

回転表面溶融炉における燃焼反応を含む流体解析の適用

○金沢パウロ健一*、後藤謙治*、木村哲雄*

上林史朗**

* (株)クボタ 環境研究部
大阪市浪速区敷津東1-2-47

** (株)クボタ 焼却炉技術部
大阪市浪速区元町3-1-4 なんばAKビル

概要

回転表面溶融炉内の流れ、燃焼反応、輻射などの物理現象を表現できる熱流体解析手法の確立を目的として、種々の乱流モデルや燃焼モデルについて検討した。乱流モデルは Standard $k-\epsilon$ モデルが最も収束性がよく、燃焼モデルは PDF モデルよりも渦崩壊モデルの方が実際の現象に近い傾向を示した。解析結果と実測値を比較したところ、温度および CO、CO₂ 濃度に差が見られたものの、O₂、H₂O 濃度はよく一致しており、溶融炉内の現象がある程度予測可能であることがわかった。

キーワード

溶融炉、燃焼反応、流体解析

1 はじめに

ダイオキシン問題をはじめとする環境負荷低減の観点から、都市ごみ焼却残渣の中間処理方法として溶融固化方式が注目を浴びている。当社では、回転表面溶融炉を用いてこれら焼却残渣や下水汚泥などの無害化および減容化に取り組んでいる。

溶融炉内で起こっている現象は高温ガスの乱流をはじめ燃焼反応、輻射など非常に複雑であるが、これらの物理現象を把握することは、有害物質の分離・分解技術を向上させ、よりよいプロセスの開発を行う上で非常に重要である。本稿では、溶融炉内で実際に起こっている物理現象を表現できる熱流体解析手法を確立することを目的に、第一段階として解析の中の様々な物理モデルについて実測値との比較を交えて検討したので報告する。

2 回転表面溶融炉の構造

回転表面溶融炉は、都市ごみ焼却残渣をはじめ下水汚泥や焼却炉での処理が困難な廃プラスチックなど的高カロリー廃棄物を 1300~1400°C の高温で溶融し、ガラス質のスラグと重金属類が濃縮された溶融飛灰に分離する装置である。高温で燃焼するためダイオキシン類の分解率は 99% 以上である。

図 1 に表面溶融炉の構造を示す。被処理物は内筒と外筒の間の供給筒に充填されており、外筒の緩速回転によって、内筒全周から安定的に供給される。主燃焼室は、重油や都市ガスあるいは被処理物中の可燃分を熱源として約 1300～1400℃に保たれている。主燃焼室上部の天井には 120° 分割でバーナを 3 台配置しており、燃料と燃焼用空気は 3 台のバーナ部より供給される。主燃焼室内に供給された被処理物は乾燥、燃焼、溶融され、自然流下によりスラグポットを経てスラグピットに張られた水で急冷された後、溶融スラグとしてコンベアで系外に排出される。主燃焼室内で発生したガスは二次室、二次煙道を経て後燃焼室で完全燃焼され、排ガス処理設備へ送られる。

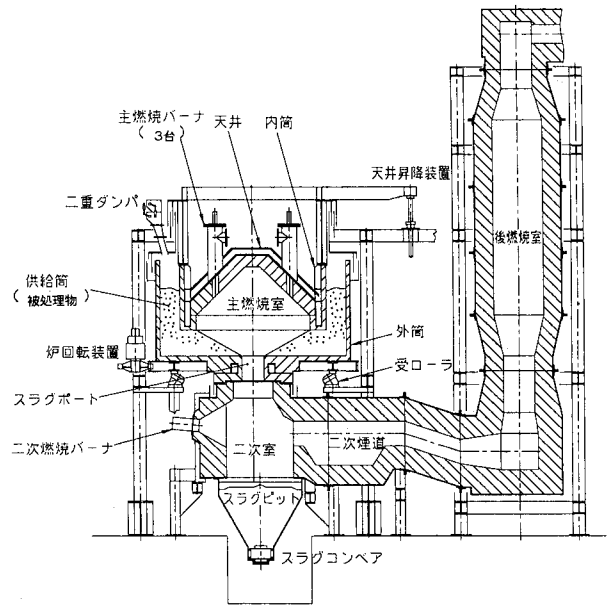


図 1 回転表面溶融炉の断面構造

3 解析

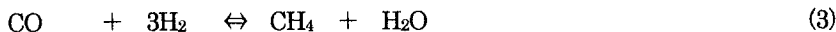
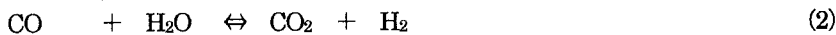
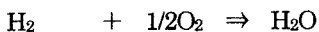
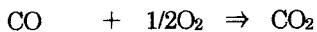
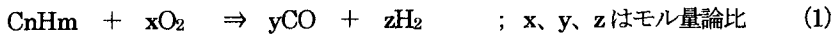
3.1 解析方法

(1) 解析手順

溶融炉での熱挙動を含むシミュレーションモデルを構築するための第一ステップとして、種々データが取得できている溶融炉実証プラント（主燃焼室内径 3.0m）を取り上げ、燃焼反応を含む流体解析を行った。解析では溶融炉内空間を約 28 万メッシュに分割し、種々の乱流モデルや燃焼モデルについて検討した。

乱流モデルでは工業的によく使用されている $k-\epsilon$ モデルを取り上げて検討し、収束性がよく経済的であることから Standard $k-\epsilon$ モデルを選択した。

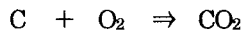
溶融炉内での燃焼は還元雰囲気で行われることがあるため、酸素の不足した状態での燃焼を表現できる燃焼モデルが必要である。ここでは流れが乱流であるため渦崩壊モデルと PDF モデルを検討した。渦崩壊モデルは燃料のガス塊と酸化剤のガス塊が崩壊して分子スケールの混合に達したときに燃焼反応が起こるとする考え方で、その反応速度は流れの渦が微小な渦に崩壊し消散する速度に比例するとし、その渦の中にある燃料塊が燃焼するというものである。¹⁾²⁾ 渦崩壊モデルでは次に示す反応式を設定した。



PDF モデルは混合律速の場合、温度や化学種濃度はその場の燃料と酸化剤の質量混合割合によって一義的に決まるとする考え方である。¹⁾ PDF モデルでは反応生成物として CH_4 、 C_2H_6 、 C_3H_8 、 C_4H_{10} 、 CO 、 CO_2 、 H_2O 、 H_2 、 N_2 、 O_2 、 OH の 11 種類の化学種を設定した。

被処理物の燃焼には微粉炭燃焼モデルを適用した。被処理物中の可燃分は揮発分と固定炭素分に分け、揮発分はプロパンと仮定した。揮発化反応モデルは Kobayashi³⁾ による Two-Rate Devolatilization

Model を使用し、チャーの燃焼反応は Baum & Street⁴⁾ による拡散+表面化学反応モデルを選択した。被処理物の燃焼過程は、最初に粒子の水分が蒸発し、次に揮発分がプロパンとして揮発する。揮発したプロパンは上述した式(1)にしたがって酸素と反応し、残った炭素分は次式により酸素と反応して粒子の表面で燃焼するとした。



(2) 解析条件

解析は溶融炉内が還元雰囲気である条件で行った。燃料として都市ガスを、酸化剤として高温空気を用いており、各条件は実証プラントでの運転条件と同様に設定した。解析条件を表1に、被処理物の設定条件を表2に示す。

表1 解析条件

	還元条件
都市ガス流量	205.23 [m ³ N/h]
都市ガス温度	30 [°C]
燃焼用空気量	2217 [m ³ N/h]
燃焼用空気温度	463.4 [°C]

表2 被処理物の設定条件

水分	177.5 [kg/h]
揮発分	7.81 [kg/h]
固定炭素分	25.23 [kg/h]
灰分	550.96 [kg/h]
Total	761.5 [kg/h]

3.2 解析結果および考察

まず気相反応のみで燃焼モデルを検討するため、被処理物を考慮しないで PDF モデルと渦崩壊モデルの比較を行った。

PDF モデルは計算時間、収束性の面では優れていたが、還元雰囲気であるにもかかわらず O₂ 濃度が二次室下部で不均一に分布しており実際の現象とは異なる結果となった。これは PDF モデルでは燃料と酸化剤の混合割合のみを求めれば、設定した化学種濃度が一義的に決まるとする考え方に起因するものと考えられる。一方渦崩壊モデルでは、設定した反応式毎に計算が必要となるため、計算負荷は大きく収束性も悪くなるが、O₂ が主燃焼室内でほぼ消費されており、実際の現象に近い結果が得られた。

こうしたことから、渦崩壊モデルを用いて被処理物を考慮したシミュレーションを行い、実証プラントで得られたデータとの比較検討を行った。被処理物は微粉炭燃焼モデルを用いて表現した。連続相に対して被処理物は LAGRANGE 法に基づく第二相の粒子として考慮し、スラグピットでのピット水の蒸発も第二相の水粒子として考慮した。その結果を以下に述べる。

図2に流速ベクトルを、図3に主燃焼室部を拡大したものを示す。バーナ部から供給される都市ガスと燃焼用空気は溶融面にぶつかり、主燃焼室内で上向流れを発生させている。またバーナが3台配置されているため、各々から供給される都市ガスと燃焼用空気の相互作用により、主燃焼室内の流れはかなり複雑であることが示されている。主燃焼室内で発生した排ガスはスラグポートで整流され、二次室出口より排出されている。二次室出口の排ガス量は 1.03kg/s であり、実測値とほぼ一致した。

温度分布を図4、図5に示す。燃焼反応により主燃焼室でのガス温度が上昇していることがわかる。主

燃焼室内の温度は実際の炉内温度 (約 1600K) よりも高い結果であった。これは被処理物の融解熱と冷却壁以外の壁からの放熱を考慮に入れなかったためであると考えられる。またスラグポート部での圧損は約 120Pa であり、実測値の 70~80Pa よりも高くなった。これは温度が実際よりも高くなっていることが原因と考えられる。

図 5 中の A 部に局所的な高温部が見られる。実際の炉においても A 部は熱的な負荷が高い箇所であり、実際の現象と一致する傾向を示した。

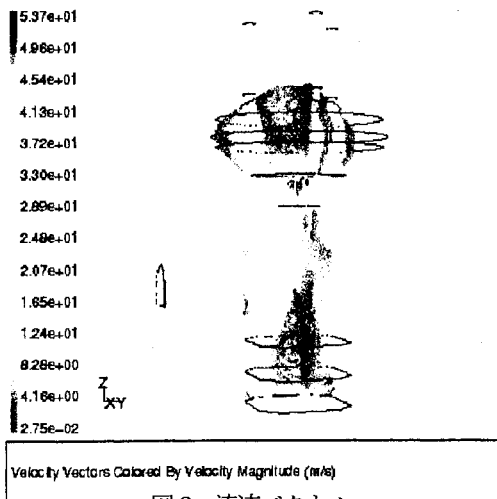


図 2 流速ベクトル

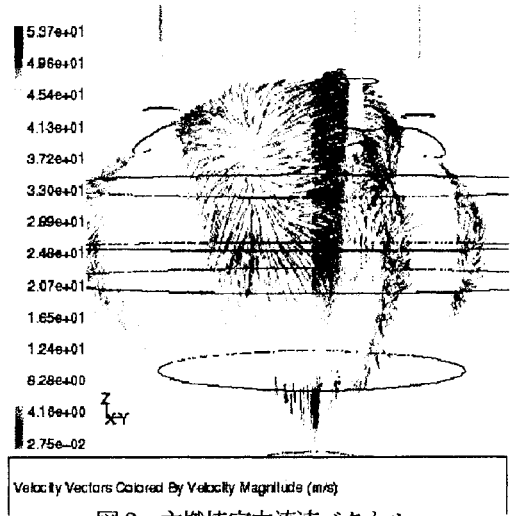


図 3 主燃焼室内流速ベクトル

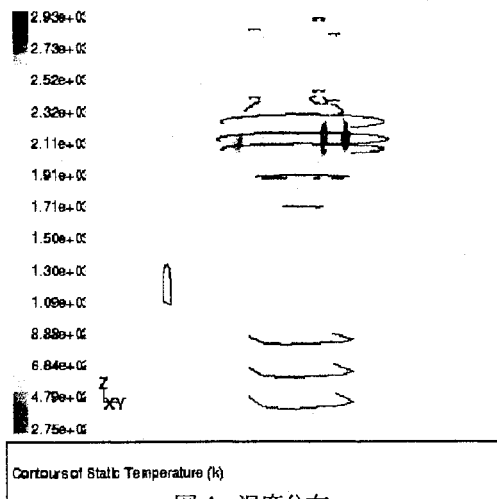


図 4 温度分布

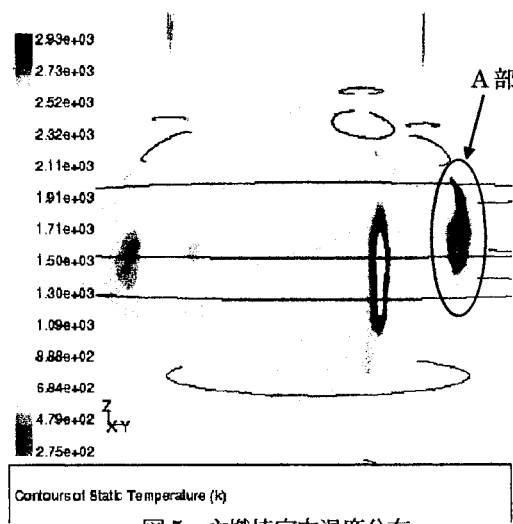


図 5 主燃焼室内温度分布

O₂、CO、CO₂、H₂O の濃度分布を図 6~9 に示す。バーナから供給される都市ガスと燃焼用空気中の O₂ とが反応し、燃焼が進行することにより O₂ が消費され、それに伴い CO、CO₂ が発生していることがわかる。発生した CO は溶融面付近まで到達しており、溶融面付近がスラグポート部に比べ強い還元状態

となっている。

被処理物中の水分が蒸発している影響で、被処理物供給部付近で水分濃度が高くなっている。また二次室下部では、スラグピット水の蒸発の影響により水分濃度が高くなっている。

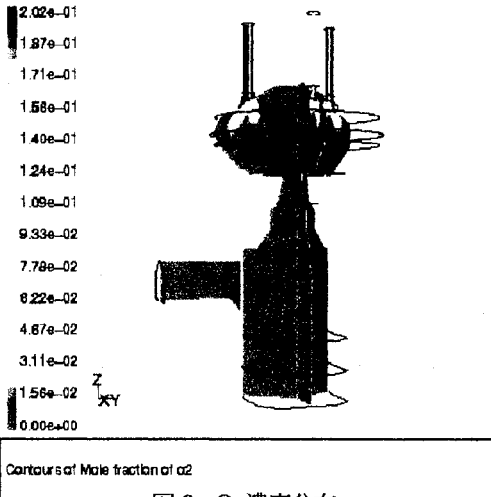


図6 O₂濃度分布

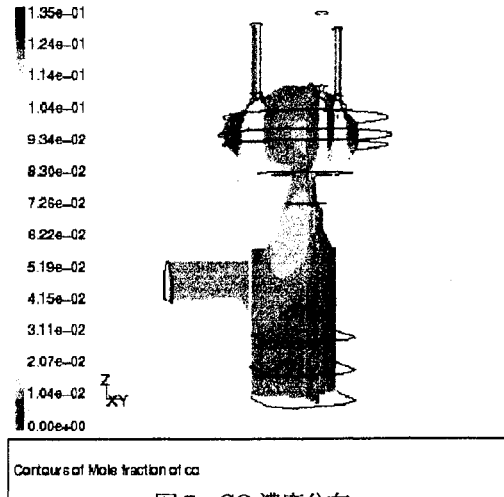


図7 CO濃度分布

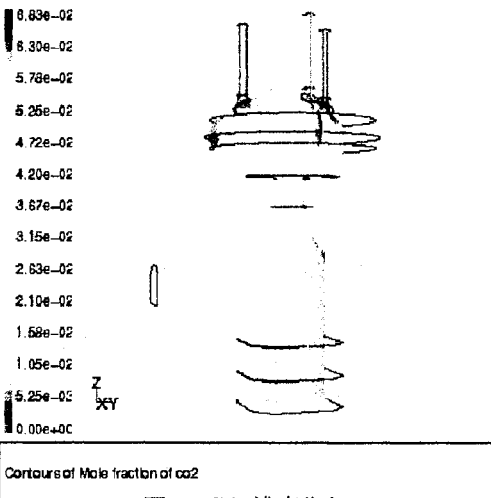


図8 CO₂濃度分布

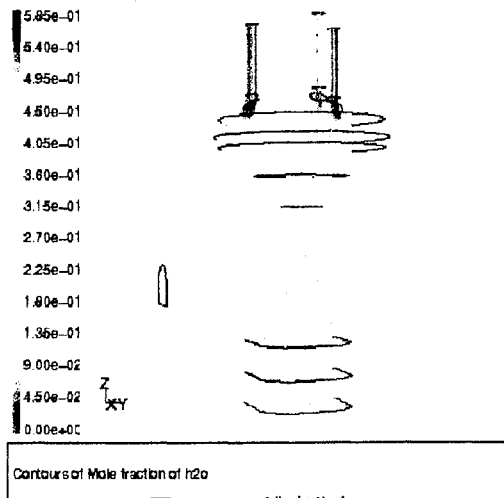


図9 H₂O濃度分布

表3に二次室出口での排ガス成分の解析結果と実測値を示す。O₂濃度やH₂O濃度については実測値とよく一致しており、これらの反応に関わるパラメータの設定は実際の現象を表現できているものと考えられる。またCO濃度で若干の差があり、CO₂濃度で大きな差が見られる。解析結果では、二次室出口でCH₄が2%程度存在しており、COの一部がCO₂ではなくCH₄へと変換されるメタネーション反応(式(3)の正反応)が実際よりも進んだことが原因と考えられる。式(2)や式(3)に関するパラメータの設定や異なる反応式の追加を検討する必要がある。

表3 二次室出口における排ガス成分比較

	O ₂	CO ₂	CO	H ₂ O
計算結果 [vol%]	0	1.06	1.06	24.3
実測値 [vol%]	0.15	7.35	2.05	23.4

4 まとめ

回転表面溶融炉を対象に、実際のプラントで得られたデータをもとに、燃焼反応を含む流体解析を試みた。现阶段で工業的によく使用されている乱流モデルおよび燃焼モデルについて、実測値を交えて比較検討を行った結果を以下にまとめる。

- ① 乱流モデルは Standard $k-\epsilon$ モデルが最も収束性がよく経済的であった。
- ② 気相反応のみで燃焼モデルを検討するために、被処理物を設定せずに PDF モデルと渦崩壊モデルを比較した結果、PDF モデルは計算時間および収束性の面では優れていたものの、O₂ 濃度分布が実際の現象と異なる結果となった。一方、渦崩壊モデルは計算負荷は高いものの、O₂ の挙動が実際の現象と一致する傾向を示した。
- ③ 渦崩壊モデルを用いて被処理物も考慮に入れた解析を行い実測値と比較した結果、二次室出口の排ガス量は実測値とほぼ一致した。また二次室出口の CO および H₂O 濃度は実測値とよく一致しており、これらの反応に関わるパラメータの設定は実際の現象を表現できているものと考えられる。CO および CO₂ 濃度に関しては実測値と比較して差があるため、都市ガスの燃焼過程に関するパラメータおよび被処理物の燃焼に使用した微粉炭燃焼モデルに関するパラメータの検討が必要である。

今回の解析により、溶融炉内の現象がある程度予測可能であることがわかった。引き続きプラントでの実測値と比較検討を行いながら計算精度を高め、実際の現象を表現できる解析手法を確立し、ダイオキシンをはじめとする有害物質の分離・分解技術の向上に貢献していきたい。

[参考文献]

- 1) 燃焼・希薄流・混相流・電磁流体の解析、東京大学出版会
- 2) Magnussen, B.F. and Hjertager, B.H. : On Mathematical Models of Coal Combustion, The Comb. Institute, (1976)
- 3) Kobayashi, H., Howard, J.B., and Sarofim, A.F. : Coal Devolatilization at High Temperatures, The Comb. Inst., (1976)
- 4) Baum, M.M., and Street, P.J. : Predicting the Combustion Behavior of Coal Particles, Combust. Sci. Tech., (1971)