



気相法による機能性微粒子の合成： カーボンブラックから呼吸センサー

Material Synthesis by Aerosol Particle Technology: from Carbon Black to Breath Sensors

ソティリス イー プラツィニス
Sotiris E. PRATSINIS

スイス連邦工科大学プロセス工学研究所 教授

Professor, Institute of Process Engineering, Swiss Federal Institute of Technology (ETH) Zurich, SWITZERLAND

抄 録

本稿は古代中国やグーテンベルグでの聖書印刷に用いられたエアロゾル技術から、現代における商用展開の現状について解説する。近年、離散要素法および分子動力学を用いた気相中における粒子生成・成長のモデリング法の発展により、経験則に依らない気相プロセスの最適化が可能となっている。具体的には、気相中で生成する粒子の持つ漸近的な凝集構造と平衡粒度分布がプロセス設計を非常に容易している。これにより組成、サイズおよび形状が精密制御された機能性材料を火炎噴霧熱分解法により量産可能となる。すでに一部の高付加価値材料（例えば、銀ナノ粒子やカーボン被覆 Co ナノ粒子）が市販されている。一方で単原子貴金属担持触媒や呼吸分析用化学センサへの展開も期待されている。後者は、アセトン、NH₃、イソプレン、さらにはホルムアルデヒドを選択的に検知することでそれぞれ体脂肪燃焼、末期腎疾患、コレステロールや室内空気汚染の指標として有効であり、複数のセンサを組み合わせることで災害時に瓦礫の下敷きとなった人々の発見さえも可能にする。

ABSTRACT

The lecture will start with a fascinating overview of aerosol technology from ancient China and the bible printing of Gutenberg to the current manufacture of commodities. Recent advances in particle formation and growth through discrete element modeling and molecular dynamics allow now optimal process design, away from the Edisonian approaches of the past. In specific, the rapid attainment of asymptotic agglomerate structure and self-preserving size distribution by coagulation greatly facilitate process design for material synthesis. This leads to scalable synthesis of sophisticated nanoparticles with controlled composition, size and morphology by flame spray pyrolysis putting new high value products (e.g. nanosilver and carbon-coated Co nanoparticles) in the market already while several promising ones are emerging such as single atom catalysts and chemoresistive sensors for breath analysis. The latter is highlighted for highly selective monitoring of acetone, NH₃, isoprene and even formaldehyde that are tracers of body fat burning, end stage renal disease, cholesterol and indoor air pollution, respectively, while sensor arrays are assembled to sniff-out earthquake victims.

1 はじめに

気相プロセスは日常に溢れる様々な微粒子の製造に利用されている (図 1: 塗料用 TiO₂, フィラメント状 Ni など)。また今後, 様々な機能性材料の大量合成において最も有望である。一方このようなプロセスは, 健康および環境に悪影響を及ぼすスス等の大気汚染物質の発生原因でもある。このため, 気相中における粒子生成プロセスは様々な分野から関心を集めている^[1]。

既往のナノ材料に関する研究は主として, (a) ナノ構造を有する材料の合成と, (b) そのような材料を含むデバイスのアセンブリに目が向けられてきた。たとえば気相, 液相中での自己組織化, もしくは粉末の圧縮により調製されており, これらは長く身近な材料として利用されている。一方で, 現在では分析機器と計算機科学の進歩により, ナノ材料の合成法および特性評価法は飛躍を遂げている。これら新規材料を実用化するためには, 2つの大きな課題「新規材料の合成コスト」と「デバイス組立て手法の低コスト化と高信頼性化」が障壁となる。これらを解決するためには, 新規複合化材料に対して, 積み重ねてきたプロセスの理解と, その安全性に細心の注意を払うことが重要である^[2]。

現在, ナノ材料に関する研究は基礎的な側面に着目した物が大半を占める一方, プロセスの工業化を

視野に入れた研究はわずかである。例外として, 図 1 に示すような比較的単純なナノ材料では, 毎時数トン^[3]が気相プロセスにより生産されている。反応器中では非定常の混相流であり, 粒子の体積分率は 10⁻⁴~10⁻³ 程度^[3]である。また, 光ケーブル用シリコンファイバやタービブレード等の表面保護を目的としたセラミック膜は, 火炎やプラズマを用いた溶射によって合成される^[1]。

気相プロセスは粒子合成やセラミック膜生成において以下のような利点がある^[2]。

- 後処理が困難な液体の副生成物を生成しない。これは利用可能な水の量が限られる場合, 特に大きな利点となる。
- 合成した材料を捕集する際, 固気分離は固液分離と比べて容易である。
- 光ファイバの合成に代表される様に高純度の材料を得やすい。
- 特異的な形態を持つ材料の合成が可能である。
- 気相法のプロセスは, 液相法よりも合成に必要なステップ数が少ない。
- 様々な準安定相が得られるため, 新規機能性材料の開発に適している。(例: 低温 NO_x 除去用 BaCO₃ 触媒, ガスセンサ用 ε-WO₃, X線吸収・透明材料 Ta/SiO_x)
- 気相中の輸送現象 (例えば拡散) は, 液相中や固相中よりも厳密な扱いが可能であり, プロセス設計が容易である。

一方で気相プロセスはいくつかの短所 (例えばプロセスの安全性, 初期投資にかかる費用, 原料の扱い易さ)^[4]が懸念されてはいる。しかし上記の長所は, 気相プロセスによる粒子合成の研究開発を促進する大きなモチベーションとなっており, 様々な研究開発が行われてきた。

第 1 に, 気相成長法による超高純度ガラスの精密な組成制御は, 頻繁な信号増幅を必要としない光ファイバーの製造を可能とした^[5]。混合した金属ハロゲン化物の蒸発・燃焼によって, 光の透過を妨げる不純物 (例えば, Fe) が溶液中にとどまることで, 光の透過に適した高純度 SiO₂ を合成可能にし, これによって, 80 年代初期に開発された (量産に適さない) ハイテク素材とは対照的に, 光ファイバーは一般的な商品として普及している。また通流式反応器による粒子合成において, 流体と粒子の相互作用

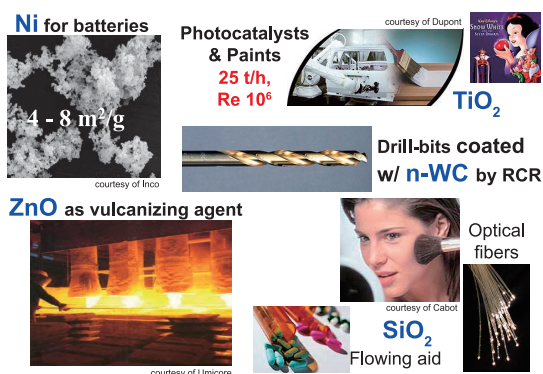


図 1 気相プロセスにより合成されている市販の機能性材料 (もっとも生産量が多いのはカーボンブラックであり, 第 2 は白色塗料用のルチル型 TiO₂ である。)

Fig. 1 Commodities made by gas-phase (aerosol) processes. (Carbon black is the largest by volume and value while rutile TiO₂ is second, the whitest of ceramics (their snowwhite).)

用が重要となるプロセス (Modified Chemical Vapor Deposition) が登場した^[6]。

第2の進歩は、これまで Ex-situ の顕微鏡観察や粒子サイズ・形態を仮定した光散乱法による測定に頼っていた、高温場における粒子成長過程の測定が、In-situ 熱泳動サンプリングにより直接観察可能になった点である^[7]。これにより予混合火炎中における TiO₂ 粒子の詳細な成長過程^[8]が解明され、またフュームドシリカの二次凝集体生成^[9]は、別々に生成した粒子同士の混合に起因することが示された。加えて、粒子形成における反応経路が決定され、詳細な Population balance を考慮したモデルと単純なモデルにより予測される粒子径の差が明らかとなった^[10]。一次粒子の生成が完了すると、単純な Monodisperse のモデルを利用して、典型的なエアロゾルプロセスの場合、得られる粒子径の誤差はわずかに 20% である。

第3の進展は、フラクタル状の粒子生成が「粒子同士の衝突」と「焼結^[11]または表面反応^[6]」のバランスによって引き起こされるという点である。したがって粒子が高温場に滞留する時間 (HTPRT, High Temperature Particle Residence Time) を制御することで、粒子の形態をフラクタル状から非凝集構造にコントロール可能である^[12]。例えば、拡散火炎中におけるシリカ粒子の HTPRT を、酸化剤流量の増加により減少させることで、よりフラクタル状の粒子形態となる^[13]。一方、純酸素を酸化剤として使用することにより (火炎温度が上昇し)、完全に球形 (フラクタル状でない) の TiO₂ 粒子が生成可能である^[14]。

第4の進展は、gas-to-particle 変換に由来する気相プロセスにおいて、気相中の粒子濃度が非常に高くなること明らかになった点である。この場合、新しく生成した粒子は (高濃度に存在する) 粒子同士の衝突により急速に成長し、粒子成長中もある一定の漸近的な粒子サイズ分布 (SPSD, Self-preserving size distribution) を維持している。加えて、衝突した粒子同士の焼結速度が十分大きくない場合、生成する粒子は特徴的なフラクタル状構造となる。この凝集体を構成する粒子の数は、凝集体のサイズに対するべき乗則によって表される。これらの2つの概念 (SPSD とべき乗則) は、粒子成長のモデル化を可能にした^[15]。また既往の流体力学との組み合わせが容易^[16]であるため、(例えば TiO₂ 生成時の) プロ

セスパラメータ (反応物濃度や混合パターン等^[17]) の影響を定量的に理解することが可能となった。これにより、粒子成長過程 (例えば粒子濃度) を追跡することができ、質量バランスを考慮することで (粒子の質量が保存される場合) 平均粒子径を推定することが可能である。この粒子径と粒子濃度に SPSPD を適用することで、完全な粒子径分布が得られる。この結果により、反応物の混合状態が変化した場合、フラクタル状のアナターゼ TiO₂ が粒子サイズが 10 倍の非フラクタル状ルチル型 TiO₂ に変化するメカニズム^[17]を定量的に説明^[16]できる。またこの事実は X 線小角散乱^[18]によって実験的に確認されている。

上述のモデル化により、プロセスパラメータと生成する新規材料の特性を関連付けることが可能である。例として、塗料用 TiO₂ のような “単純な” 製品であっても、「ルチル生成を促進する Al の添加^[20]」、「粒子凝集をコントロールする金属 (Na, K など) の添加^[20]」や「反応器管壁への粒子堆積の最小化^[21]」等の様々な要素が影響する。このような (対象が単純な物質でない) 場合、モデル化で要求される材料物性 (焼結速度等) は不明である。しかし、(純粋な TiO₂ の) モデル化により得られたデータセットとの比較により、「有意な」焼結速度が逆算でき^[22]、所要の一次粒子径および凝集状態を得るために必要なプロセスパラメータ値 (反応器温度、冷却速度および粒子濃度) の最適化が可能となる^[23]。

第5に、気相中における粒子成長過程の定量的な理解により、スケールアップ (数百 g/h^[24]) が可能となった。そして最も重要な点は、**図2**に示す火炎



図2 ETH Zurich (Pratsinis 研) での FSP 合成の様子
Fig. 2 Modern synthesis of nanoparticles by flame spray pyrolysis (FSP) in academic labs.

噴霧熱分解法 (FSP 法)^[25] の開発である。

これにより様々な前駆体を用い^[27], 用途に応じて最適な組成を有する機能性材料の合成が可能となった^[26]。

FSP 法はエアロゾルプロセスに革命をもたらし、図 3 にしめすような新規触媒^[4], 電子材料, バイオマテリアル^[26] 等の開発に多大な貢献をしている。FSP 法により合成された一部の機能性材料 (例えば, ナノ銀, カーボン被覆磁性ナノ粒子) は既に, ニッチな市場において市販されている。この結果今日では, 多くの学術機関によって FSP 法に関連する研究プロジェクトが推進されている^[6]。ドイツ国立科学財団 (DFG) では 2017 年中頃から 6 年間, FSP 関連研究を行うドイツ国内の大学に対して大型の研究費 (図 4 左側, SBB1980) を助成しており, 約 20 のプロジェクトを支援している^[6]。また 2016 年に米国国立衛生研究所 (NIH) は, 様々なサイズ, 組

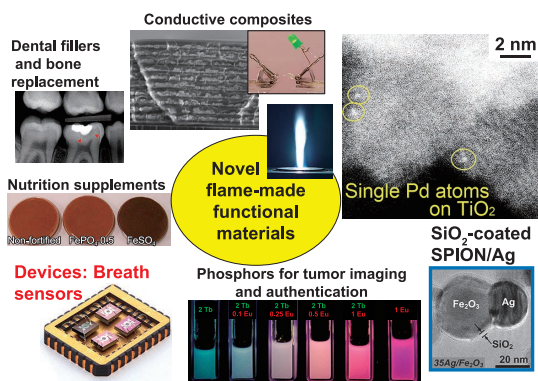


図 3 FSP 法により合成された様々な新規機能性材料^[6] (歯科治療用 X 線吸収・透明材料 (Ta_2O_5/SiO_2), 複数のコンポジット膜を重ねた多機能 (電導, 蛍光, 磁性, 殺菌性) ポリマーコンポジット, 単原子 Pd 担持 TiO_2 光触媒, 栄養剤 ($FePO_4$), 複合ガスセンサーシステム (SnO_2 , WO_3 , TiO_2 , ZnO), Y_2O_3 蛍光体, SiO_2 被覆プラズモン Ag 粒子-超常磁性 Fe_3O_4 粒子 (SPION) コンポジット^[26])

Fig. 3 A number of promising materials made by aerosol particle technology^[26]: (Besides aerosol-made nanosilver and carbon-coated biomagnetic carbon-coated cobalt nanoparticles in the market already^[6], dental (radiopaque but transparent Ta_2O_5/SiO_2) composites, multilayer and multifunctional (conductive, phosphorescent, magnetic & bactericidal) polymer composites, single Pd atoms on TiO_2 photocatalysts, $FePO_4$ nutritional supplements, SnO_2 , WO_3 , TiO_2 and ZnO gas sensor arrays, Y_2O_3 -based phosphors and SiO_2 -coated Janus-like plasmonic-iron oxide nanoparticles (SPION) for theranostics.)

成および形態を持つナノ材料の毒性データベース化のために, ハーバード大に数百万ドルの助成しており (図 4, 右側), 様々なナノ材料調製手段として FSP 法が用いられている。

2 呼気解析ガスセンサへの展開

安価なナノ材料を組み込んだデバイスは今後発展が期待される分野の一つである。ナノ粒子はそのようなデバイスの構成要素である^[2]。したがって安価なナノ粒子が求められており, 気相法により合成された粒子は, 燃料電池, 蓄電池, 小型発電機等への応用が期待されている。加えて呼気解析用ガスセンサは, すでに製品化に向けたプロトタイプが制作されている^[28]。

気相プロセスで調製された粒子は, 液相法によって作られたものと同様の性能を示す^[29]。加えてセンサ部 (多孔質セラミック膜) 堆積のために新規の気相プロセス (エアロゾルの直接堆積法) が開発されている^[30]。このプロセスはドクターブレード法における, ナノ粒子含有ペーストの塗布, 乾燥および焼結等の煩雑な過程を必要としない^[26]。このプロセスにより, ガスセンサ素子 (例えば透明な SnO_2 粒子) を, 温度センサと Pt ヒーターを内蔵した集積回路上に多孔質膜として堆積可能である^[31]。ガスセンサとしての機能を持つのは電子回路上に堆積される半導体 (SnO_2 , TiO_2 , WO_3 , ZnO など) の多孔質膜である。適切にセンサ部を加熱し, 混合ガスに暴露すると, 半導体多孔質膜表面上で一部のガスが反応する (原理的には固体触媒反応と同様である)。この反応の度合いに応じて半導体膜の抵抗値が変化するため, ガスを検知することができ, 測定するガス

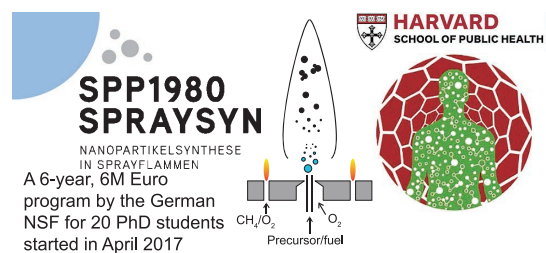


図 4 FSP 法により合成される機能性材料に関する研究プロジェクト

Fig. 4 Project on multicomponent nanoscale materials made by flame spray pyrolysis (FSP).

に対する感度、選択性および応答速度が主な性能指標となる^[32]。

おそらく、エアロゾルプロセスがガスセンサ開発に適している最も重要理由は、一般的な液相法では難しい準安定な結晶相を合成可能な点である。これにより人間の息（湿度 90% 以上）に含まれる 1000 種類以上の揮発性有機物の中から、目的のガスを ppb レベルの濃度まで選択的に検出することが可能である^[33]。例として、Si を添加することで安定化された準安定 ϵ -WO₃ 多孔質膜は、体脂肪燃焼の指標となるアセトン^[35]を湿度 90% の条件であっても 20 ppb まで検出することができる^[34]。このセンサを使えば、実際に行った運動が体脂肪燃焼や肥満解消に対して有効であるかを判断することができる^[35]。また同様に FSP 法により作成された Si 添加 MoO₃ 多孔質膜^[36]は、末期腎疾患の指標である NH₃ を 400 ppb まで、Ti 添加 ZnO 多孔質膜^[37]は血中コレステロールの指標となるイソプレンを 3 ppb まで検出可能である。

気相プロセスは生成する粒子サイズや組成のコントロールに長けており、この点を利用することで、複数のセンサを組み合わせるセンサアレイの開発に対して非常に有効である。センサアレイは任意ガスに対して異なる感度を持つ複数のセンサを組み合わせることで、多成分混合ガス中に存在する特定のガスを選択的に検出でき、災害時に瓦礫の下で助けを待つ人々の感知に利用できる^[38]。

これらセンサは、FSP 法により基板上に堆積させたナノ多孔質膜を利用している。この堆積技術は他のデバイスにも応用可能であり、例としては多層・多機能^[39]および伝導性^[40]ポリマーコンポジットの作成に利用可能であることが示されている。また最近では、FSP 法により高温空气中（600°C）で少なくとも 2 時間は安定な高活性単原子貴金属触媒 (Pd) を TiO₂ ナノ粒子に担持可能であり、低コストの高効率光触媒として注目されている^[41]。

3 おわりに

依然エアロゾルプロセスによる粒子合成技術について未解明な点は数多く存在するが、所要の機能を持つ粒子合成（図 4）を系統的に行うには十分な知見が得られている。今後の科学技術発展は依然不透明であるが、市販されているエアロゾル製ナノ材料（光ファイバー、銀ナノ粒子、カーボンブラック、フィラメント状ニッケル、ヒュームドシリカ、塗料用チタニア）の成功から察するに、将来のナノテクノロジー発展には、エアロゾル技術が不可欠であるといえる。

大きな可能性を持つ一方で未知の特性を持つナノ材料が完全に受け入れられるかどうかは、環境や人体に対するリスクから懐疑的な見方も存在している。しかしこれは、大気汚染物質や有害物質に対する対処法や予期せぬ被ばく防止に取り組む機会でもある。例えばクリーンルーム内の気圧を大気圧以上に保つことでクリーンルーム内部の汚染を防ぐように、研究室内でエアロゾルが発生する場合、実験室を大気圧以下に保ち、粒子の流出を防ぐべきである。プロセスガスはフィルターにより粒子を分離することで清浄化可能である。近い将来、エアロゾル関連産業は機能性デバイスの開発のみならず、ナノ材料の安全な利用に不可欠な存在となることは疑いようがない。

謝辞

本論文の日本語翻訳にご協力頂いた山形大学理工学研究科助教藤原翔先生に感謝する。

Acknowledgment

The author thanks Asst. Prof. Kakeru FUJIWARA of the Graduate School of Science and Technology, Yamagata University for his translation of the English article into Japanese.

References

- [1] Fujiwara K., Pratsinis S.E., Generation of Particles by Reactions in Powder Technology Handbook, 4th Ed., Eds. K. Higashitani, H. Makino, S. Matsusaka, Taylor & Francis, NY (in press).
- [2] Pratsinis S.E., Aerosol-based technologies in nanoscale manufacturing: From functional materials to devices

- through core chemical engineering, *AIChE J.*, 56 (2010) 3028–3035.
- [3] Wegner K., Pratsinis S.E., Aerosol flame reactors for synthesis of nanoparticles, *KONA Powder Part. J.*, 18 (2000) 170–182.
- [4] Koirala R., Pratsinis S.E., Baiker A., Synthesis of catalytic materials in flames: Opportunities and challenges, *Chem. Soc. Rev.*, 45 (2016) 3053–3068.
- [5] Rowell J.M., Photonic Materials, *Sci. Am.*, 255 (1986) 146–157.
- [6] Kelesidis G.A., Goudeli E., Pratsinis S.E., Flame synthesis of functional materials and devices: Surface growth and aggregation, *Proc. Combust. Inst.*, 36 (2017) 29–50.
- [7] Dobbins R.A., Megaridis C.M., Morphology of flame-generated soot as determined by thermophoretic sampling, *Langmuir*, 3 (1987) 254–259.
- [8] Arabi-Katbi O.I., Pratsinis S.E., Morrison Jr. P.W., Megaridis C.M., Monitoring the flame synthesis of TiO₂ particles by in-situ FTIR spectroscopy and thermophoretic sampling, *Combust. Flame*, 124 (2001) 560–572.
- [9] Kammler H.K., Beaucage G., Kohls D.J., Agashe N., Ilavsky J., Monitoring simultaneously the growth of nanoparticles and aggregates by in situ ultra-small-angle X-ray scattering, *J. Appl. Phys.*, 97 (2005) 054309.
- [10] Tsantilis S., Kammler H.K., Pratsinis S.E., Population balance modeling of flame synthesis of titania nanoparticles, *Chem. Eng. Sci.*, 57 (2002) 2139–2156.
- [11] Koch W., Friedlander S.K., The effect of particle coalescence on the surface area of a coagulating aerosol, *J. Colloid Interface Sci.*, 140 (1990) 419–427.
- [12] Pratsinis S.E., Flame aerosol synthesis of ceramic powders, *Prog. Energy Combust. Sci.*, 24 (1998) 197–219.
- [13] Mueller R., Kammler H.K., Pratsinis S.E., Vital A., Beaucage G., Burtscher P., Non-agglomerated dry silica nanoparticles, *Powder Technol.*, 140 (2004) 40–48.
- [14] Zhu W., Pratsinis S.E., Flame Synthesis of Nanosize Particles: Effect of Flame Configuration and Oxidant Composition in Nanotechnology, Eds. G.M. Chow, K.E. Gonsalves, ACS Symposium Series (1996).
- [15] Kruis F.E., Kusters K.A., Pratsinis S.E., Scarlett B., A simple model for the evolution of the characteristics of aggregate particles undergoing coagulation and sintering, *Aerosol Sci. Technol.*, 19 (1993) 514–526.
- [16] Johannessen T., Pratsinis S.E., Livbjerg H., Computational analysis of coagulation and coalescence in the flame synthesis of titania particles, *Powder Technol.*, 118 (2001) 242–250.
- [17] Pratsinis S.E., Zhu W.H., Vemury S., The role of gas mixing in flame synthesis of titania powders, *Powder Technol.*, 86 (1996) 87–93.
- [18] Hyeon-Lee J., Beaucage G., Pratsinis S.E., Vemury S., Fractal analysis of flame-synthesized nanostructured silica and titania powders using small-angle X-ray scattering, *Langmuir*, 14 (1998) 5751–5756.
- [19] Buesser B., Pratsinis S.E., Design of nanomaterial synthesis by aerosol processes, *Annu. Rev. Chem. Biomol. Eng.*, 3 (2012) 103–127.
- [20] Mezey E.J., Pigments and reinforcing agents in Vapor Deposition, Eds. C.F. Palmer, J.H. Oxley, J.M. Blocher, John Wiley and Sons, NY (1966).
- [21] Pratsinis S.E., History of the Manufacture of Fine Particles in High-Temperature Aerosol Reactors in Aerosol Science and Technology: History and Reviews, Ed. D.S. Ensor, RTI Press, Research Triangle Park, NC (2011).
- [22] Xiong Y., Akhtar M.K., Pratsinis S.E., Formation of agglomerate particles by coagulation and sintering-Part II. The evolution of the morphology of aerosol-made titania, silica and silica-doped titania powders, *J. Aerosol Sci.*, 24 (1993) 301–313.
- [23] Tsantilis S., Pratsinis S.E., Soft- and hard-agglomerate aerosols made at high temperatures, *Langmuir*, 20 (2004) 5933–5939.
- [24] Kammler H.K., Mueller R., Senn O., Pratsinis S.E., Synthesis of silica-carbon particles in a turbulent H₂-air flame aerosol reactor, *AIChE J.*, 47 (2001) 1533–1543.
- [25] Mädler L., Kammler H.K., Mueller R., Pratsinis S.E., Controlled synthesis of nanostructured particles by flame spray pyrolysis, *J. Aerosol Sci.*, 33 (2002) 369–389.
- [26] Strobel R., Pratsinis S.E., Flame aerosol synthesis of smart nanostructured materials, *J. Mater. Chem.*, 17 (2007) 4743–4756.
- [27] Teoh W.Y., Amal R., Mädler L., Flame spray pyrolysis: An enabling technology for nanoparticles design and fabrication, *Nanoscale*, 2 (2010) 1324–1347.
- [28] Sahm T., Mädler L., Gurlo A., Basran N., Pratsinis S.E., Weimar U., Flame spray synthesis of tin oxide nanoparticles for gas sensing, *Sens. Actuat. B*, 98 (2004) 148–153.
- [29] Liu Y., Koep E., Liu M.L., Highly sensitive and fast-responding SnO₂ sensor fabricated by combustion chemical vapor deposition, *Chem. Mater.*, 17 (2005) 3997–4000.
- [30] Kühne S., Graf M., Tricoli A., Mayer F., Pratsinis S.E.,

- Hierlemann A., Wafer-level flame-spray-pyrolysis deposition of gas-sensitive layers on microsensors, *J. Micromech. Microeng.*, 18 (2008) 035040.
- [31] Barsan N., Weimar U., Conduction model of metal oxide gas sensors, *J. Electroceram.*, 7 (2001) 143–167.
- [32] Righettoni M., Schmid A., Amann A., Pratsinis S.E., Correlations between blood glucose and breath components from portable gas sensors and PTR-TOF-MS, *J. Breath Res.*, 7 (2013) 037110.
- [33] Righettoni M., Tricoli A., Pratsinis S.E., Si:WO₃ sensors for highly selective detection of acetone for easy diagnosis of diabetes by breath analysis, *Anal. Chem.*, 82 (2010) 3581–3587.
- [34] Güntner A.T., Sievi N.A., Theodore S.J., Gulich T., Kohler M., Pratsinis S.E., Noninvasive body fat burn monitoring from exhaled acetone with Si-doped WO₃-sensing Nanoparticles, *Anal. Chem.*, 89 (2017) 10578–10584.
- [35] Güntner A.T., Righettoni M., Pratsinis S.E., Selective sensing of NH₃ by Si-doped α -MoO₃ for breath analysis, *Sens. Actuat. B*, 223 (2016) 266–273.
- [36] Güntner A.T., Pineau N.J., Chie D., Krumeich F., Pratsinis S.E., Selective sensing of isoprene by Ti-doped ZnO for breath diagnostics, *J. Mater. Chem. B*, 4 (2016) 5358–5366.
- [37] Righettoni M., Ragnoni A., Güntner A.T., Loccioni C., Pratsinis S.E., Risby T.H., Monitoring breath markers under controlled conditions, *J. Breath Res.*, 9 (2015) 047101.
- [38] Güntner A.T., Pineau N.J., Mochalski P., Wiesenhofer H., Agapiou A., Mayhew C.A., Pratsinis S.E., Sniffing entrapped humans with sensor arrays, *Anal. Chem.*, 90 (2018) 4940–4945.
- [39] Sotiriou G.A., Blattmann C.O., Pratsinis S.E., Flexible, multifunctional, magnetically actuated nanocomposite films, *Adv. Funct. Mater.*, 23 (2013) 34–41.
- [40] Blattmann C.O., Pratsinis S.E., Nanoparticle filler content and shape in polymer nanocomposites KONA Powder Part. J., DOI: 10.14356/kona.2019015
- [41] Fujiwara K., Pratsinis S.E., Single Pd atoms on TiO₂ dominate photocatalytic NO_x removal, *Appl. Catal., B*, 226 (2018) 127–134.

〈著者紹介〉



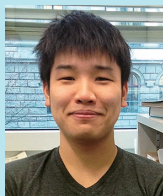
ソティリス イー プラツィニス Sotiris E. PRATSINIS

〔経歴〕 1985年米国のカリフォルニア大学ロスアンゼルス校 (UCLA) で PhD を取得, 米国シンシナチー大学化学工学科の教員を経て, 1998年から現職。2012年からスイスの工学アカデミーのメンバー。米国の大統領若手研究者賞とドイツの Humboldt Award など賞歴多数。

〔専門〕 物質移動とナノ粒子技術。最近は, 工業と生体材料のエアロゾル合成における粒子のダイナミクスの研究に取り組んでいる。

〔連絡先〕 sotiris.pratsinis@ptl.mavt.ethz.ch

〈翻訳者紹介〉



藤原 翔 Kakeru FUJIWARA

〔経歴〕 2016年 ETH Zurich Institute of Process Engineering Particle Technology Laboratory にて博士課程修了。同研究室での博士研究員を経て, 2017年から現職。

〔専門〕 燃焼合成と固体触媒。最近は, サブナノスケールのクラスター担持触媒や新規燃焼合成法の研究に取り組んでいる。

〔連絡先〕 k_fujiwara@yz.yamagata-u.ac.jp