

## 熱処理炉の炉内シミュレーション

### Numerical Simulation of Furnace for Heat Treatment

山口雅志*	中林宏行**	堀野太希***
YAMAGUCHI Masashi	NAKABAYASHI Hiroyuki	HORINO Taiki
和田智宏***	能瀬憲宏****	
WADA Tomohiro	NOSE Norihiro	

#### 1. はじめに

熱処理技術では熱処理炉内の雰囲気ガス制御が重要な研究開発要素となっている。ガス組成や昇温、冷却パターン、ガス吹込み方法を最適化することにより製品品質や生産性が向上し、コスト削減も可能となる。適切な雰囲気制御のためには炉内の状態を把握することが必要であるが、実験的な炉内の可視化には限界があり、数値シミュレーションによる流速、温度及び化学組成等の解析が有効である。本報告ではメッシュベルト式連続熱処理炉を対象とした炉内数値シミュレーション技術について紹介する。

#### 2. 基礎方程式

本解析における基礎方程式は連続の式、運動方程式、エネルギー輸送式、乱流パラメータの輸送方程式である。定常3次元解析であり、運動方程式は直交座標系における速度3成分についてそれぞれ解析する。炉内の流れは乱流と見なし、本解析では乱流モデルに標準  $k-\epsilon$  2方程式モデルを採用し、壁面近傍の取り扱いには標準壁関数を用いる。これらに加えて、化学種が複数ある場合には化学種の質量分率の輸送式を解く必要がある。

基礎方程式の離散化には有限体積法を用い、流れ場の解法には SIMPLE 法を採用する。解析には汎用熱流体解析ソフトウェア FLUENT Ver.14.0.0を使用した。

#### 3. 解析対象及び解析条件

図1に解析対象となる当社のメッシュベルト式連続熱処理炉を示す。焼結、脱脂、光輝等の無酸化処理を用途とし、最高温度1150℃まで使用可能である。被処理物はメッシュベルトにより搬送し、予備加熱炉

及び加熱炉により高温処理した後、冷却室において冷却を行う。雰囲気ガスは3箇所または4箇所より流入し、炉の出入口より排出する。

連続熱処理炉をモデル化した解析領域を図2に示す。予備加熱炉、加熱炉、冷却室及び前後室の内部空間を解析領域とし、被加熱物は考慮しない。メッシュベルトは厚み10mmの板として模擬するが、ベルト受レールは影響無しと判断し省略する。3次元形状であるが、領域の対称性から中央の対称面より片側半分を解析範囲とする。解析格子はPointwise V17.0によって作成し、全て6面体で構成した。格子数は562552セル、1748438フェイス、623414ノードである。

ガス流入1～4より配管を通り炉内にガスが流入する。流入ガスは絶対圧力101325Pa、温度30℃の窒



図1. メッシュベルト式連続熱処理炉

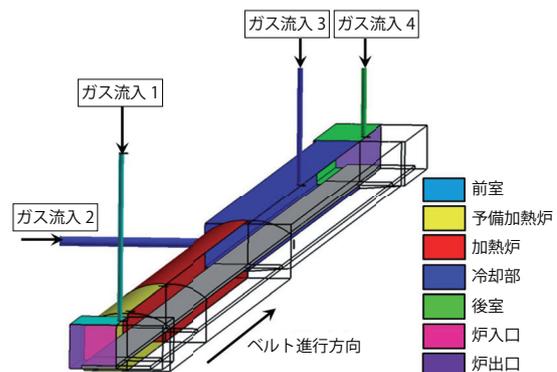


図2. 解析領域

\* 開発・エンジニアリング 本部技術サポートセンター  
 \*\* Matheson Tri-Gas Inc.  
 \*\*\* 開発・エンジニアリング本部 ガスアップセンター  
 \*\*\*\* 開発・エンジニアリング本部ガスアップ戦略統括プロジェクト

表1. 絶対圧力101325Pa, 0°Cにおけるガス流量

ガス流入口		1	2	3	4
条件1	流量 (L/min)	30	-	300	40
	化学種	N <sub>2</sub>	-	N <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>
条件2	流量 (L/min)	30	150	150	40
	化学種	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>

素あるいは水素とし、炉の出入口が流出口となる。体積流量は表1の通りであり、計2条件の定常解析を実施する。

雰囲気ガスの密度は理想気体の状態方程式より算出し、定圧比熱、熱伝導率、粘性係数はそれぞれ各成分の物性値を温度の関数として与える。混合物の物性値について、定圧比熱は質量分率による平均化を用い、熱伝導率と粘性係数には理想気体の混合則を適用する。窒素と水素の拡散係数は実験式より計算した値を用いる<sup>1)</sup>。メッシュベルトは単位長さあたりの質量が実機と等しくなるように密度を1623kg/m<sup>3</sup>と設定し、定圧比熱及び熱伝導率はそれぞれ SUS304 の値を温度の多項式として与える。

炉壁厚の伝熱は解かず内壁表面で境界条件を与える。予備加熱炉、加熱炉、冷却室の内壁はそれぞれ600°C、1000°C、30°Cとし、前後室の内壁は断熱壁とする。ベルトの移動速度100mm/minを与え、ベルト入口側端面は30°Cの温度境界、出口側端面は断熱条件とする。

#### 4. 解析結果

条件1における流線を図3に示す。流線の色は流速の大きさを表す。ガス流入1から流入する窒素はベルトに衝突した後に回旋しながら炉入口より流出し、ガス流入4からの窒素も同様にして炉出口より流出する。ガス流入3の窒素は多くが炉出口側へ流れるが、一部は加熱炉を通り炉入口側へ流れていることが分かる。

図4に対称面の温度分布を示す。表示上、炉の高さ方向のみ10倍に拡大しており、ベルト進行方向は図中左から右方向である。加熱炉でガス温度が上昇するが、窒素のみの条件1に比較し水素を加えた条件2の方がより高温となっている。これは水素導入により雰囲気ガスの熱伝導率が大きくなった影響と考えられる。対称面におけるベルト表面より上空10mmの位置での温度分布を図5に示す。横軸は炉入口からの距離、縦軸はガス温度である。条件2の方が温度変化が顕著であり、加熱炉中央付近では条件1よりも500°C高温となっている。また冷却室における温度低下も速

やかである。これらの結果は、雰囲気ガス条件の相違により炉内の状態が大きく異なることを示唆する。

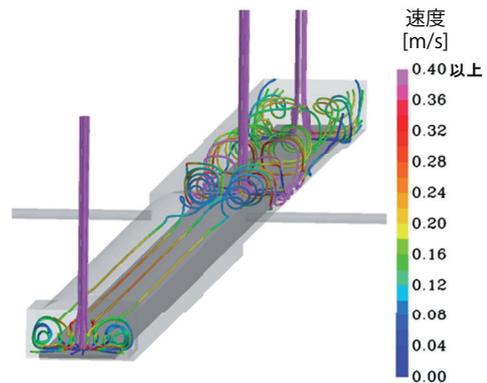


図3. 流線

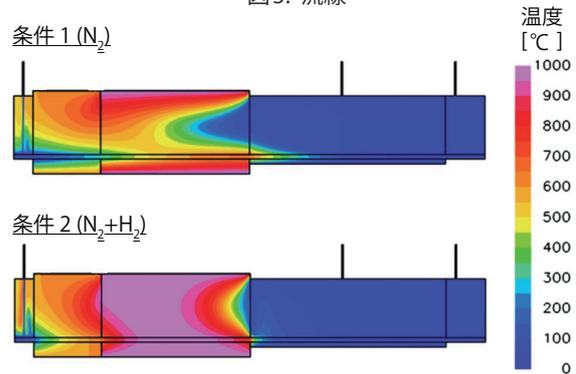


図4. 温度分布比較 (高さ方向を10倍に拡大)

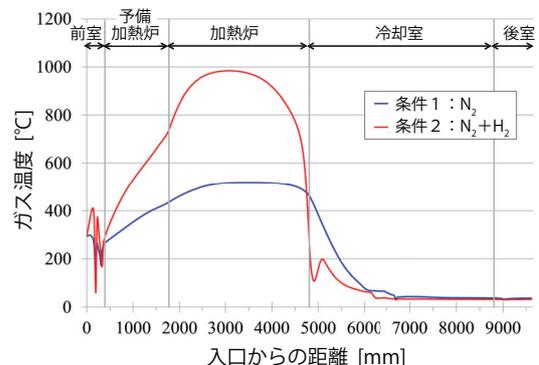


図5. 温度分布 (対称面, ベルト上空10mm)

#### 5. おわりに

本報告では、連続熱処理炉について数値シミュレーションを実施し、炉内のガス流れやガス種による違いを可視化した。熱処理炉のシミュレーションは連続炉だけでなくボックス炉及び真空炉(伝熱のみ)にも適用可能な技術であり、これまでに多くの実績を積み重ねている。数値シミュレーションは現象の理解や性能の予測、構造の最適化やトラブル対策の検討など、幅広く活用可能な技術である。

#### 参考文献

1)日本機械学会. 伝熱工学資料. 改訂第5版, 2009, p.332.