

〈研究発表〉

気泡流動床式焼却炉における汚泥燃焼シミュレーション

服部 修 策¹⁾, 山本 昌 幸¹⁾, 竹田 宏²⁾
 栄 徳 剛²⁾, 堀尾 正 靱³⁾

¹⁾メタウォーター(株) 基盤事業開発部

(〒 475-0825 愛知県半田市前潟町1番地 E-mail: hattori-shusaku@metawater.co.jp)

²⁾(株)アールフロー (〒 340-0015 埼玉県草加市高砂1-10-5 E-mail: takeda@rflow.co.jp)

³⁾龍谷大学 教授 (〒 612-8577 京都市伏見区深草塚本町 67 E-mail: myhorio06@ca.wakwak.com)

概 要

汚泥焼却のための気泡流動層炉の新規開発において、設計にかかる時間や試験機製作コストを削減するため、数値解析により炉内流動状態と汚泥の燃焼特性を簡易に精度よく推定できるシミュレーターを開発した。本シミュレーターでは、層内粒子および汚泥をそれぞれについて代表粒子モデルにより基礎方程式を展開した。とくに汚泥については、乾燥、熱分解、燃焼にともなう状態変化に応じて汚泥内の付着力パラメータが変化するようにした。このモデルを用い、パラメータフィッティングを行うことで、間欠投入の場合だけでなく連続投入の場合においても、実際の汚泥燃焼試験結果を精度良く再現できた。

キーワード：下水汚泥、気泡流動焼却炉、DEM 解析、代表粒子モデル

1. はじめに

下水汚泥焼却炉の形式として、気泡流動炉が全体の約 50% を占め、最も導入されている形式となっている。近年では下水処理に対し、環境負荷低減対策として CO₂ 削減要求や、省エネルギー対策として化石燃料使用量や電力使用量の削減要求が出てきている。そのため、環境性能及び省エネルギー性能として優れ、ライフサイクルコストを低減できる焼却炉の開発が急務となっている。開発スピードが求められる状況であるが、従来の焼却技術開発では時間、費用が多くかかる状況にある。そこで、炉形状や各パラメータ変動による検討にかかる時間とコストを短縮する方策として、気泡流動炉シミュレーションソフトの開発に着手した。

2. 気泡流動炉の概要と特徴

銅板製の外筒の内側にキャストブル耐火、断熱材を施した耐火構造で、流動床部とフリーボード部より構成されている。流動床部には分散パイプが水平に挿入されており、このパイプに流動空気が送られると、パイプに均一配置された小口径ノズルより高速流の空気が噴出し、流動媒体（珪砂）を流動化させ、流動層を形成する。汚泥は流動床部に連続供給され、高温の流動空気と補助燃料を熱源とし、流動床部で乾燥、熱分解及び一部燃焼が進行し、フリーボード部で完全燃焼する。フリーボード部は 850℃ 以上の高温域であり、

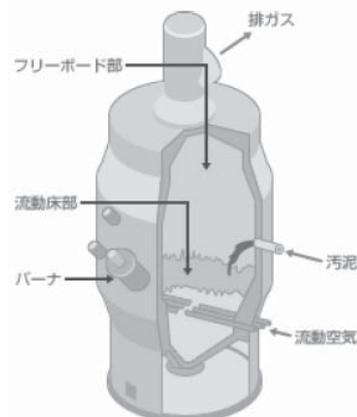


Fig.1: A typical bubbling fluidized bed furnace for sludge incineration.

ここで排ガス中のダイオキシンや温暖化ガスである N₂O が熱分解される。完全燃焼した後の排ガスと汚泥焼却灰は焼却炉上部より排出される。

気泡流動層は確立された技術であり、処理の安定性が高く、脱水汚泥を灰にすることで、重量を約 1/25 に減量できるという大きなメリットがあるため、依然としてニーズが高い。

3. 解析方法

3.1 シミュレーター開発の進め方

今回の汚泥燃焼シミュレーターは、(株)アールフローの熱流体・粉体解析ソフトウェア「RFLOW」を使用

した。従来の流動炉内温度や排ガス性状解析には熱物収支を一般式で解くだけであったが、本ソフトでは代表粒子モデル¹⁾に基づくDEM解析により、汚泥粒子、流動媒体粒子の運動や衝突による割れ、温度や状態変化による物性の変化を再現する化学反応や物理現象については極力既存の速度式等を用いた。汚泥粒子の形や大きさを支配する付着力は、水分量、熱分解時のタール生成などにより変化することが予想されるが、これまでそれに関する基礎データの報告はない。このような、式として表現できない現象については、相関式を仮定し、式中のパラメータで自由度を確保し、感度解析、マクロな実験データへのフィッティングによりそれらの値を調節した。シミュレーターのバリデーションとパラメータフィッティングは、まずは単位汚泥を炉内へ供給した場合のパイロット試験結果を用い、完全燃焼するまでの現象について行い、こうして得られたパラメータの値を元に、汚泥連続投入試験についてバリデーションを行った。

3.2 計算モデル

(1) パルス試験

パルス試験解析に使用したパイロット試験装置をFig. 2に示す。反応層には循環流動炉のライザー部分を使用した。ライザーを使用した理由は、パルス試験では、試験ごとに層内温度を昇温させる必要があるため、試験に必要な汚泥、流動媒体の量を少なくできることで、昇温時間と反応時間を短縮することができるためである。汚泥は砂層上部の炉側面より、ポンプより排出された円筒形状のものを手で供給した。評価項目として、炉の高さ方向の炉内温度、炉出口排ガス組成を測定し、連続的にデータ収集を行った。

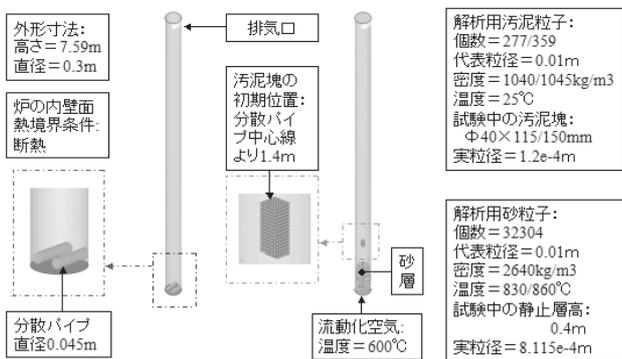


Fig.2: Experimental conditions of pilot tests for pulse feeding of sludge.

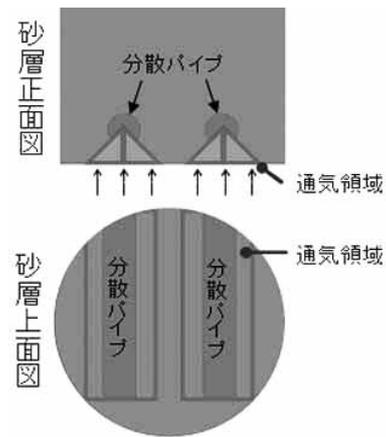


Fig.3: Air distributor arrangement

(2) 連続試験

連続試験解析に使用した設備をFig. 4に示す。反応層には角型の気泡流動炉を使用した。炉内へは、流動空気他、汚泥が容積式高圧ポンプにより連続的に供給され、また、炉内温度保持のために、補助燃料(LNG)が供給される。流動空気の吹き込み条件は、パルス試験解析のFig. 3同様、分散パイプ下部の流動層底面より、部分的に発生するよう条件を与えた。評価項目として、パルス試験と同様に、炉の高さ方向の炉内温度、炉出口排ガス組成を測定し、連続的にデータ収集を行った。

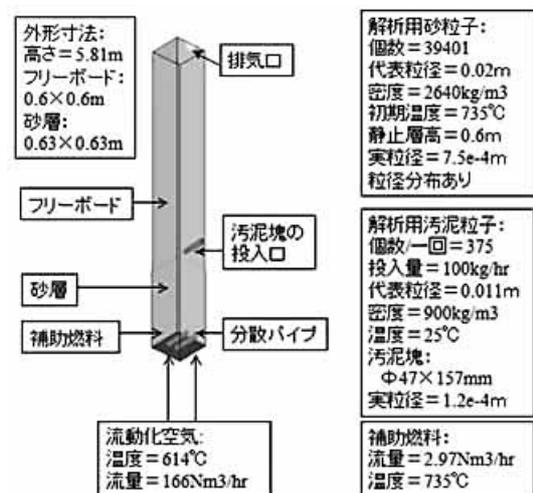


Fig.4: Experimental conditions of continuous sludge feed

4. 解析条件および結果

4.1 パルス試験

(1) 解析条件

パルス試験の運転条件及び供給汚泥条件を、それぞれ **Table. 1, 2** に示す。実験では、補助燃料（都市ガス）を使用して、砂層温度を 800℃ まで昇温し、燃料をカットした後に汚泥を供給し、高温の流動空気との反応を確認した。炉内での熱反応が完了したことを判断する基準は、炉出口排ガス性状が空気と同等性状となるまでとした。

Table.1: Combustion test conditions of pulse sludge feeding

汚泥供給量	g	200
汚泥形状	—	φ 50mm × 150mmL
流動空気量	m ³ N/h	80
流動空気温度	℃	600

Table.2: Sludge analyses

含水率	% WB	80.6	
可燃分率	% DB	85.2	
灰分	% DB	14.8	
可燃分組成	C	% DB	47.5
	H	% DB	7.0
	N	% DB	4.2
	O	% DB	26.0
	S	% DB	0.58
	Cl	% DB	0.06
高位発熱量	kJ/kg DS	18700	

(2) 解析結果

実験結果を **Table. 3** に、解析結果を **Figs 5~7** に示す。**Fig. 5** より、汚泥投入後 3.5 分で汚泥の乾燥が完了し、10 分程度で 95% 程度が燃焼し、サチュレートするという解析結果になった。**Table. 3** の実験結果と比較すると、ほぼ同等の燃焼時間が再現できた。

Figs 6, 7 より、汚泥乾燥完了後、細粒化が急激に進み、それに伴い汚泥粒子温度が上昇していることがわかる。

Table.3: Experimental result of pulse sludge feeding test

汚泥乾燥時間	min	3.4
汚泥燃焼時間	min	10.3

※実験結果は同条件にて 9 回実施した平均値

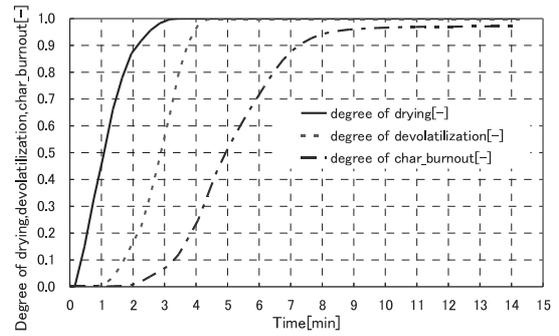


Fig.5: Progress curves of drying, pyrolysis and char combustion for the pulse feeding case

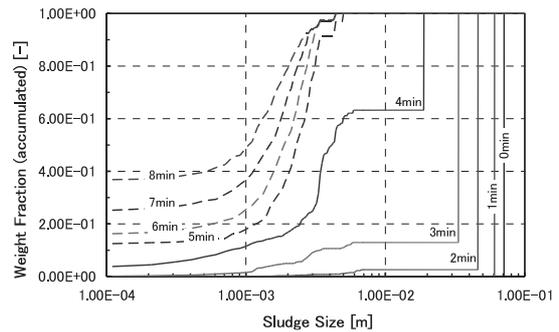


Fig.6: Transient behavior of the cumulative sludge size distribution in the bed for the case of pulse feeding.

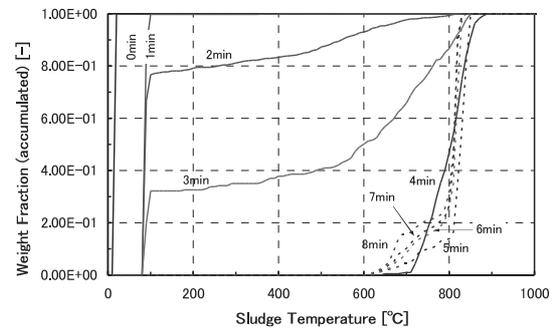


Fig.7: Transient behavior of the cumulative sludge temperature distribution in the bed for the case of pulse feeding.

4.2 連続試験

(1) 解析条件

連続試験の運転条件および供給汚泥条件を、それぞれ **Tables. 4, 5** に示す。汚泥はパルス試験のものと同じである。補助燃料（LNG）と高温の流動空気により砂層温度を維持し、一条件あたり 8~10 時間程度連続運転した。

Table.4: Experimental conditions of the test od continuous sludge feeding

汚泥供給量	kg/h	100
補助燃料供給量	m ³ N/h	2.97
流動空気量	m ³ N/h	166
流動空気温度	°C	614

Table.5: Sludge analyses

含水率	% WB	79.3	
可燃分率	% DB	82.5	
灰分	% DB	17.5	
可燃分組成	C	% DB	40.8
	H	% DB	6.4
	N	% DB	3.6
	O	% DB	31.6
	S	% DB	0.06
	Cl	% DB	0.06
高位発熱量	kJ/kg DS	18200	

(2) 解析結果

実験結果を Table. 6 に、解析結果を Figs 8~10 に示す。Table. 6 及び Fig. 8 より、炉内温度は 40 min 以降の安定状態において、良好な一致が得られた。

排ガス性状においても、Table. 6 及び Fig. 9 より、良好な一致が得られた。

また、Fig. 10 より、砂層での流動や熱反応過程において、汚泥が細粒化されている状況を確認することができ、これにより、燃焼反応速度や塊状汚泥粒子の温度分布を予測した炉設計を行うことが可能となった。

Table.6: Experimental steady state result of continuous sludge feeding test

炉内平均温度	°C	781
炉出口温度	°C	829
炉出口 O ₂	—	0.032
炉出口 CO ₂	—	0.068
炉出口 H ₂ O	—	0.43

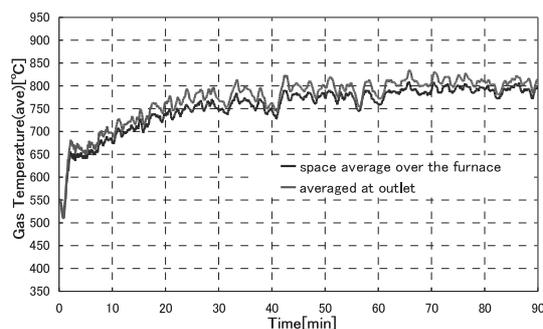


Fig.8: Gas temperature trend after start-up

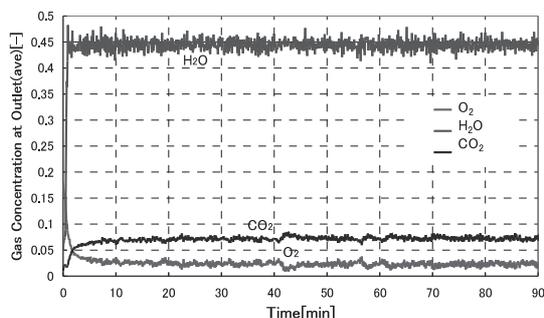


Fig.9: Gas concentration trends after start-up

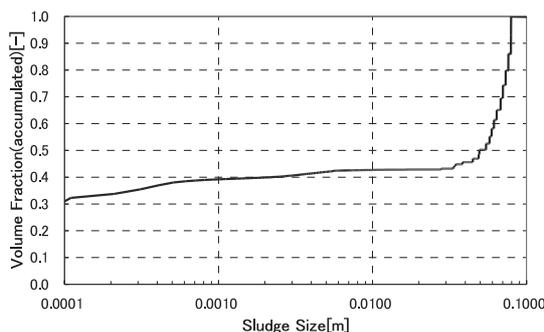


Fig.10: Volume based sludge size distribution in the bed (at 45min)

5. ま と め

パルス試験および連続試験のいずれにおいても、燃焼反応速度、炉内温度、排ガス性状について、実験結果を再現することができた。ほぼ全ての現象を一般式で構成し、汚泥粒子の付着力のみについて、パラメータフィッティングを行うことにより実現象を再現できたことから、本シミュレーターの妥当性は高いものと考えられる。実験では観測できない高温状態での炉内状況(砂層への汚泥の沈み込み状態や汚泥の細粒化過程など)を可視化することも可能となった。これらの結果より、炉の設計ツールとして、十分実用的なシミュレータを開発することができたと考える。

参考文献

1) K. Kuwagi, H. Takeda, M. Horio, The Similar Particle Assembly (SPA) Model, An Approach To Large-Scale Discrete Element (DEM) Simulation, Fluidization XI- Present and Future for Fluidization Engineering, U. Arena, R. C. Hirone, M. Miccio, P. Saratino, eds., pp. 243-250 (2004)