

# 回転ストーカ式ごみ焼却炉の燃焼シミュレーション ～実施設での測定データとの比較～

## Numerical Simulation of Rotary Combustor - Comparison with Actual Measurement Data -



井上尚子\*  
Naoko Inoue  
工学博士



栗須祥寛\*  
Yoshihiro Kurisu



石井 豊\*  
Yutaka Ishii



多田俊哉\*  
Toshiya Tada

実機規模の回転ストーカ式ごみ焼却炉（以下、回転ストーカ炉）を対象に、離散要素法（DEM）と数値流体力学（CFD）の連成解析による燃焼シミュレーションを実施した。さらに、実施設での測定値との比較により、シミュレーション結果の妥当性を評価した。

回転ストーカ炉内のごみ粒子の滞留時間は、トレーサを用いて実機にて測定した滞留時間と良い一致を示した。回転ストーカ炉出口の排ガス組成に関しては、特に O<sub>2</sub> および CO<sub>2</sub> 濃度が実測値と良く一致しており、測定位置による濃度差の傾向も再現することができた。

Numerical simulations were conducted for a full-scale rotary combustor by coupled analysis of DEM (Discrete Element Method) and CFD (Computational Fluid Dynamics). The results were then evaluated by comparing them with data measured on an actual incinerator.

The residence time of the DEM particles in the rotary combustor showed good agreement with the data measured on the incinerator using tracer samples. The O<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> concentrations computed for the outlet of the rotary combustor were very similar to the measured values. This simulation also replicated the difference in concentration by gas sampling position.

### Key Words :

回転ストーカ式ごみ焼却炉  
数 値 解 析  
数 値 流 体 力 学  
離 散 要 素 法

Rotary combustor  
Numerical analysis  
Computational fluid dynamics (CFD)  
Discrete element method (DEM)

### 【セールスポイント】

- ・ 炉内のごみの動きも考慮した燃焼シミュレーション
- ・ 実機規模の回転ストーカ炉を対象としたシミュレーション
- ・ 実施設での測定値との比較、検証

### ま え が き

カーボンニュートラル達成へ向けた動きが世界的に広がっており、我が国においても、2020年10月に「2050年カーボンニュートラル」を宣言して以降、

その動きが加速している。2020年12月に策定された「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」では廃棄物発電についても言及されており、プラスチック割合の減少による将来的なごみ発熱量

\*技術開発センター 技術開発部 基盤技術室

の低下や、それにとともなう発電効率低下への対応が必要であることが述べられている<sup>1)</sup>。このような背景から、廃棄物焼却施設は多種多様な廃棄物への対応および発電効率の向上に向け、さらなる燃焼技術の向上が求められている。

短期間での設計開発や焼却炉内の現象理解に資するツールとして、数値シミュレーションが広く活用されている。計算機の性能向上にともない、より複雑な解析への取組みも進んでおり、近年はCFD (Computational Fluid Dynamics: 数値流体力学) をDEM (Discrete Element Method: 離散要素法) と組み合わせた連成解析の事例も報告されている<sup>2), 3)</sup>。DEM は粒子同士の衝突などを考慮し、粒子の運動を計算する手法である<sup>4)</sup>。この粒子でゴミを模擬することにより、焼却炉内のごみ層の動きが表現できると期待される。

当社の回転ストーカ式ごみ焼却炉 (以下、回転ストーカ炉) は、傾斜した円筒の炉体をゆっくり回転させることでゴミを後段へ送りながら順次、乾燥・熱分解・一次燃焼させる<sup>5)</sup>。回転ストーカ炉のさらなる燃焼技術向上のためには、回転炉内での複雑なゴミの移動および燃焼挙動を把握することが望まれるが、高温の燃焼場においてこれらを測定することは困難である。そこで、焼却炉内を再現し、その性能向上に役立てるべく、DEM-CFD 連成解析による回転ストーカ炉の燃焼シミュレーションに着手した。

本稿では、実機規模の回転ストーカ炉を対象としたシミュレーション、および2か所の実施設でそれぞれ測定したゴミ滞留時間 (施設1)、炉出口排ガス組成 (施設2) とシミュレーション結果との比較について紹介する。

## 1. 解析方法

### 1.1 解析対象

図1に回転ストーカ炉の概略を示す。本装置は、

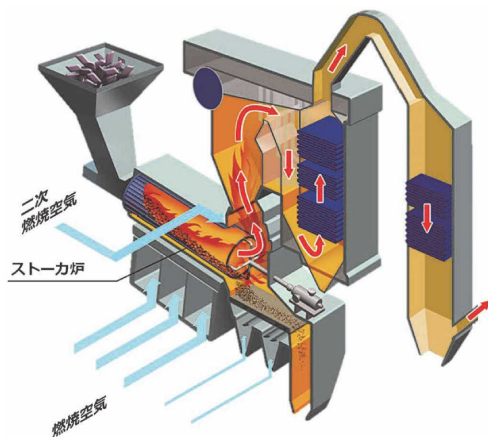


図1 回転ストーカ炉の概略

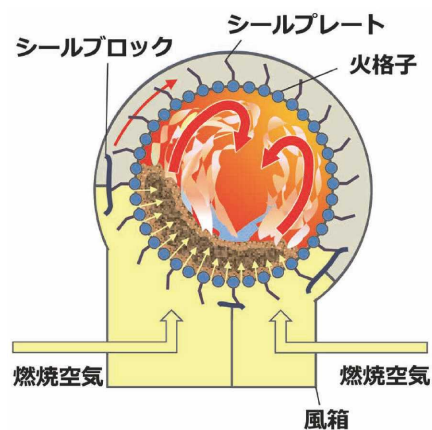


図2 回転ストーカ炉の断面

円筒形の回転ストーカ炉および後段の後燃焼ストーカ炉にて固体廃棄物を完全燃焼させる。回転ストーカ炉の火格子はボイラ水管とフィンで構成されており、フィンに設けた空気孔を介してゴミ層底部から燃焼空気が供給される。回転ストーカ炉の断面形状を図2に示す。水管による円筒面の凹凸はゴミの攪拌にも大きく寄与すると考えられることから、シミュレーションにおいては水管と粒子の接触力も考慮した。ただし、メッシュサイズや計算負荷を鑑みてフィンの空気孔は再現せず、燃焼空気は供給範囲から一様に炉内に流入する設定とした。

### 1.2 解析手法

解析には、汎用の熱流体・粉体解析ソフトウェアである「R-FLOW」を使用した。ゴミを模擬した球形粒子には水分、灰分、揮発分、固定炭素の比率および元素組成を与えており、炉内にて乾燥、熱分解、チャー燃焼反応が順に進行する。また、粒子は各反応による質量減少にともない、その粒子径も徐々に小さくなる。

## 2. 炉内のごみ滞留時間の比較 (施設1)

### 2.1 解析条件






回転ストーカ炉内でのゴミの挙動を検証するため、回転円筒部のみを対象とした解析を実施した。解析に使用した主な条件を表1に示す。解析条件は、後述する炉内滞留時間の測定を実施した実施設の運転を模擬している。解析形状についても、該当施設の回転ストーカ炉の形状を再現した。

表1 解析条件 (施設1)

ゴミ処理量	t/d	91
ゴミ発熱量	MJ/kg	10
ストーカ炉回転速度	rpm	0.033
燃焼空気比 (回転ストーカ炉)	-	1.08



表2 滞留時間測定用のトレーサおよび測定結果

	H鋼	レンガ	コンクリート ブロック	鉄製キューブ	SUS製ボウル	
寸法	mm	100×100 ×幅50	100×100 ×H60	168×168 ×H141	φ150×H150 厚み3.2	
重量	kg/個	0.8	1.3	1.5	3.4	
重量	kg/個	0.8	1.3	1.5	3.4	約0.4
外観	-					
平均 滞留時間	min	116	125	119	101	91

## 2.2 実施における炉内滞留時間の測定

実施にて炉内へ複数の試験サンプルをトレーサとして投入し、回転ストーカ炉内での滞留時間を計測した。トレーサの重量や形状などの影響の有無を確認するため、5種類のサンプルを用いた。試験に使用したトレーサを表2にまとめる。ごみ投入位置近くのバーナハッチから各トレーサを投入した後、回転ストーカ炉からトレーサが排出されるのを炉内監視用の視窓から目視にて確認し、投入から排出までにかかる時間を計測した。各トレーサはそれぞれ5～10個ずつ投入し、平均の滞留時間を求めた。試験によって得られた滞留時間についても、表2にあわせて示す。重量が小さく流体抵抗を受けやすいSUS製ボウルは、炉内のガス流れを受けて後段に流されたため滞留時間が短くなったが、その他のサンプルの滞留時間は概ね120分前後であった。

## 2.3 解析結果

シミュレーションにより得られたごみ層形状を図3に示す。粒子の色は、図3(a)ではチャーの燃焼率を、図3(b)ではごみ粒子の滞留時間をそれぞれ示している。図3(a)から、ごみを模擬した粒子は反応の進行にともない徐々に径が小さくなっていることが確認できる。また、図3(b)に示す通り、炉外へ排出された粒子の平均滞留時間は116分であった。これは2.2節で述べたトレーサによる炉内滞留時間測定の結果と同程度であり、よく一致していると評価できる。

## 3. 炉出口排ガス組成の比較 (施設2)

### 3.1 解析条件

焼却炉の燃焼性能を評価する上では、ごみの動きのみならずガス相の状況も重要になる。そこで、別施設(施設2)にて回転ストーカ炉出口での排ガス組成分析を行い、シミュレーションによる再現を試みた。表3に解析条件を示す。解析条件は、排ガス

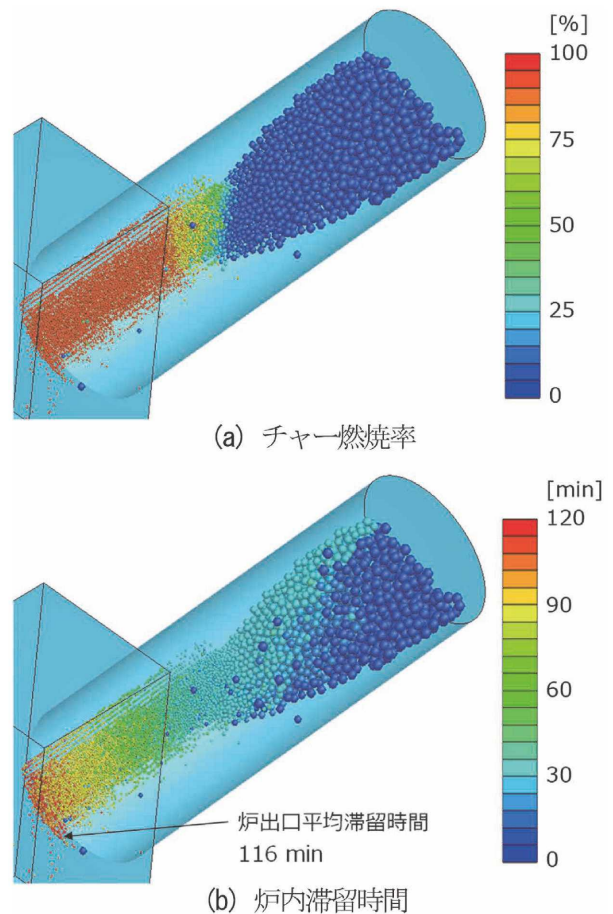


図3 解析で得られたごみ粒子層

表3 解析条件 (施設2)

ごみ処理量	t/d	123
ごみ発熱量	MJ/kg	11
ストーカ炉回転速度	rpm	0.025
燃焼空気比 (回転ストーカ炉)	-	0.70
燃焼空気比 (後燃焼ストーカ炉)	-	0.20

組成分析時の運転データをもとに決定した。回転ストーカ炉出口のガス組成は後燃焼ストーカ炉の影響も強く受けると想定されることから、施設2の解析では後燃焼ストーカ炉も対象とした。

### 3.2 解析結果と排ガス分析結果の比較

排ガス分析では、後壁に設置された視窓（炉出口①）および二次空気の予備ノズル（炉出口②）の2

か所からサンプリングノズルを挿入し、ガスを採取した。図4に、解析により得られたガス濃度カウンターとあわせて、各サンプリング位置を示す。また、表4には排ガス濃度の実測値と解析結果の比較を示す。炉出口②については、実測値と解析結果が大きく異なる結果となった。炉出口②のサンプリング位置は二次空気の供給前に位置しているものの、その

表4 排ガス濃度の実測値と解析結果の比較

		炉出口①		炉出口②		
		実測	解析	実測	解析	解析(解析出口)
O <sub>2</sub>	%-dry	9.6	9.3	3.0	0.0	2.2
CO <sub>2</sub>	%-dry	9.4	10.4	15.4	16.0	15.5
CO	%-dry	0.6	0.0	0.3	1.6	0.8
H <sub>2</sub>	%-dry	0.3	0.0	0.1	0.3	0.1
CH <sub>4</sub>	%-dry	<0.1	0.0	<0.1	0.5	0.2

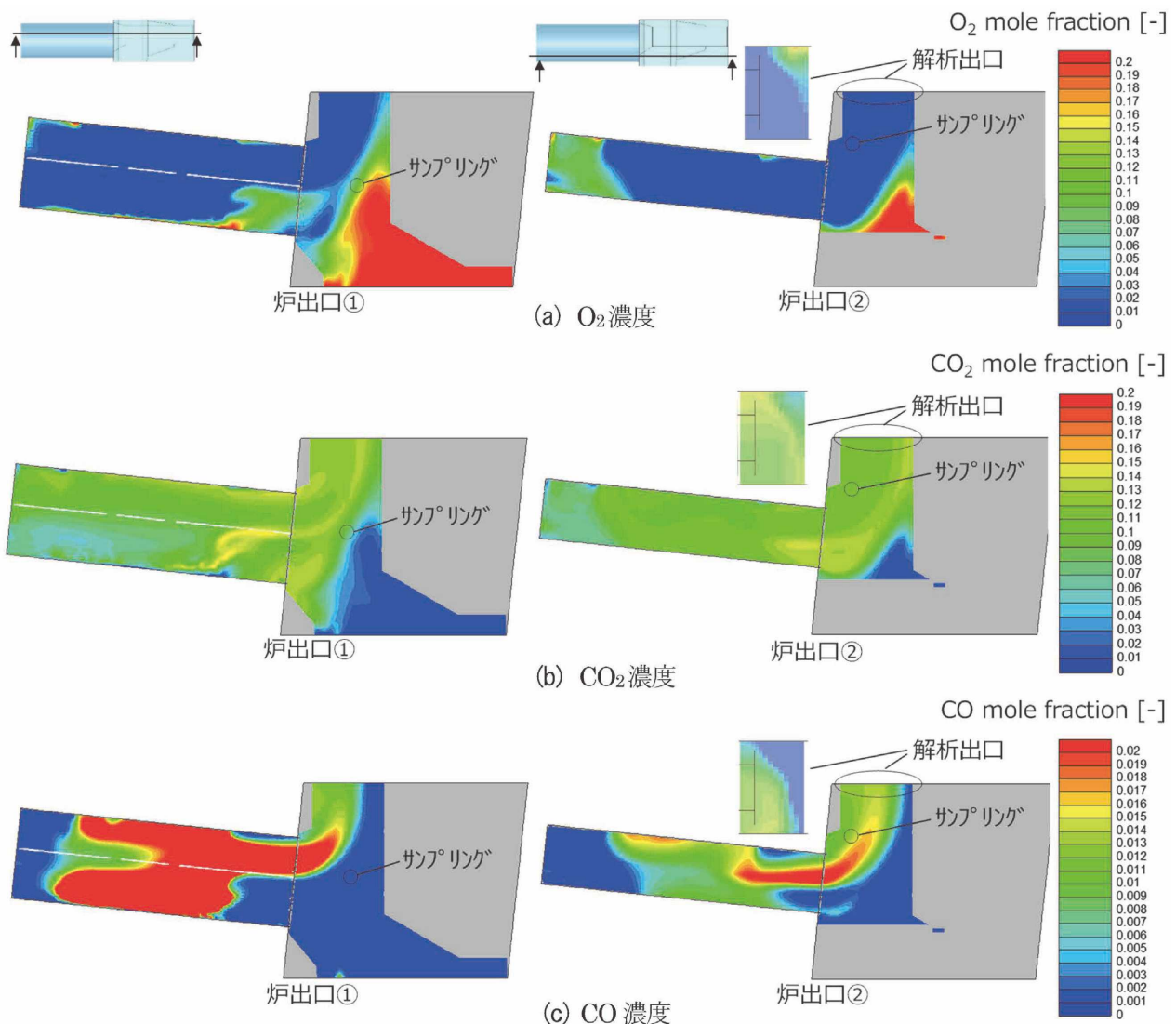


図4 解析で得られたガス濃度カウンター（モル分率）



すぐ直上で二次空気が供給されている。そのため、二次空気によってサンプリング位置付近のガスは攪拌、混合されていると推察される。しかし、シミュレーションでは二次空気を考慮していないため、二次空気によるガスの混合が再現されない。炉出口②での結果の差異は、この二次空気による攪拌の有無が要因と考えられる。そこで、表4には解析出口での平均ガス濃度もあわせて示した。解析出口の平均ガス濃度と炉出口②の実測値を比較すると、概ねオーダー感が一致した。このことから、混合され平均化されたガス濃度を想定すると、解析結果は実測値を比較的良好に再現できていると評価できる。

炉出口②の解析結果を解析出口で評価した場合、炉出口①、②とも特にO<sub>2</sub>およびCO<sub>2</sub>濃度については実測値とよく一致した。また、炉出口①の方が②に比べO<sub>2</sub>濃度が高い傾向も再現できており、その要因は後燃焼ストーカの押込空気であることが図4(a)から分かる。一方で、可燃ガスであるCO、H<sub>2</sub>濃度に関しては、炉出口①の解析結果はどちらも0%であり、実測値とはやや異なる結果となった。

### 3.3 粒子の解析結果

施設2の解析で得られたごみ層形状をチャー燃焼率で色分けしたものを図5に示す。図5の通り、本解析では回転ストーカ炉出口で大部分のごみ粒子が燃え切る結果となった。しかしながら、施設2では後燃焼ストーカ炉でも火炎が上がる様子が観察されており、実際には回転ストーカ炉出口では未燃分が多く残存しているものと推察される。また、施設2では施設1に比べ回転ストーカ炉の燃焼空気比を低

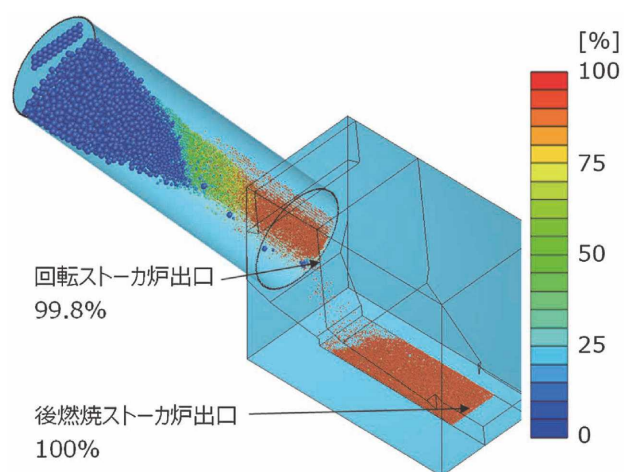


図5 チャー燃焼率で色分けしたごみ粒子層

く設定しているにもかかわらず、チャー燃焼率の分布は施設1(図3(a))と類似の結果となった。このように、現状の解析はごみ粒子の燃焼速度に関してはまだ再現できておらず、改善の余地がある。3.2節で述べた炉出口①での未燃ガス濃度の実測値との差異についても、本来は後燃焼ストーカ炉で放出されるはずの未燃成分が、解析では回転ストーカ炉内でほとんど燃え切ってしまうことが要因と推察される。

## むすび

実機規模の回転ストーカ炉を対象に、DEM-CFD連成解析による燃焼シミュレーションを実施した。また、実施設での測定値との比較により、シミュレーション結果の妥当性を評価した。

回転ストーカ炉内のごみ粒子の滞留時間は、トレーサを用いて実施設にて測定した滞留時間と良い一致を示した。

また、回転ストーカ炉出口の排ガス組成に関しては、実施設での排ガス測定結果と概ねオーダー感が一致する結果が得られた。特にO<sub>2</sub>およびCO<sub>2</sub>濃度については実測値と比較的良好に一致しており、測定位置による濃度差の傾向も再現することができた。一方で、ごみ粒子の燃焼速度は実現象との差異が大きく、まだ改善の余地がある。

数値シミュレーションは、各種測定が困難な炉内を可視化し、現象を理解するうえで非常に有効なツールである。このDEM-CFD連成解析による燃焼シミュレーションについても、引き続き比較検証を重ねて精度向上を図り、回転ストーカ炉の燃焼性能向上に貢献できるようブラッシュアップしていきたいと考えている。

### [参考文献]

- 1) 経済産業省：2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略(2020), <https://www.meti.go.jp/press/2020/12/20201225012/20201225012-1.pdf>, 2023年7月18日参照
- 2) 渡邊裕章ほか：第58回燃焼シンポジウム(2020)
- 3) 岩村宗千代ほか：第33回廃棄物資源循環学会発表会講演論文集(2022), p.307-308
- 4) 山井三亀夫ほか：精密工学会誌, Vol.84, No.7(2018), p.615-619
- 5) 鈴木崇之ほか：神鋼環境ソリューション技報, Vol.19, No.1(2022), p.26-30