been to generate the knowledge and technology platforms for industry to develop innovative and greener and more sustainable products and processes. Control of the physicochemical/mechanical properties of surfaces, particles, and self-assembling surfactant systems is attempted to engineer or enhance their performance in industrial applications. Specifically, understanding and control of nano and atomic scale forces between particles, and synthesis of functionalized particles form the foundation for targeted contributions in biomedical, homeland security, defense, advanced materials, sensor, and coating technologies. A synopsis of select projects is presented in this brief review. Additional details can be found in the topic-specific references listed at the end of this manuscript.

*本論文は、Prof. Moudgil の英文原稿が、藤教授によって日本語に翻訳されたものです。

1 はじめに

ここ数十年、フロリダ大学 (UF) 粒子工学研究センター (PERC) および粒子および界面活性剤システムセンター (CPaSS—アメリカ国立科学財団産学共同研究センター) での研究テーマは、先端材料および鉱物、ヘルスケア、マイクロエレクトロニクス、製薬、農業および消費者向け製品における微粒子および界面活性剤システムの性能向上を達成することに焦点を当ててきた。ほとんどの研究プロジェクトでは、粒子表面や懸濁液中の粒子間の表面力の制御および粒子の機能化が、分離、分散および凝集、コーティング技術にターゲットを絞った進歩の基礎となっている。具体的には、ポリマー、界面活性剤、粒子系の相互作用を支配する力の基本的な理解が、業界パートナーによる製品およびプロセスの革新に結実している。

2 主な研究成果の概要

2.1 分散と凝集 — 科学と技術

化学機械研磨 (CMP) スラリーの性能を最適化する取り組みでは、粒子と表面の間のせん断力と法線応力を互いに独立して制御し、欠陥を最小限に抑え最大の材料除去率を達成しなければならないことを初めて明らかにした (Basim et al., 2003)。さらに、様々なウエハー成分に対する界面活性剤の選択的吸着、および界面での自己組織化界面活性剤構造の機械的特性の理論的根拠および実験的検証 (Rabinovich et al., 2004) は、後に UF からのスピノフカンパニーによって製品化された選択的研磨スラリー処方基礎を築いた。さらに、これらの所見は、コロイド懸濁液の最適な脱水のための粒子状凝集体 (flocs) の構造を制御するための試薬戦略、および晶癖修制御添加剤のガイドラインの策定にも役立った。

ナノスケールの粗さの面合成とナノスケールの粗さと湿度が粒子間の力に及ぼす影響をモデル化により、乾燥した微粒子製品の凝集・分散・除塵に関する新たな洞察が得られた (Rabinovich et al., 2002)。

2.2 がんの検出と治療の為に多機能造影剤

低コストな手法で癌を早期に検出する方法の開発

には依然として高いニーズがある。そのためには、患者の安全性を損なうことなく、高い解像度と感度が得られるツールが必要である。多くの場合、早期かつ正確な検出を可能にするためには、補完的な画像診断法から得られるデータが必要である。現在、コンピュータ断層撮影 (CT)、陽電子放出断層撮影 (PET)、磁気共鳴画像法 (MRI)、超音波などの技術が採用されており、検出限界、空間的・時間的分解能、精度、多重露光時の長期安全性が異なっている。しかし、これらの方法は、いずれも単独で使用した場合、必要な構造的・機能的情報を手頃なコストで得ることはできない。安全性の高い、多機能な造影剤を使用することで、早期発見や治療法の向上が期待されている。また、現在採用されている検出ツールの一部の深部組織イメージング機能を強化することも可能である。

これに関して、サイズが 50 nm 未満で NIR の吸収および発光特性を有する金斑点シリカナノ粒子が合成された。その一例を図 1 (Sharma et al., 2012) に示した。この粒子は画像化のためだけでなく、疾患組織のインビトロおよびインビボの光温熱アブレーションにも適していることが分かった (Sharma et al., 2010)。

2.3 ポリヒドロキシフラレン (PHF) — その新しい特性と応用

新しい現象である、ポリヒドロキシフラレン (PHF) の光点火を私たちの研究室で発見した (Krishna et al., 2010, 2016a)。この発見は、金属触媒を使用せずにカーボンナノ構造体の合成につながった (Krishna et al., 2010)。さらに、修飾されたフラレン単独、およびチタニア粒子と組み合わせた場合の新規特性は、新しい抗菌コーティング剤の処方、がん細胞の選択的切除、新しい除草剤や植物の成長など、14 件以上の発明の開示 / 特許をもたらした (Gao et al., 2011, 2016; Sharma et al., 2013; Krishna et al., 2015, 2016b)。

例えば、光触媒 TiO_2 コーティングは、従来の化学的な消毒剤に代わるより環境に優しい方法を提供することが知られている。そこで、図 2 (Krishna et al., 2018) に示すように、可視光下で微生物の光触媒分解を自己刺激する TiO_2 -PHF コーティングが開発された。 TiO_2 コーティングの効率は、結晶子の

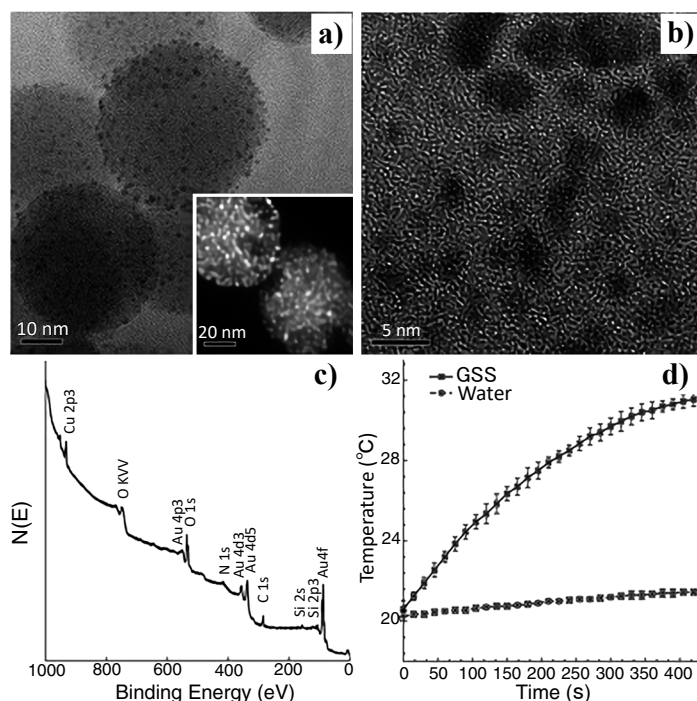


図 1 ローダミンをドーピングした金斑点シリカ (GSS: gold speckled silica) ナノ粒子の特性評価 a) ローダミンをドーピングした約 40 nm の GSS ナノ粒子の代表的な TEM 像；斑点状のシリカ表面；挿入図は Z-コントラストのデジタル TEM 像。b) 高倍率においてシリカ上に不規則な形状で不連続に配置され堆積した 1~5 nm の結晶性ナノ金。c) 代表的な XPS スペクトル d) ペグ化された GSS ナノ粒子の水懸濁液は 11°C の温度上昇 (Sharma et al., 2010)。(Royal Society of Chemistry の許可を得て転載)

Fig. 1 Characterization of rhodamine doped gold speckled silica (GSS) nanoparticles a) representative TEM image of ca. 40 nm rhodamine doped GSS nanoparticles GSS showing the speckled silica surface; inset z-contrast digital TEM; b) higher magnification showing irregular shaped, discontinuously placed, 1–5 nm crystalline nano-gold deposits on silica; c) representative XPS spectra; d) ca. 11°C increase in temperature of pegylated GSS nanoparticles in water suspension (Sharma et al., 2010). (Reprinted with permission from Royal Society of Chemistry)

サイズと性質だけでなく、表面コーティングの適用方法にも依存していた。TiO₂-ポリヒドロキシフラーレン複合体のベータテストでは、微生物の分解プロセスを大幅に促進することが判明した (Bai et al., 2012; Krishna et al., 2006, 2008, 2018; Nandakumar et al., 2017)。

2.4 作物保護の為にカオリン粘土コーティング

私たちの研究チームが最近検討しているのは、作物保護を目的とした微粒子懸濁液の応用で、特にフロリダの柑橘類産業に深刻な脅威をもたらす細菌性感染症「シトラス・グリーニング (柑橘類緑化病)」に対処するものである。CPaSS の研究チームは、フロリダ大学 IFAS (University of Florida Institute of Food and Agricultural Sciences) の研究者と協力して、フロリダ州レイクアルフレッドにある CREC (Citrus

Research and Education Center) の学内および学外の研究者と共同研究を行った。着色された粘土のコーティングとエッセンシャルオイルのナノエマルジョンが柑橘類緑化病を軽減することを発見した (Narayanan et al., 2012; Sharma et al., 2015, 2018)。

2.5 臭気制御の科学と技術

業界のパートナーが直面していたスケールアップの課題を解決するために、ナノ銅を含浸させた多孔質シリカ粒子を調査した。その結果、銅触媒ナノ粒子の化学組成だけでなく、付着物の形態が製品の最適な臭気制御特性を達成するために重要な役割を果たすことが判明した。(Singh et al., 2010)。

2.6 粒子による皮膚からの微生物除去

このプロジェクトの主な目的は、「ノンキル (non-

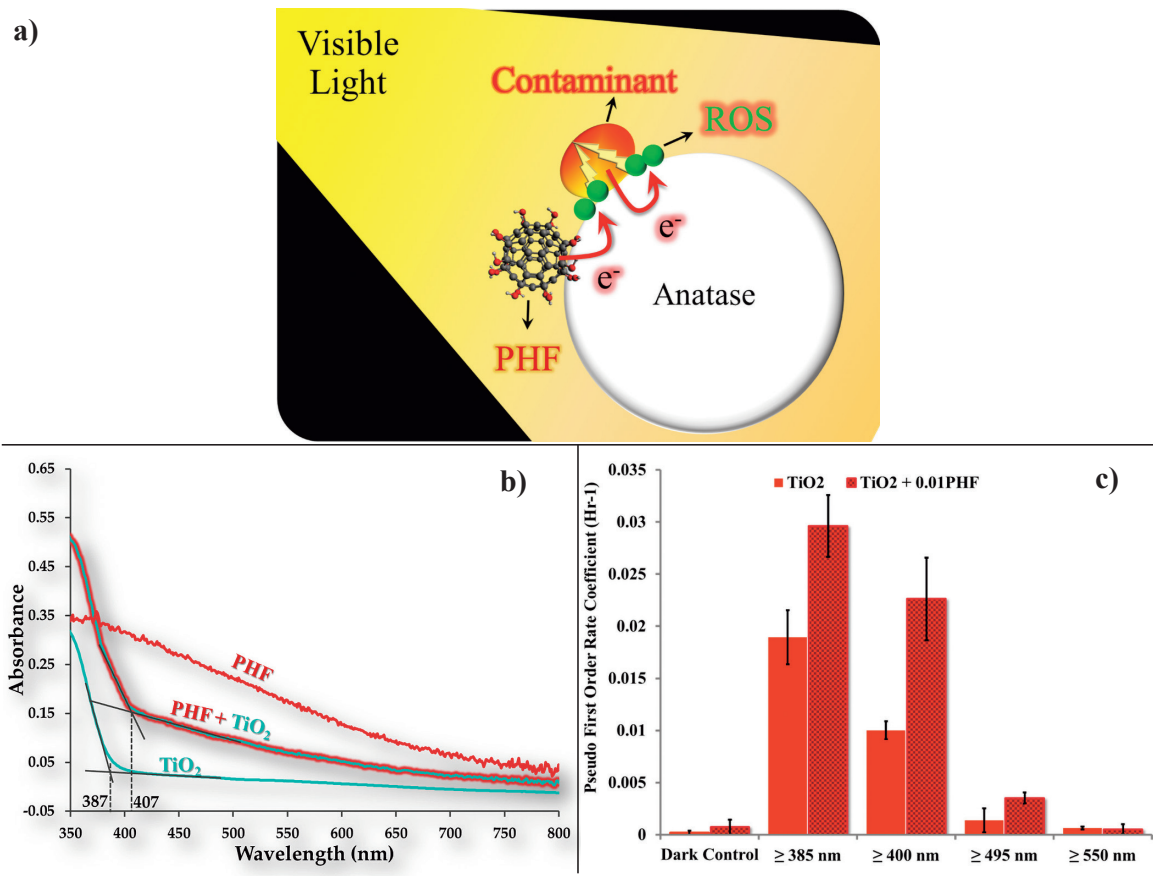


図 2 汚染物質活性化光触媒。a) PHF を補助的なライトハーベスターとした微生物による無機化の模式図。b) アナターゼ (TiO₂), ポリヒドロキシフラーレン (PHF), および PHF+TiO₂ の基底状態吸収スペクトル。c) アナターゼ (TiO₂) およびアナターゼ +0.01 (w/w) PHF (TiO₂+0.01PHF) コーティング上のモルダントオレンジ色素の分解に対する疑似一次速度係数。ダークコントロールは、光触媒コーティングが暗闇で染料を分解する能力を測定する。N=10 (Nature of the Scientific Report から許可を得て転載)

Fig. 2 Contaminant-activated photocatalysis. a) schematic of microbial mineralization with PHF as auxiliary light harvester. b) Ground state absorption spectra for anatase (TiO₂), polyhydroxy fullerenes (PHF), and PHF+TiO₂. c) Pseudo first-order rate coefficients for degradation of Mordant Orange dye on anatase (TiO₂) and anatase+0.01 (w/w) PHF (TiO₂+0.01PHF) coatings. Dark control measures the ability of the photocatalytic coatings to degrade dye in the dark. N=10 (Reprinted with permission from Scientific Report, Nature)

kill)」ベースの強化された手洗い方法を開発することであった。この点に関して、我々は、機能化した粒子は、石鹼分子だけよりもより効率的に表面から細菌を取り除くことができるという仮説に着目した。正電荷を帯びた粒子を皮膚に付着した細菌除去率が大幅に向上することが確認された (Nandakumar, 2018)。

2.7 腐食抑制のための界面活性剤コーティング

金属構造物、パイプライン、ボイラー、その他の産業機器の腐食は、世界的に大きな課題となってい

る。NACE International やその他の情報源によると、米国だけでも腐食による産業への影響は年間 5,000 億ドルを超えると推定される。長年にわたり、腐食防止戦略は、新しい材料の設計、腐食性元素との接触の最小化、保護コーティングの適用などが行われてきた。石油や水の輸送パイプラインでは、有機系腐食防止剤の使用がごく一般的である。一般的に最も効果的な有機インヒビターは、O, N, S, π 結合などのヘテロ原子で構成されており、金属表面に付着することができる (Bockris et al., 2000)。腐食防止剤 (CI) の具体的な化学的性質は、環境 (イオンの性質, pH, 温度など) に依存する。有機系の腐

食防止剤，特に界面活性剤は，界面で自己組織化膜を形成する能力があるため，最も効果的な腐食防止剤の一つであると報告されている (Fuchs-Godec, 2009; Zhu et al., 2016, 2017)。これらのバリア構造は，腐食の原因となるイオン種の表面への出入りの輸送を阻害する。しかし，界面活性剤による腐食抑制メカニズムの理解は完全には確立されていない。そこで，最近完了した研究の主な目的の1つは，腐食抑制メカニズムの理解を深めるために，鋼の表面に形成された界面活性剤の膜の特性を明らかにすることであった。腐食抑制における2つの重要な寄与，すなわち物理的バリア（鎖間の疎水性相互作用）と電気化学的バリア（表面との頭部基の相互作用）の役割を明確にする試みがなされた。その結果，電気化学的効果に加えて，界面活性剤分子の鎖間相互作用による物理的バリアがバリアフィルムを決定する上で重要な役割を果たしていることがわかった。炭化水素の鎖長特性は，界面活性剤分子が金属-水界面に分配される駆動力（表面被覆率）を支配するだけでなく，その吸着パッキング密度，ひいては腐食原因種の界面への，あるいは界面からの輸送に対する全体的なバリアを支配していた。

2.8 界面活性剤および高分子添加剤によるスケール形成の抑制

いくつかの産業プロセスでは，処理装置の内外での鉱物の結晶化や「スケール」の形成が悪影響を及ぼしている。例えば，肥料用のリン酸製造，海水淡水化プラント，ボイラー，水処理施設などである。スケールが付着すると，プロセス効率が著しく低下するため，頻繁に洗浄する必要があり，コストがかかる。リン酸製造では，52~55 wt% P_2O_5 のリン酸を得るために多段式蒸発器が多用されている。濃縮されたリン酸は，硫酸カルシウムやその他のスケール形成成分で過飽和状態になり，管壁に沿ってスケールが形成される。厚い堆積物はシステムの出力を低下させ，効率を維持するためには頻繁に堆積物除去が必要である (Carr et al., 2014)。薄いスケールが付着するだけでも，熱伝導の大きな抵抗となる。過去数十年にわたり，スケール形成を完全になくすることはできなくても，少なくともスケール形成を遅らせることができるような添加剤を特定する試みが続けられてきた。リン酸製造におけるスケール低減

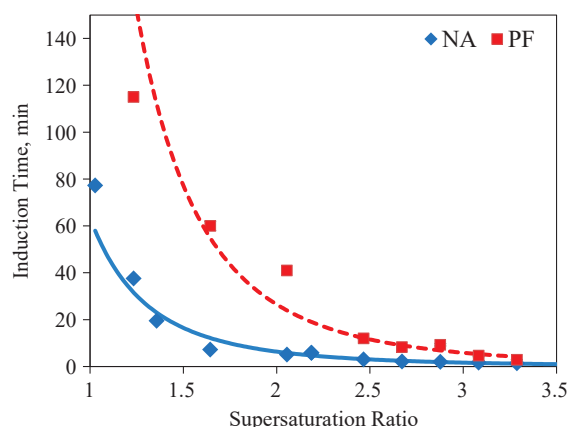


図3 過飽和度の関数としての誘導時間に対する PhosFlow (PF) の効果。(Canadian Journal of Chemical Engineering の許可を得て転載)

Fig. 3 Effect of PhosFlow (PF) on the induction time as a function of supersaturation ratio. (Reprinted with permission from Canadian Journal of Chemical Engineering)

の取り組みは，臨界核の発生を阻止したり，硫酸カルシウム結晶の成長を遅らせたりする水溶性の阻害剤の使用に焦点を当ててきた。さまざまな添加剤のアンチカラーリング特性についてはいくつかの理論が提案されているが，プラント規模で安定して性能を発揮できる抑制剤の選択は非常に限られている。ソルベイ社の研究者は，過去10年以上にわたり，Phosflow® (PF) というスケール防止技術を開発・実証し，湿式リン酸製造プラントにおけるファウリングの問題を大幅に軽減することを報告してきた (Carr et al., 2014)。PFの添加により，図3 (Tanquero et al., 2021) に示すように誘導時間が長くなり，核生成のための表面自由エネルギーが減少し，半水和物結晶が安定することで石膏結晶の成長が遅れることが確認された (Carr et al., 2014; Tanquero et al., 2021; Zhang et al., 2015)。

2.9 金ナノ微粒子の合成

粒子径分布が非常に狭い粒子，特に金属ナノ粒子（金や銀など）は，先進的なセンサーの開発，毒性評価のための標準物質，粒度測定器の校正用標準物質として必要である。しかし，このような粒子の商業的な応用は，コストが高いために制限されている。狭いサイズの金ナノ粒子 (AuNP) は，1万ドル/gにもなる。高コストの主な理由の1つは，バッチ生

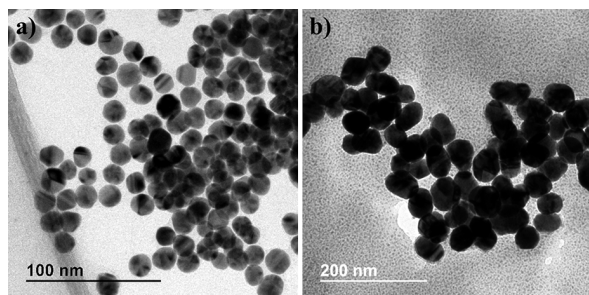


図4 Turkevich法で合成した金ナノ粒子のTEM像。平均粒径はa) 15 nm, b) 50 nm。(著者の許可を得て転載)

Fig. 4 TEM images of gold nanoparticles synthesized using the Turkevich method. The mean particle size is a) 15 nm, b) 50 nm. (Reprinted with permission from the authors)

産であるため、一般的にサイズ分離を何度も繰り返すことが必要であることである。このプロジェクトの目的は、金、銀、その他の金属粒子をコスト効率よく大量に製造するために、スケールアップ可能な連続製造技術を開発することである。直径15 nmから50 nmの金ナノ粒子 (AuNP) をTurkevich法を用いて合成した。代表的な2枚のTEM画像を図4 (Dong et al., 2020) に示した。平均粒径, 粒子径分布, および形態は, 紫外可視分光法, 動的光散乱法 (DLS) および透過型電子顕微鏡 (TEM) によって評価した。化学組成は, XPS, FT-IR, ICP-MS Spectrometry で分析した。

ナノ粒子の精度, すなわち粒子径分布は, 多分散性指数 (PDI) を用いて定量化した (ISO13321, 1996)。シングルフローリアクターを用いて狭いサイズの金および銀のナノ粒子を再現する試みは, 主にリアクターのファウリングが原因で失敗に終わった。ファウリングを克服するための試みにより, リアクターの表面に核が堆積し, その後成長することが原因であることがわかった。これは, 反応流体が完全に混合される前に高い反応速度で安定した核が形成されたためと考えられた。

この問題を解決するために提案された技術の1つが, 二相或いは二相流リアクターの設計であった。この反応器では, 反応器の表面 (パーフルオロアルコキシあるいはPFA) をどれだけ濡らすことができるかを基準に連続流体を選択した。不連続相は, 完全に混合された反応物を連続相に分散した液滴とし

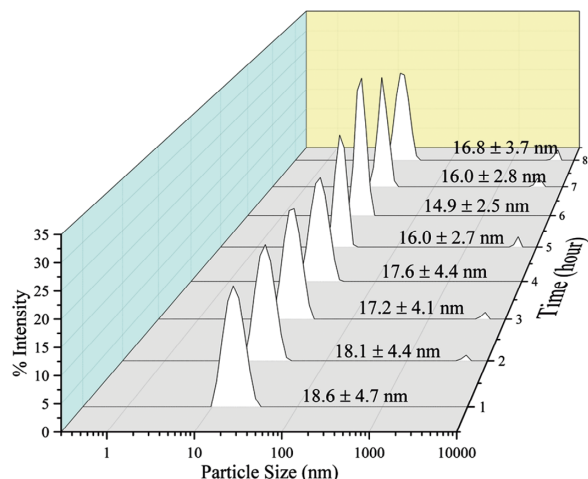


図5 液-液二相流反応器を用いて合成した金ナノ粒子サンプルの粒子径と粒度分布のDLS測定。(著者の許可を得て転載)

Fig. 5 DLS measurements of particle size and size distribution of gold nanoparticle samples synthesized using liquid-liquid biphasic flow reactor. (Reprinted with permission from the authors)

て含んでいる。AuNPの合成では, 連続相としてシリコンオイルを選択し, 塩化金 (HAuCl_4) とクエン酸三ナトリウム ($\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7$) を2つの水性反応物として使用した。この方法は, ファウリングの問題を克服しただけでなく, 図5に示すように, 金やその他の金属のナノ粒子をより大量に生産するためのスケールアップの可能性も秘めている (Dong et al., 2021)。

3 おわりに

私たちが進めた研究の主なテーマは, 先端材料・鉱物, マイクロエレクトロニクス, バイオメディカル, ヘルスケア, センサー, などが関連する応用分野において, 高性能化のためのナノ構造の微粒子システムの開発である。これは, 添加物の有無にかかわらず, 粒子間のナノ・原子スケールの力を操作することで達成される。

4 謝辞

米国科学財団微粒子・界面活性剤システム研究センター (CPaSS: Center of Particulate and Surfactant Science) および業界関係者の財政的支援に謝意を

表します。本資料に記載されている意見、発見、結論または推奨事項は、著者の見解であり、米国科学財団またはCPaSS業界メンバーの見解を必ずしも反映したものではない。

References

- Bai W., Krishna V., Wang J., Moudgil B., Koopman B., Enhancement of nano titanium dioxide photocatalysis in transparent coatings by polyhydroxy fullerene, *Applied Catalysis B: Environmental*, 125 (2012) 128–135. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2012.05.026>
- Basim G.B., Vakarelski I.U., Moudgil B.M., Role of interaction forces in controlling the stability and polishing performance of CMP slurries, *Journal of Colloid and Interface Science*, 263 (2003) 506–515. [https://doi.org/10.1016/S0021-9797\(03\)00201-7](https://doi.org/10.1016/S0021-9797(03)00201-7)
- Bockris J.O'M., Reddy A.K.N., Gamboa-Aldeco M.E., *Modern Electrochemistry 2A-Fundamentals of Electrode Processes*, Springer New York LLC, 2000, ISBN: 9780306461675. <https://doi.org/10.1007/b113922>
- Carr J., Zhang L., Davis M., Ravishanker S.A., Flieg G., Scale controlling chemical additives for phosphoric acid production plants, *Procedia Engineering*, 83 (2014) 233–242. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.09.043>
- Dong J., Carpinone P.L., Pyrgiotakis G., Demokritou P., Moudgil B.M., Synthesis of precision gold nanoparticles using Turkevich method, *KONA Powder and Particle Journal*, 37 (2020) 224–232. <https://doi.org/10.14356/kona.2020011>
- Dong J., Lau J., Svoronos S.A., Moudgil B.M., Continuous synthesis of precision gold nanoparticles using a flow reactor, *KONA Powder and Particle Journal*, advpub (2021) 2022011. <https://doi.org/10.14356/kona.2022011>
- Fuchs-Godec R., Effects of surfactants and their mixtures on inhibition of the corrosion process of ferritic stainless steel, *Electrochimica Acta*, 54 (2009) 2171–2179. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2008.10.014>
- Gao J., Krishna V., Bai W., Koopman B.L., Moudgil B.M., Indeglia P.A., Folta K.M., Georgieva A.T., Functionalized fullerenes as a biomass stimulant and a life extension agent, United States Patent, (2016) US9399756B2. <https://patents.google.com/patent/US9399756B2/en>
- Gao J., Wang Y., Folta K.M., Krishna V., Bai W., Indeglia P., Georgieva A., Nakamura H., Koopman B., Moudgil B., Polyhydroxy fullerenes (fullerols or fullerlenols): Beneficial effects on growth and lifespan in diverse biological models, *PLoS ONE*, 6 (2011) 19976–19985. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0019976>
- Krishna V., Bai W., Han Z., Yano A., Thakur A., Georgieva A., Tolley K., Navarro J., Koopman B., Moudgil B., Contaminant-activated visible light photocatalysis, *Scientific Reports*, 8 (2018) 1894. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-19972-0>
- Krishna V., Moudgil B., Koopman B., Systems and methods based on radiation induced heating or ignition of functionalized fullerenes, United States Patent, (2016a) US9475028B2 <https://patents.google.com/patent/US9475028B2/en>
- Krishna V., Moudgil B.M., Koopman B.L., Functionalized fullerenes as antifungal agents, United States Patent, (2016b) US9314027B2. <https://patents.google.com/patent/US9314027B2/en>
- Krishna V., Noguchi N., Koopman B., Moudgil B., Enhancement of titanium dioxide photocatalysis by water-soluble fullerenes, *Journal of Colloid and Interface Science*, 304 (2006) 166–171. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2006.08.041>
- Krishna V., Stevens N., Koopman B., Moudgil B., Optical heating and rapid transformation of functionalized fullerenes, *Nature Nanotechnology*, 5 (2010) 330–334. <https://doi.org/10.1038/nnano.2010.35>
- Krishna V., Yanes D., Imaram W., Angerhofer A., Koopman B., Moudgil B., Mechanism of enhanced photocatalysis with polyhydroxy fullerenes, *Applied Catalysis B: Environmental*, 79 (2008) 376–381. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2007.10.020>
- Krishna V., Zawoy K., Moudgil B.M., Koopman B.L., Stevens N.I., Powers K.W., Devices for thermally induced transformations controlled by irradiation of functionalized fullerenes, United States Patent, (2015) US9011309B2. <https://patents.google.com/patent/US9011309B2/en>
- Nandakumar V., Physicochemical aspects of bacterial adhesion on surfaces and strategies to remove adhered bacteria from surfaces (Doctoral Dissertation), University of Florida, Gainesville, FL, 2018. <https://ufdc.ufl.edu/UFE0052040/00001>
- Nandakumar V., Han Z., Fritz Z., Krishna V., Koopman B., Moudgil B., Visible light photocatalytic bacterial inactivation on titanium dioxide coatings, *KONA Powder and Particle Journal*, 34 (2017) 234–240. <https://doi.org/10.14356/kona.2017011>
- Narayanan A., Sharma P., Moudgil B.M., Applications of engineered particulate systems in agriculture and food industry, *KONA Powder and Particle Journal*, 30 (2012) 221–235. <https://doi.org/10.14356/kona.2013021>
- Rabinovich Y.I., Adler J.J., Esayanur M.S., Ata A., Singh R.K., Moudgil B.M., Capillary forces between surfaces with nanoscale roughness, *Advances in Colloid and Interface Science*, 96 (2002) 213–230. [https://doi.org/10.1016/S0001-8686\(01\)00082-3](https://doi.org/10.1016/S0001-8686(01)00082-3)
- Rabinovich Y.I., Vakarelski I.U., Brown S.C., Singh P.K., Moudgil B.M., Mechanical and thermodynamic properties of surfactant aggregates at the solid–liquid interface, *Journal of Colloid and Interface Science*, 270 (2004) 29–36. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2003.09.005>
- Sharma P., Bengtsson N.E., Walter G.A., Sohn H.B., Zhou G., Iwakuma N., Zeng H., Grobmyer S.R., Scott E.W., Moudgil B.M., Gadolinium-doped silica nanoparticles

encapsulating indocyanine green for near infrared and magnetic resonance imaging, *Small*, 8 (2012) 2856–2868.
<https://doi.org/10.1002/smll.201200258>

Sharma P., Brodersen C., Rogers M., Etxeberria E., Optical and physical deterrent for preventing ACP vector attack on citrus, Citrus Research and Development Foundation (CRDF), CATP13 Proposal #860, 2015.
https://citrusrdf.org/fmuploads/860_final_report-2011-v1a-web-ar.pdf

Sharma P., Brown S.C., Singh A., Iwakuma N., Pyrgiotakis G., Krishna V., Knapik J.A., Barr K., Moudgil B.M., Grobmyer S.R., Near-infrared absorbing and luminescent gold speckled silica nanoparticles for photothermal therapy, *Journal of Materials Chemistry*, 20 (2010) 5182–5185.
<https://doi.org/10.1039/c0jm00354a>

Sharma P., Moudgil B.M., Walter G.A., Grobmyer S.R., Santra S., Jiang H., Brown S.C., Scott E.W., Zhang Q., Bengtsson N., Multimodal nanoparticles for non-invasive bio-imaging, United States Patent, (2013) US8361437B2.
<https://patents.google.com/patent/US8361437B2/en>

Sharma P., Narayanan A., Hassan E., Moudgil B.M., Engineered particulate systems for controlled release of pesticides and repellants, United States Patents, (2018) US9936692B2.

<https://patents.google.com/patent/US9936692B2/en>

Singh A., Krishna V., Angerhofer A., Do B., MacDonald G., Moudgil B., Copper coated silica nanoparticles for odor removal, *Langmuir*, 26 (2010) 15837–15844.
<https://doi.org/10.1021/la100793u>

Tanquero J.G., Abdel-Aal E.-S.A., Farinato R.S., El-Shall H., Moudgil B.M., Inhibition of calcium sulphate hemihydrate crystallization under simulated conditions of phosphoric acid evaporation, *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, (2021). <https://doi.org/10.1002/cjce.24210>

Zhang L., Carr J., Chen H.-L.T., Primary amine-containing polymers useful as scale inhibitors, United States Patent, (2018) US9902617B2.
<https://patents.google.com/patent/US9902617B2/en>

Zhu Y., Free M.L., Woollam R., Durnie W., A review of surfactants as corrosion inhibitors and associated modeling, *Progress in Materials Science*, 90 (2017) 159–223.
<https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.07.006>

Zhu Y., Free M.L., Yi G., The effects of surfactant concentration, adsorption, aggregation, and solution conditions on steel corrosion inhibition and associated modeling in aqueous media, *Corrosion Science*, 102 (2016) 233–250.
<https://doi.org/10.1016/j.corsci.2015.10.012>

著者紹介



ブリジ M. モーギル Brij M. MOUDGIL

〔経歴〕 1972年米国コロンビア大学鉱物工学修士。1981年同大工学博士取得。1981–1985 フロリダ大学材料科学・工学部 助教授, 1985年同 教授, 2004年より同 特別荣誉教授, 1994年より同大粒子工学研究センター, 2008年より同大粒子・界面活性剤システムセンター長。

〔専門〕 粒子科学, 界面工学。

近年は, 界面活性剤およびポリマーの吸着, 微粒子の分散と凝集, 表面からの微小微生物の除去, 機能化されたナノ粒子の合成, 抗スケリングおよび界面活性剤を使った腐食抑制剤, 有害微生物の光触媒分解, ナノ毒性の研究に取り組んでいる。

〔連絡先〕 bmoudgil@perc.ufl.edu

翻訳者紹介



藤 正督 Masayoshi FUJI

〔経歴〕 1991年東京都立大学大学院工学研究科修士課程修了, 同年東京都立大学工学部工業化学科助手, 2002年名古屋工業大学セラミックス基盤工学研究センター助教授, 2007年より名古屋工業大学工学研究科教授。

〔専門〕 粉体工学, 界面化学, 材料科学。

近年ではナノサイズ中空粒子および無焼成セラミックスを精力的に研究し, 基礎研究のみならずプロジェクトの支援を受け多くの製品化を果たしている。また, 2016年には合同会社F-Planを設立し, 研究成果の産業普及にも注力している。

〔連絡先〕 fuji@nitech.ac.jp