

タンデム誘導熱プラズマノ粒子生成法における変調波形制御による生成ナノ粒子径度分布制御

Control of Particle Size Distribution of Nanoparticles Synthesized by Modulated Tandem Induction Thermal Plasmas with Different Modulation Waveforms

金沢大理工¹, 日清製粉 Gr 本社², °田中 康規¹, 古川 颯大¹, 長瀬 有理奈¹

不破 知哉¹, 中野 裕介¹, 石島 達夫¹, 末安 志織², 渡邊 周², 中村 圭太郎²

Kanazawa Univ.¹, Nisshin Seifun Group Inc.², °Y. Tanaka¹, R. Furukawa¹, Y. Nagase¹, T. Fuwa¹,

Y. Nakano¹, T. Ishijima¹, S. Sueyasu², S. Watanabe², K. Nakamura²

E-mail: tanaka@ec.t.kanazawa-u.ac.jp

筆者らはこれまでに、タンデム型変調誘導熱プラズマ (Tandem-MITP) に原料時間制御導入法 (TCFF 法) を組み合わせた Tandem-MITP+TCFF 法を開発している[1]。この手法では一つのプラズマトーチに二つのコイルを直列配置したタンデム誘導熱プラズマを用いて、熱プラズマ維持の安定性を図りつつ下段コイル変調により熱プラズマ流動場を大きく変動させる。これにより熱プラズマの大きな温度変化をもたらし、原料蒸気を急冷し過飽和状態として、ナノ粒子を大幅に高いレートで生成することに成功している。さらに筆者らは本法によるナノ粒子大量生成について数値解析モデルもこれまでに構築しており、大きな温度変動による質量密度変動が、トーチ下流での強い巻き込み流を作り出し、効率的にナノ粒子核が生成されることも明らかにしている[2]。

Tandem-MITP+TCFF 法によるナノ粒子生成において生成ナノ粒子径は、変動させる熱流動場に大きく影響される。本報告では、Tandem-MITP の下段コイル電流変調波形を矩形波、鋸波、三角波とした Si ナノ粒子生成における粒径度分布に対する影響を実験的に検討した。

Fig. 1 に Si ナノ粒子生成用 Tandem-MITP 装置の概略を示す。トーチ内圧力を 300 torr とし、Ar シースガスを 90 L/min とし、Si 原料粉体を 3 g/min で、Ar キャリアガス 4 L/min とともに Tandem-MITP に間歇供給した。上段/下段コイル電流周波数を 400/250 kHz とし、熱プラズマへの時間平均入力電力を上下段コイルそれぞれに 10 kW とした。変調周期 T_{cyc} は 20 ms とした。上段コイル電流は変調せず、下段コイル電流振幅を、最低値が 0 A となるように変調設定した。

Fig.2 は、鋸波・三角波変調で生成した Si ナノ粒子の粒径度分布例である。同図において、鋸波変調の場合に平均粒径が最も小さく 69.9 nm であり、生成粒子の 93% が直径 100 nm 以下のナノ粒子であった。これは鋸波変調の場合、熱プラズ

マへの入力電力が最大値から最小値に急激に低下され、原料蒸気が急冷され、粒子径の増大が抑制されたためと考えられる。一方、三角波変調の場合には平均粒径が 104 nm で、生成されるナノ粒子の割合は全体の 60%程度と比較的大きな粒子が生成された。これは三角波変調の場合、温度低下が緩やかとなり、核生成された粒子が不均一凝縮により成長するためと考えられる。この傾向は数値解析からも同様の結果が得られている。

参考文献

[1] K. Onda, et al., J. Phys. D: Appl. Phys., **53**, 165201, (2020).

[2] R. Furukawa, et al., J. Phys. D: Appl. Phys., **55**, 044001, (2022).

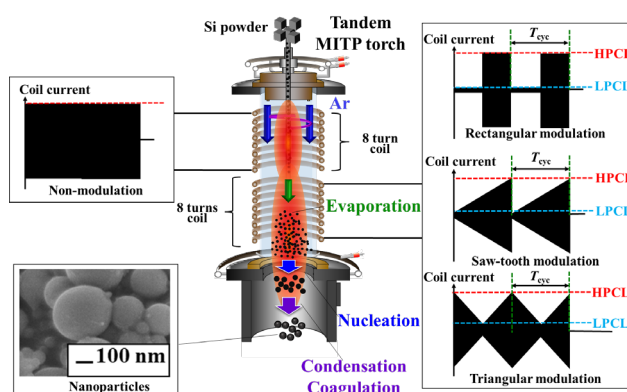
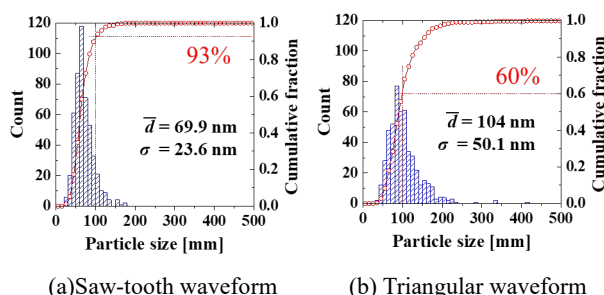


Fig.1 Tandem-MITP system and modulation waveforms for lower coil current.



(a) Saw-tooth waveform (b) Triangular waveform
Fig.2 Size distribution of particles synthesized by Tandem-MITP with different modulation waveforms.