

## ナノ粒子生成用タンデム型パルス変調誘導熱プラズマの異なる変調周期に対する機械学習を用いた制御パラメータの最適値探索

### Machine Learning Exploration of Optimal Control Parameters in Different Modulation Cycles of Tandem Pulse-Modulated Induction Thermal Plasmas for Nanoparticle Synthesis

金沢大自然<sup>1</sup>, 日清製粉グループ本社<sup>2</sup> (M2)<sup>o</sup>岡野 里桜<sup>1</sup>, 田中 康規<sup>1</sup>,  
中野 裕介<sup>1</sup>, 石島 達夫<sup>1</sup>, 北山 哲士<sup>1</sup>, 末安 志織<sup>2</sup>, 渡邊 周<sup>2</sup>, 中村 圭太郎<sup>2</sup>

Kanazawa Univ.<sup>1</sup>, Nisshin Seifun Group Inc.<sup>2</sup>, <sup>o</sup>Rio Okano<sup>1</sup>, Yasunori Tanaka<sup>1</sup>, Yusuke Nakano<sup>1</sup>,  
Tatsuo Ishijima<sup>1</sup>, Satoshi Kitayama<sup>1</sup>, Shiori Sueyasu<sup>2</sup>, Shu Watanabe<sup>2</sup>, Keitaro Nakamura<sup>2</sup>

E-mail: [kmajpt-186@stu.kanazawa-u.ac.jp](mailto:kmajpt-186@stu.kanazawa-u.ac.jp)

原料を間歇導入したタンデム型パルス変調誘導熱プラズマによるナノ粒子大量生成法(Tandem-PMITP+TCFF法)では, 矩形波形に振幅変調されたコイル電流によって数ミリ秒で時空間変動する熱流動場を生成し, 熱プラズマ高温時(On-time)に原料粉体を瞬時に加熱・蒸発させるとともに低温時(Off-time)の急激な温度低下により多量のナノ粒子核を生成する[1]. 本稿では本手法の数値解析モデルを用い, ナノ粒子生成量 $N_{NP}^{total}$ を最大化かつ平均径 $\bar{D}_{NP}$ を最小化する制御パラメータを機械学習最適化により求めた.

本計算モデルでは, 原料粉体の挙動および原料蒸発過程, ナノ粒子の核生成・成長・輸送を計算できる. 本モデルにおける制御パラメータの電力, 電流変調度, デューティ比, 原料供給の時間長と位相, 冷却ガス導入量および導入時間と位相を, 機械学習に基づくRBFネットワークによる逐次近似最適化を用いて最適化した[2]. 上記8パラメータ最適化は電流変調周期 20 ms, 80 ms に対し行った.

Fig. 1 に, 変調周期に対する $N_{NP}^{total}$ および $\bar{D}_{NP}$ を示す. 同図は最適化により得られた各周期の最終的なパレートフロントから,  $N_{NP}^{total}$ が最大となった条件をそれぞれ選択してプロットしたものである. 同図から, 変調周期 80 ms と長くすると,  $\bar{D}_{NP}$ は同程度で $N_{NP}^{total}$ を約 1.7 倍増加できることが明らかとなった. この最適化された条件下における電磁熱流体解析を行い, 上記結果を考察した.

Fig. 2 に(i)周期 20 ms および(ii)周期 80 ms での Off-time におけるガス温度分布(左)およびナノ粒子数密度分布(右)を示す. 同図(i)周期 20 ms では, チャンバ上部( $z=500$  mm)での強い巻き込み流によって高温ガスが急激に温度低下し, 同位置で局所的かつ大量にナノ粒子が生成された. これは高温の Si 蒸気が急冷されて過飽和し, 多量の核変換が生じたためである. 同図(ii)周期 80 ms では, トーチ下部( $z=440$  mm)での冷却ガス導入が高い冷却効果を有し, トーチ部からの高温ガスを径方向に収縮させた. この周期では, 低温巻き込みガスの流入が弱かったため, チャンバ上部での粒子生成はあまり促進されなかった. 一方, チャンバ上部から下部の長い範囲で径方向内部までナノ粒子数密度が高くなった. これは, トーチ部からの高温領域の拡大が抑制され, 中心付近で温度が

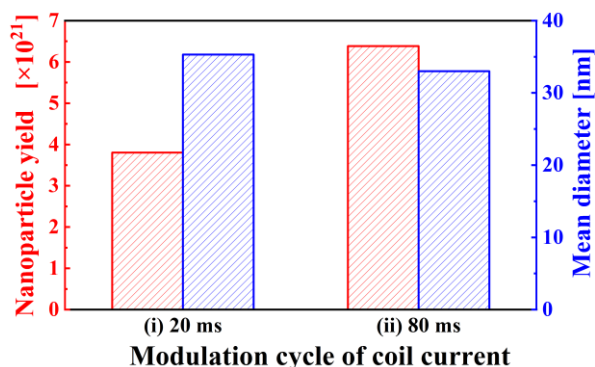


Fig. 1. Optimization of  $N_{NP}^{total}$  and  $\bar{D}_{NP}$  for modulation period by machine learning.

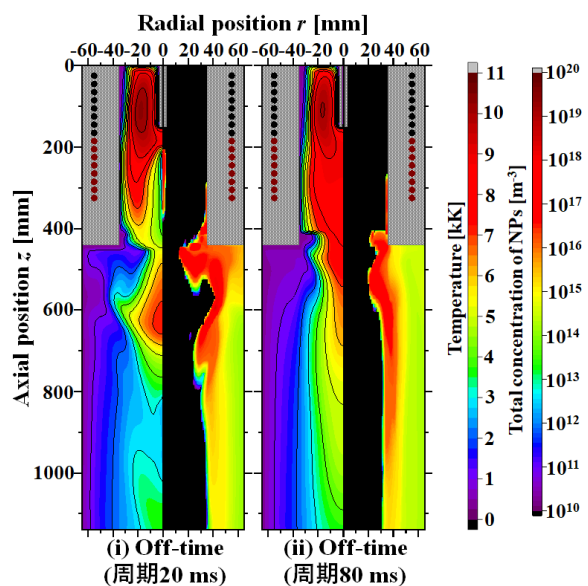


Fig. 2. Temperature distribution (left) and total nanoparticle concentration (right) in Tandem-PMITP for cycle of 80 ms

より低くなったためと考えられる. 以上から, 20 ms のような短い周期では, チャンバ上部での巻き込みガス流量を制御するアプローチが有効であり, 80 ms のような長い周期では, トーチ部からの高温ガス伸長を抑制し, チャンバを低温維持するためのパラメータ制御が有効であることが明らかとなった.

#### References

- [1] R. Furukawa, et al., *Powder Technology*, **389**, 460-470 (2021)
- [2] S. Kitayama, et al., *Struct. Multidiscip. Optim.*, **48**, 501-510 (2013)