減圧沸騰噴霧を利用した火炎内ナノ粒子燃焼合成法の提案 (アナターゼ相をもつ TiO₂ ナノ粒子生成条件の考察)

大嶋 元啓^{*1}, 松村 恵理子^{*2}, 千田 二郎^{*3}, 石田 耕三^{*4}

Proposal of flame synthesis method for nanoparticles using flash boiling spray (Discussion of condition to form anatase phase particle)

Motohiro OSHIMA^{*1}, Eriko MATSUMURA^{*2}, Jiro SENDA^{*3} and Kozo ISHIDA^{*4}

^{*1}Department of Mechanical System Engineering, Toyama Prefectural University
5180 Kurokawa, Imizu-shi, Toyama 939-0398, Japan

^{*2, *3}Graduate School of Mechanical Engineering, Doshisha University
1-3 miyakodani, Tatara, Kyotanabe-shi, Kyoto 610-0394, Japan

^{*4}HORIBA Ltd.
2 Miyano Higashi-cho, Kissyoin, Minami-ku, Kyoto 601-8510, Japan

Received: 17 October 2016; Revised: 19 January 2017; Accepted: 30 April 2017

Abstract

In this study, the novel flame synthesis method using flash boiling spray is proposed in order to form the homogeneous characteristics nanoparticle. In this method, the precursors are injected and the injected precursors are evaporated by flash boiling. The evaporated precursors form vapor and the nanoparticles are formed at high temperature with flame. The factors for homogeneous characteristics of nanoparticles are precursor, flash boiling spray, flame characteristics and nozzle. These factors affect each other and affect to the nanoparticle characteristics as diameter distribution and crystal characteristics. It is necessary to optimize these factors to form homogeneous characteristics particles. In the previous study, TiO₂ nanoparticles were formed and the relationship between the flame and injection characteristics, and the particle characteristics were investigated. From the result, the equivalence ratio affects to the nanoparticle crystal characteristics and injection condition affect to the particle diameter and mass fraction of anatase phase. In this paper, TiO₂ nanoparticles were produced and the particle property influenced by ambient pressure and particle trapping position is investigated. As the result, the mass fraction of TiO₂ anatase phase decreases by increasing ambient pressure. The rutile phase is formed at the short nanoparticle trapping position. The factors such as precursors, injection condition and fuel/oxygen flow ratio for producing the anatase phase particle in this method was discussed.

Key words : Nanoparticles, Flame synthesis method, Flash boiling spray, Ambient pressure

1. 緒 言

100 nm 以下の粒径のナノ粒子は量子サイズ効果といわれる特異な性質を示すことが知られており、この性質を利用した電子部品、光通信デバイス、半導体への応用に関する研究が進められている(奥山, 2008)。ナノ粒子を用いた製品では均一な物理的、化学的特性を満たすことが必須である。よって、均一特性をもつナノ粒子の合成手法の構築が非常に重要となる。一般的にナノ粒子は原料ガスを高温炉、火炎などを用いた高温場に導入し、化学反応を起こさせることで生成される。火炎は高温炉と比較して容易に高温場を実現できる利点を持った

No.16-00491 [DOI:10.1299/transjsme.16-00491], J-STAGE Advance Publication date: 15 May, 2017

^{*1} 正員, 富山県立大学 (〒939-0398 富山県射水市黒河 5180)

^{*2} 正員, 同志社大学 理工学部 (〒610-0394 京都府京田辺市多々羅都谷 1-3)

^{*3} 正員, フェロー, 同志社大学 理工学部

^{*4} 正員, (株)堀場製作所 (〒601-8510 京都府京都市南区吉祥院宮の東町 2)

E-mail of corresponding author: m-oshima@pu-toyama.ac.jp

め、ナノ粒子生成によく用いられる。しかし、火炎形態はナノ粒子の粒径、結晶性に大きく影響を及ぼすため、均一特性のナノ粒子を生成するには火炎形態の最適化とその状態を制御する必要がある (Pratsinis, 1998)。本研究では減圧沸騰噴霧により原料ガスを形成させ、火炎によりナノ粒子を生成する手法を用いて、 TiO_2 ナノ粒子を生成することを目的としている。林らはバーナー部と同平面にノズルを配置し、減圧沸騰により気化させ ZnO ナノ粒子を生成した。そして、減圧沸騰噴霧と ZnO ナノ粒子特性の関係について調べた (林, 赤松, 2012)。本研究では原料ガスを供給するためにバーナー部下部に原料供給部を設置し、減圧沸騰により完全気化させる手法とした。これまで著者らは本手法の実証のため SiO_2 ナノ粒子生成に成功し、光触媒に使用されるアナターゼ相をもつ TiO_2 ナノ粒子の生成に取り組んできた (福島他, 2010)。本手法の概略を図1に示す。本手法は以下に示す特徴を持つ。

- ①電子制御式ノズルによる原料溶液の間欠供給
- ②減圧沸騰噴霧による原料溶液の気化 (Senda et al., 1992)
- ③低沸点有機溶剤をナノ粒子生成原料に混合することによる蒸発特性の改善 (Poling et al., 2000)
- ④三重円管バーナーの適用による火炎形態の制御

電子制御式ノズルから間欠的に噴射された出発原料は減圧沸騰により蒸発、拡散し、広範囲に均一なガスを形成する。そして、原料ガスは燃焼によって形成される高温場で酸化剤と反応しナノ粒子を生成する。ここで所望の特性をもつナノ粒子を生成するには出発原料、噴射特性、減圧沸騰噴霧、火炎特性といった制御因子を最適化する必要がある。これらの制御因子は相互に関係しながら、ナノ粒子特性に影響を及ぼす。本手法におけるナノ粒子特性は粒径分布、結晶特性、組成などである。粒径分布は噴射特性および減圧沸騰噴霧による出発原料の蒸発特性、噴霧形状に影響を受ける。結晶特性、組成は火炎特性や低沸点有機溶剤の混合に影響を受ける。

本研究ではこれまで火炎特性、噴射特性がナノ粒子特性に及ぼす影響を明らかにするために、噴射周期および燃料と酸素の体積流量比と TiO_2 ナノ粒子特性の関係を評価した。本論文では出発原料ガスからナノ粒子が生成し、捕集されるまでのプロセスを明らかにするために雰囲気圧力および捕集位置と TiO_2 ナノ粒子特性の関係を評価し、これまでの研究成果と本実験で得た知見を基にアナターゼ相をもつ TiO_2 ナノ粒子の生成について考察した。

Fig. 1 Schematic image of flame synthesis method by using flashing spray.

2. 実験装置

ナノ粒子生成に用いた実験装置の概略を図2に示す。ナノ粒子生成装置は燃料供給部、原料供給部、バーナー部、ナノ粒子生成および捕集部、排気部から成り立つ。実験装置は内径 140 mm である。原料供給部では N_2 により加圧された出発原料はバーナー部下部のノズルに導かれ、噴射される。ノズルの周囲には温度制御されたキャリアガスの N_2 が供給される。また、原料の析出防止のため、壁面温度を制御した。出発原料は減圧沸騰により気

化し、バーナー部に送られる。バーナー部では三重円管バーナーの最内円環（内径：20 mm）から気化した出発原料が、中円環（内径：36 mm）から CH₄、最外円環（内径：68 mm）から O₂ が供給され拡散火炎が形成される。CH₄、O₂、N₂ の流量は燃料供給部にあるマスフローコントローラ（HORIBASTEC: SEC-E50）で制御した。ナノ粒子は拡散火炎によって形成される高温場により生成され、装置上部に設置したナノ粒子捕集部で捕集される。捕集部には直径 62 mm の金属板を設置し、ナノ粒子を捕集した。雰囲気圧力は排気部の真空ポンプのバルブの調整により制御した。

Fig. 2 Experimental apparatus.

3. 雰囲気圧力が及ぼす TiO₂ ナノ粒子特性への影響

3・1 実験条件

本実験の実験条件を表 1 に示す. 出発原料には TiO₂ ナノ粒子の原料としてテトライソプロポキシチタン (TTIP, Ti(i-OC₃H₇)₄) を用い、低沸点有機溶剤にはシクロヘキサン (C₆H₁₄) を用いた. シクロヘキサンの混合割合はモル分率で 0.9 である. 室温の出発原料は噴射圧力 0.32 MPa, 噴射期間 3.8 ms, 噴射周期 4 Hz でノズルから噴射される. ノズル形状はスリットである. チャンバの雰囲気温度はノズル中心から 20mm 直上に設置した K 型熱電対を用いて測定し、雰囲気温度 380 K で雰囲気圧力を 4, 6, 8, 10 kPa と変化させた. CH₄、O₂、N₂ の流量は 1.67, 8.33,

Table 1 Experimental conditions.

Mixture material			TTIP+cyclohexane
Molar fraction of cyclohexane $X_{cyclohexane}$ [-]			0.9
Nozzle type			Slit
Injection pressure	p_{inj}	[[MPa]	0.32
Injection duration	t_{inj}	[ms]	3.8
Injection frequency	F_{inj}	[Hz]	4
Ambient pressure	p_{amb}	[kPa]	4, 6, 8, 10
Ambient temperature	T_{amb}	[K]	390
CH ₄ flow rate	Q_{CH4}	[L/min]	1.67
O ₂ flow rate	Q_{O2}	[L/min]	8.33
Adiabatic flame temperature	T_{ad}	[K]	2593
N ₂ carrier gas flow rate	Q_{N2}	[L/min]	2.0

2.0 L/min で拡散火炎を形成した。なお、本実験条件における拡散火炎の断熱火炎温度は 2593 K である。捕集板はバーナー出口より 65 cm に設置し、捕集した。TiO₂ ナノ粒子の形状は走査型電子顕微鏡（以下、SEM）（日立製作所、S-4300N）により観察し、結晶構造は粉末 X 線回折（以下、XRD）（リガク、MiniFlexII），粒径分布はレーザー回折／散乱式粒子径分布測定装置（堀場製作所、Partica LA-950V2）を用いて観察した。粒径分布は TiO₂ ナノ粒子を分散媒である 0.2 %ヘキサメタリン酸ナトリウム水溶液に分散させホモジナイザにて 5 分間超音波照射した後、測定した。

3・2 雰囲気圧力と TiO₂ ナノ粒子特性の関係

3・2・1 雰囲気圧力と TiO₂ ナノ粒子形状の関係

図 3 は雰囲気圧力を変化させときの TiO₂ ナノ粒子の SEM 撮影画像である。図 4 は同条件における粒径分布である。これら図より雰囲気圧力の上昇に伴い、粒子同士が結合した TiO₂ ナノ粒子が観察される。また、粒径分布は各雰囲気圧において 90 nm のピークをもつが、雰囲気圧力の増加に伴い、110 nm 以上の粒径が増加する。ナノ粒子は一般にガスから核生成、モノマー、クラスタの生成を経て、凝集および焼結により成長する。ナノ粒子の凝集、焼結の頻度は凝集特性時間、焼結特性時間の大小によって決まり、これらは雰囲気温度に依存する。凝集特性時間が焼結特性時間より大きい場合は、ナノ粒子の同士の結合力は小さい。凝集特性時間が焼結特性時間より小さくなると、ナノ粒子の結合力は大きくなる（奥山，中曾，2001）。これを本実験の TiO₂ ナノ粒子の生成に適用すると雰囲気圧力の増加に伴い、火炎長さが短縮することによって火炎と捕集板間の距離が拡大し、ガスが緩やかに冷却されるため、焼結特性時間が大きくなり、超音波では分散することのできない結合力の強い TiO₂ ナノ粒子が生成されると推測される。

3・2・2 雰囲気圧力と TiO₂ ナノ粒子組成の関係

図 5 は雰囲気圧力を変化させたときの XRD 回折結果である。また、図 6 に XRD 回折結果から算出したアナターゼ相の重量割合を示す。なお、アナターゼ相の質量割合は以下の式(1)で算出した(Spurr and Myers, 1957)。

$$Y_A = \frac{1}{1 + 1.26(I_R/I_A)} \quad (1)$$

Fig.3 Particle morphology taken by SEM.

Fig.4 Particle distribution with ambient pressure change.

ここで、 Y_A はアナターゼ相の質量割合、 I_A はアナターゼ相の $2\theta = 25.3^\circ$ における回析強度、 I_R はルチル相の $2\theta = 27.5^\circ$ における回析強度である。図 5 より各雰囲気圧力においてアナターゼ相およびルチル相のピークが見られる。雰囲気圧力の上昇に伴い、アナターゼ相のピークは減少し、ルチル相のピークが増加する。図 6 においても雰囲気圧力の増加に伴い、アナターゼ相の重量割合 Y_A は減少する。ルチル相が生成される条件は 1373 K 付近の温度場 (Morooka et al., 1989), 低い酸素濃度雰囲気条件 (Yeh et al., 2004) のいずれかである。本実験では CH_4 , O_2 , N_2 流量, 噴射条件を一定としている。本実験の圧力範囲における燃焼に要するガス組成が雰囲気圧力に対する可燃限界値であると仮定すると雰囲気圧力の増加に伴い, 安定した火炎形成のため酸素を消費し, 低い酸素濃度の雰囲気を形成したと考えられる。

Fig. 5 XRD pattern with ambient pressure change.

Fig.6 Mass fraction of anatase phase with ambient pressure change.

4. 捕集位置の変化が及ぼす TiO_2 ナノ粒子特性への影響

4・1 実験条件

表 2 は実験条件を示したものである。室温の TTIP+シクロヘキサン混合溶液を噴射圧 0.32 MPa に加圧し, 噴射期間 3.8 ms, 噴射周期 6 Hz でノズルから噴射した。ノズル形状はスリットである。雰囲気温度および圧力は 390 K, 4 kPa である。 CH_4 , O_2 , N_2 の流量はそれぞれ 1.11 L/min, 8.89, 2.0 L/min とし拡散火炎により TiO_2 ナノ粒子を生成した。このときの断熱火炎温度は 2613 K であり, 火炎の長さはバーナー出口から約 55 cm である。 TiO_2 ナノ粒子の捕集位置はナノ粒子の火炎に滞留する時間の違いを評価するため, 火炎長さの半分程度, 火炎先端, 火炎から離れた位置としてバーナー出口から 30, 47, 65 cm の距離に設定した。30, 47 cm では火炎は捕集板に衝突し, 火炎形状は変化する。なお合成時間は 15 分である。

4・2 捕集位置と TiO_2 ナノ粒子特性の関係

4・2・1 捕集位置と TiO_2 ナノ粒子形状の関係

図 7 は各捕集位置における SEM 撮影結果である。撮影倍率は 7 万倍である。また, 図 8 に同条件における TiO_2 ナノ粒子の粒径分布を示す。図 7 より 65 cm では球形の TiO_2 ナノ粒子が生成されるのに対し, 30, 47 cm では局所的に非球形のナノ粒子が生成されていることが分かる。また, 図 8 より 30, 47 cm は火炎外の 65 cm と比較してピークの粒径が 100 nm 付近にあるものの大粒径側に粒径分布をもった大きなナノ粒子が生成された。このことより大粒径の TiO_2 ナノ粒子が生成される 30, 47 cm において超音波では分散不可能な強固な力により TiO_2 ナノ粒子が生成されていることが分かる。これは本実験では火炎を遮る状態で捕集板を挿入しており, 捕集板上に堆積した TiO_2 ナノ粒子が長時間, 高温にさらされることになり成長したと考えられる。

4・2・2 捕集位置とTiO₂ナノ粒子組成の関係

図9は各捕集位置におけるXRD回析結果である。また、この結果から式(1)を用いて算出したアナターゼ相の質量割合 Y_A を図10に示す。図9より30cmではアナターゼ相よりルチル相のピークが大きくなり、捕集位置とバーナー出口との距離の増加によりルチル相のピークは減少し、アナターゼ相のピークが増加する。図10からもバーナー出口との距離の増加によりアナターゼ相の質量割合が低下する。Yehらも予混合火炎中におけるナノ粒子の滞留時間がTiO₂ナノ粒子組成に及ぼす影響を明らかにするため、同様の実験を行っているが、本研究とは逆の傾向を示す。Yehらによるとバーナー出口との距離の増加によるアナターゼ相の質量割合低下は捕集位置の火炎内におけるTiO₂ナノ粒子の滞留時間が増加するためであるとしており、低い酸素濃度においてルチル相が増加すると結論付けている(Yeh et al., 2004)。本実験では火炎に拡散火炎を用いたこと、火炎を遮る形で捕集

Table 2 Experimental conditions.

Mixture material		TTIP+cyclohexane		
Molar fraction	$X_{cyclohexane}$ [-]	0.9		
Nozzle type		Slit		
Injection pressure	p_{inj} [MPa]	0.32		
Injection duration	t_{inj} [ms]	3.8		
Injection frequency	F_{inj} [Hz]	6		
Ambient pressure	p_{amb} [kPa]	4		
Ambient temperature	T_{amb} [K]	390		
Adiabatic flame temperature	T_{ad} [K]	2613		
CH ₄ flow rate	Q_{CH4} [L/min]	1.11		
O ₂ flow rate	Q_{O2} [L/min]	8.89		
N ₂ carrier gas flow rate	Q_{N2} [L/min]	3.0		
Particle trapping position	[cm]	30	47	65

Fig. 7 TiO₂ nanoparticle morphology with particle trapping position change.

Fig. 8 TiO₂ nanoparticle distribution with particle trapping position change.

板を挿入したため、酸素濃度の低い領域が捕集板上に形成されルチル相の生成が促進されたと考えられる。よって、本手法においては火炎を遮る形での捕集板挿入は捕集板上に低酸素濃度の雰囲気場を形成させ、ルチル相の生成を招く。

Fig.9 XRD pattern change with particle trapping position change. Fig.10 Mass fraction of anatase phase change with particle trapping position change.

5. 本手法における TiO_2 ナノ粒子生成条件の考察

これまで著者らが行ってきた研究成果と本論文における実験結果を基に、アナターゼ相をもつ TiO_2 ナノ粒子生成を考察する。図 11 は本手法における TTIP+シクロヘキサン混合溶液を用いたときの TiO_2 ナノ粒子生成を示したものである。以下に溶液噴射-蒸発プロセスと火炎- TiO_2 ナノ粒子生成プロセスに分類し、アナターゼ相をもつ TiO_2 ナノ粒子の生成について示す。

(1) 溶液噴射-蒸発プロセス

ノズルより噴射された混合溶液は、減圧沸騰によりガスを形成するが、本手法の溶液噴射-蒸発プロセスでは制御因子の混合溶液、噴射周期、雰囲気圧力が重要であると考えられる。TTIP+イソプロピルアルコール混合溶液、TTIP+シクロヘキサン混合溶液を用いたナノ粒子生成結果によると、混合する溶液の違いによって生成される粒径分布が異なる。これは混合溶液に含まれる低沸点溶液の反応が TiO_2 ナノ粒子生成を抑制するためである (Oshima et al., 2012)。よって、低沸点有機溶剤には TTIP の蒸発特性を改善し、 TiO_2 ナノ粒子生成に影響を及ぼさない溶液が望ましく、C と H で構成される炭化水素系溶液が良いといえる。また、噴射周期 2~10 Hz の範囲で TiO_2 ナノ粒子を生成したところ、8, 10 Hz において中心粒径 100 nm の粒径分布をもつ TiO_2 ナノ粒子が生成され、2, 4, 6 Hz では 100 nm と 1~3 μm に粒径分布のピークをもつ。これは一次粒子の凝集に要する時間 (凝集特性時間) と焼結に要する時間 (焼結特性時間) が関係しており、凝集特性時間が短く、焼結特性時間が長い場合は小粒径のナノ粒子が生成される (大嶋他, 2016)。よって中心粒径 100 nm の粒径分布をもつ TiO_2 ナノ粒子の生成には凝集特性時間より焼結特性時間が長い 8, 10 Hz となる。

(2) 火炎- TiO_2 ナノ粒子生成プロセス

火炎-TiO₂ ナノ粒子生成プロセスでは拡散火炎によって形成される高温場においてナノ粒子生成原料の蒸気から TiO₂ ナノ粒子が生成される。このプロセスでは燃料と酸素の体積流量比が重要であり、これは燃焼温度と TiO₂ ナノ粒子の組成に関係する。燃料と酸素の体積流量比を変化させたナノ粒子生成結果によると、体積流量比が変化しても 100 nm のピークをもつ TiO₂ ナノ粒子が生成される事がわかった。また、酸素濃度が増加すると燃焼温度が増加し、凝集特性時間の長期化、焼結特性時間の短期化により粒径分布の幅が広がる事がわかった（大嶋他，2016）。これは燃焼温度の増加によりルチル相への相変化が起こる 1373 K の温度条件を回避できることを示しており、高い酸素濃度は既往研究（Yeh et al., 2004）でも明らかにされているとおりアナターゼ相の生成に好条件であることを示している。また雰囲気は本手法においてルチル相を析出させない高い酸素濃度および温度条件を実現する火炎を形成する必要がある。本実験では雰囲気圧力が 4 kPa の場合、アナターゼ相の質量割合の高い TiO₂ ナノ粒子を生成することができた。しかし、圧力の変化に対する火炎状態と TiO₂ ナノ粒子生成の関係は本実験結果では不十分であると思われるため、今後、本生成手法におけるナノ粒子生成のシミュレーションを用いる事によって明らかにする必要がある。また、生成された TiO₂ ナノ粒子の捕集板による捕集方法は火炎形態によって得られる TiO₂ ナノ粒子の特性が異なるため、検討する必要がある。

Fig.11 TiO₂ nanoparticle formation mechanism on flame synthesis method by using flash boiling spray.

6. 結 言

本報では火炎ナノ粒子合成手法における雰囲気圧力および捕集位置と TiO₂ ナノ粒子の特性の関係を明らかにするため、出発原料に TTIP+シクロヘキサン混合溶液を用いて拡散火炎により TiO₂ ナノ粒子を生成した。また、これまで著者らが行った実験結果と本論文の実験結果を基にアナターゼ相をもつ TiO₂ ナノ粒子生成のための生成条件の考察を行った。本研究で得られた成果を以下に示す。

- (1) 雰囲気圧力の上昇に伴い、粒子同士が結合した TiO₂ ナノ粒子が生成される。これは雰囲気圧力の増加により火炎長さが短縮され、火炎と捕集板の間隔が広がることより超音波では分散させることのできない強固な力で結合した TiO₂ ナノ粒子が成長した。また、雰囲気圧力の増加は燃焼に要する酸素が増加するため、ナノ粒子生成に必要な酸素濃度が少なくなり、ルチル相が増加する。
- (2) 火炎を遮る形で捕集板を設置すると捕集板上に堆積した TiO₂ ナノ粒子は長時間、高温にさらされ、強固な力で結合したナノ粒子が生成されるため、大きな粒径分布をもつ。また、拡散火炎に捕集板を挿入すると捕集板上では酸素濃度の低い雰囲気状態の形成によりルチル相が増加する。
- (3) アナターゼ相をもつ粒径のそろった TiO₂ ナノ粒子を生成するための最適な噴射周期は 8, 10 Hz であり、最適な雰囲気圧力は 4 kPa である。この時、生成されるナノ粒子の粒径分布は 100 nm のピークをもつ。火

炎形態には酸素濃度の高い拡散火炎を形成する必要がある。また、TiO₂ ナノ粒子の捕集板による捕集は今後、検討する必要がある。

文 献

- 福島大地, 宮本英典, 大嶋元啓, 石田耕三, 千田二郎, 減圧沸騰噴霧の火炎内ナノ粒子合成法への展開, 微粒化, Vol.19, No.67 (2010), pp. 110-113.
- 林潤, 赤松史光, 減圧沸騰噴霧熱分解を用いたナノ粒子合成, 粉体工学会誌, Vol. 49 (2012), pp.26-34.
- Morooka, S., Yasutake, T., Kobata, A., Ikemizu, K. and Kato, Y., A mechanism for the production of ultrafine particles of TiO₂ by a gas-phase reaction, International Chemical Engineering, Vol. 29, No. 1 (1989), pp.119-126.
- 奥山喜久夫, ナノ粒子材料の合成・分離・機能化技術と実用化への課題, 粉碎, Vol. 51 (2008), pp.15-22.
- 奥山喜久夫, 中曽浩一, ナノ無機マテリアルの合成と機能化技術, Journal of the Society of Inorganic Materials, Vol.8 (2001), pp. 409-417.
- Oshima, M., Matsushita, M., Miyamoto, H., Fukushima, D., Senda, J. and Ishida, K., TiO₂ nanoparticle production with flame synthesis method by using flash boiling spray – relation between injection conditions and nanoparticle physical properties -, Proceedings of the 12th International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems (2012), 1208 (in USB).
- 大嶋元啓, 米田安那, 浅川野人, 松村恵理子, 千田二郎, 石田耕三, 減圧沸騰噴霧を利用した火炎内ナノ粒子燃焼合成法の構築 (TiO₂ 微粒子特性におよぼす原料噴射条件, 当量比の影響), 日本機械学会論文集, Vol. 82, No.840 (2016), DOI:10.1299/transjsme. 16-00082.
- Poling, E. B., Prausnitz, M. J. and Connell, O. J., The Properties of Gases and Liquids (2000), pp.8.12-8.32, Mc-Grow Hill.
- Pratsinis, S. E., Flame aerosol synthesis of ceramic powders, Progress in Energy Combustion Science, Vol. 24 (1998), pp. 197-219.
- Senda, J., Nishikori, T., Tsukamoto, T. and Fujimoto, H., Atomization of spray under low-pressure field from pintle type gasoline injector, SAE Technical paper (1992), 920382.
- Spurr, R. A. and Myers, H., Quantitative analysis of anatase-rutile mixtures with X-ray diffractometer, Analytical Chemistry, Vol. 29 No. 5 (1957), pp. 760-762.
- Yeh, C. L., Yeh, S. H. and Ma, H. K., Flame synthesis of titania particles from titanium tetraisopropoxide in premixed flames, Powder Technology, Vol.145 (2004), pp.1-9.

References

- Fukushima, D., Miyamoto, H., Oshima, M., Ishida, K. and Senda J., Development of flame synthesis method for nanoparticles by flash boiling spray, Journal of the ILASS-JAPAN, Vol.19, No.67 (2010), pp. 110-113 (in Japanese).
- Hayashi, J. and Akamatsu, F., Nanosized particle synthesis by using flash boiling atomization, Journal of the Society of Powder Technology, Vol.49 (2012), pp.26-34 (in Japanese).
- Morooka, S., Yasutake, T., Kobata, A., Ikemizu, K. and Kato, Y., A mechanism for the production of ultrafine particles of TiO₂ by a gas-phase reaction, International Chemical Engineering, Vol. 29, No. 1 (1989), pp.119-126.
- Okuyama, K., Nanoparticles synthesis, dispersion and functionalization for industrial application, The micromeritics, No. 51 (2008), pp.15-22 (in Japanese).
- Okuyama, K. and Nakaso, K., Synthesis and functionalization technology of nano-inorganic material, Journal of the Society of Inorganic Materials, Vol.8 (2001), pp. 409-417 (in Japanese).
- Oshima, M., Matsushita, M., Miyamoto, H., Fukushima, D., Senda, J. and Ishida, K., TiO₂ nanoparticle production with flame synthesis method by using flash boiling spray – relation between injection conditions and nanoparticle physical properties -, Proceedings of the 12th International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems (2012), 1208 (in USB).
- Oshima, M., Yoneda, A., Asakawa, N., Matsumura, E., Senda, J. and Ishida, K., Proposal of flame synthesis method for nanoparticles using flash boiling spray (TiO₂ particle characteristics influenced by injection condition and equivalence ratio), Transaction of the JSME (in Japanese), Vol.82, No.840 (2016), DOI:10.1299/transjsme. 16-00082.
- Poling, E. B., Prausnitz, M. J. and Connell, O. J., The Properties of Gases and Liquids (2000), pp.8.12-8.32, Mc-Grow Hill.
- Pratsinis, S. E., Flame aerosol synthesis of ceramic powders, Progress in Energy Combustion Science, Vol. 24 (1998), pp. 197-219.

- Senda, J., Nishikori, T., Tsukamoto, T. and Fujimoto, H., Atomization of spray under low-pressure field from pintle type gasoline injector, SAE Technical paper (1992), 920382.
- Spurr, R. A. and Myers, H., Quantitative analysis of anatase-rutile mixtures with X-ray diffractometer, analytical chemistry, Vol. 29 No. 5 (1957), pp. 760-762.
- Yeh, C. L., Yeh, S. H. and Ma, H. K., Flame synthesis of titania particles from titanium tetraisopropoxide in premixed flames, Powder Technology, Vol.145 (2004), pp.1-9.