

# ナノ粒子生成用変調誘導熱プラズマ下流の反応容器における変動熱流動場解析 Thermofluid simulation in reaction chamber downstream of modulated induction thermal plasmas for nanoparticle synthesis

不破知哉<sup>1</sup>, 古川颯大<sup>1</sup>, 長瀬有理奈<sup>1</sup>, 田中康規<sup>1</sup>, 中野裕介<sup>1</sup>,  
石島達夫<sup>1</sup>, 末安志織<sup>2</sup>, 渡邊周<sup>2</sup>, 中村圭太郎<sup>2</sup>

Tomoya Fuwa<sup>1</sup>, Ryudai Furukawa<sup>1</sup>, Yurina Nagase<sup>1</sup>, Yasunori Tanaka<sup>1</sup>, Yusuke Nakano<sup>1</sup>, Tatsuo Ishijima<sup>1</sup>, Shiori Sueyasu<sup>2</sup>, Shu Watanabe<sup>2</sup>, Keitaro Nakamura<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 金沢大学, <sup>2</sup> 日清製粉グループ本社

<sup>1</sup>Kanazawa University, <sup>2</sup>Nisshin Seifun Group Inc.

## 1 まえがき

筆者らはこれまでに、パルス変調熱プラズマPMITPと原料間歇同時導入法TCFFとを組み合わせた新ナノ粒子大量生成法PMITP+TCFF法を開発している [1]. 本法では、電力変調による原料蒸発プロセスと、プラズマトーチ部およびトーチ下流のチャンバ部における変動熱流動場における原料蒸気の急冷過程とが重要な役割を果たすことが判明している [2]. トーチ下流のチャンバ部での蒸気冷却過程をより詳細に検討するため、同部分の3次元熱流動解析を試みている [3]. 本報では3次元モデルにおいて、トーチ部から流入する温度場・流速場の境界条件として別途2次元非定常電磁熱流体解析から求めたもの [4] を新たに用い、より詳細な熱流動場解析を行った。

## 2 計算空間および計算条件

Fig. 1 に3次元熱流動解析の計算空間を示す。これはナノ粒子生成用トーチ下流のチャンバ部を模擬している。同図 Inlet がトーチ最下流にあたり、ここから変調熱プラズマがチャンバ部に導入される。また、底面における流体出口を流出境界とし、圧力を 300 torr 一定とした。その他の壁面ではすべりなし、温度 300 K 固定とした。計算空間内においては 99%Ar/1%H<sub>2</sub> の混合ガス、圧力 300 torr の熱力学・輸送特性の温度依存性を考慮した。計算には COMSOL Multiphysics Ver.5.6 を用いた。ここで、On-time/Off-time が 10 ms/10 ms とし、コイル電流変調を行った。二次元電磁熱流体解析の結果 [4] より、温度場・流速 ( $T(r), U(r), V(r)$ ) の径方向分布を抽出した。同図に時刻  $t=0$  ms における温度・流速の径方向分布  $T(r), U(r)$  を示す。温度・流速分布は前述の二次元電磁熱流体解析の出力を再度関数として表現した。Inlet 境界での温度・流速の時間変化は、同図の変調関数を乗算し、 $T(r)f_T(t)$  および  $U(r)f_U(t)$  として模擬した。

## 3 チャンバー内温度計算結果

変調周期 20 ms を 10 周期分行うことで、ほぼ周期定常が得られるまで計算した。Fig. 2 に、温度分布の変化を示す。横軸  $z=-20$  mm が Inlet 境界位置、 $t=0-10$  ms が On-time、 $t=10-20$  ms が Off-time である。同図から、 $t=5$  ms から  $t=10$  ms にかけて、Inlet 境界温度が上昇し、約 8500 K の熱ガスが流入し、さらに下流へと伝搬する様子が見られる。この変動温度場に

より、 $z > 120$  mm の下流域においては 6000–7000 K の熱ガスが下流方向に周期的に移流する。また、 $t=5$  ms において周囲の低温ガスの巻き込みが見られた。低温ガスによる冷却により、原料蒸発蒸気の冷却および粒子核生成が促進されるため、今後、巻き込み効果の大きい変動温度場および流速場を実現する条件を検討する。

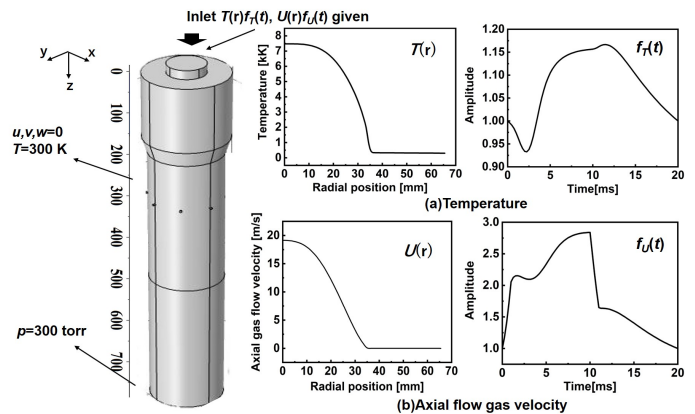


Fig. 1: 計算空間と境界条件

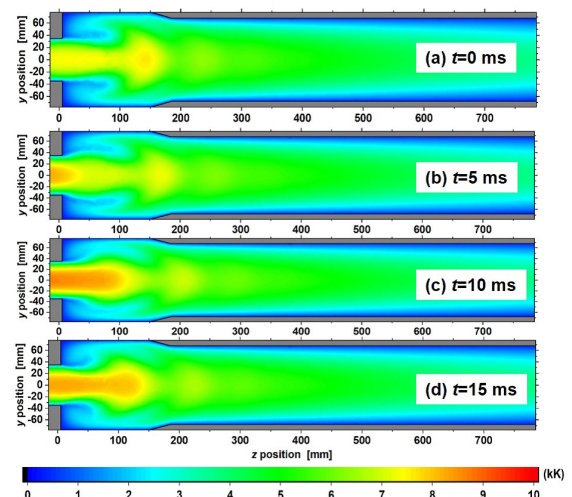


Fig. 2: 時間変動する温度場の計算結果

## References

- [1] N.Kodama, et al., *J.Phys.D:Appl.Phys.* **47**, 195304, 2014.
- [2] Y.Tanaka, et al., *GEC2020*, GT3.00006, 2020.
- [3] Y.Tanaka, et al., *MRS-J*, C3-O20-004, 2018.
- [4] K.Onda, et al., *J.Phys.D:Appl.Phys.*, **53**, 165201, 2020