

(解説)

燃焼シミュレーション技術で環境保全に貢献する

須鎗 護・西村 真(工博)・秋山勝哉

技術開発本部・機械研究所

Environmentally-friendly Combustion Simulation Technology

Mamoru Suyari・Dr. Makoto Nishimura・Katsuya Akiyama

Reducing the amount of toxic combustion products produced by municipal incineration plants can only be achieved through new combustion technology. Though incinerator combustion phenomena are complicated and hard to predict, evaluation and optimization of combustion performance with combustion simulation technology has begun to influence incineration development and design. This paper presents Kobe Steel's combustion simulation technology.

まえばき = わが国における都市ごみ処理は、優れた減容化・安定化方法である焼却が主流となっている。当社においても流動床式焼却炉、ストーカ式焼却炉、流動床式ガス化熔融炉、それにプラズマ熔融炉など焼却・熔融設備による適正処理技術の開発を行ってきた。

都市ごみ焼却施設から排出されるダイオキシン類、NO_xなど有害燃焼生成物の抑制に関しては燃焼技術の優劣が環境保全と密接な関係にある。

都市ごみ焼却炉の開発・設計段階で、炉内燃焼状態を燃焼シミュレーションにより予測し最適化する手法が徐々に採用されつつある。燃焼現象は温度とともに反応速度が急激に変化し、また燃焼中間生成物も多いために、現在でも正確なシミュレーションは困難であるが、環境保全のための燃焼制御技術の向上につなげるべく技術が進化しつつある。

1. 都市ごみ焼却炉における燃焼シミュレーション

燃焼のシミュレーションは広範囲に及んでおり、ここでは、都市ごみ焼却炉における燃焼シミュレーションについての現状を紹介する。都市ごみ焼却炉における燃焼シミュレーションの概念を図1に示す。

焼却炉は大きく2つの部分に分けて考えることができる。一つは、投入された都市ごみの下部から燃焼空気が供給されごみが加熱・乾燥・熱分解・燃焼する部分で、流動床焼却炉では流動層、ストーカ式焼却炉ではごみ層に相当する部分である。残りはその上部に位置する空間で、下部で発生した熱分解ガス、未燃カーボンなどが炉壁を通して供給される2次燃焼空気と混合しガス燃焼(2次燃焼)する部分で、2次燃焼領域と呼ばれる。

燃焼シミュレーションは固体の燃焼を解析対象とする方法と、ガス相での燃焼を解析する方法、それらを連成させて焼却炉全体を解析する方法に、大きく分けることができる。

固体の燃焼は、適用する燃焼機器の燃焼方法と廃棄物の種類により大きく異なるため、各社、自社コードを開発して解析に取り組んでいる。しかし、その基本となる部分は図1の下部に示した単一粒子の燃焼解析モデルであ

り、廃棄物の1物質を取出し、熱伝達・熱分解・燃焼を解析する。このモデルを組み込んで固体燃焼コードが作成されている。

例えば、流動層燃焼の場合には流動層における砂の流れを解析するコードに上記燃焼解析モデルを組み込み、熱の授受とガスの発生を計算する。発生したガスは一部砂層内で燃焼し、砂層上部の2次燃焼領域に排出される。

一方、ガス相の燃焼解析には対象機器の流れ場全体の流動伝熱燃焼を同時に解析する手法と素反応まで立返り火炎面近傍を詳細に計算する手法がある。流れ場全体の解析は固体燃焼部分から発生する熱分解ガス・燃焼ガス、水分などの混合気を入口境界条件として与え、未燃ガスと2次空気の混合・反応と壁面への熱の伝達などを解析するもので、最近の汎用コードで解析可能な領域である。ガス相の燃焼反応をより詳細に記述するには、CHEMKINパッケージなど評価の定まった詳細反応計算コードがある。化学種の熱物性値が温度の関数としてデータベース化されて内蔵されており、設定した雰囲気条件での注目する化学種の燃焼挙動を解析する手段として使用されている。

以下に当社の燃焼解析技術と、それによる都市ごみ焼却炉への適用について紹介する。

2. 固体の燃焼シミュレーション

廃棄物は種々雑多な物質の混合物であり、その成分の時間的・空間的変動が大きく、安定な燃焼を実現することは非常に重要な課題である。固体燃焼特有の熱分解・燃焼挙動を理解して燃焼のモデルに反映させることが必要であり、同時に、適用する燃焼機器の燃焼方法により、固体の昇温速度・雰囲気ガス組成・サイズなどが異なり、その効果を考慮したモデル化が必要になる。

当社では国の補助を受け、NEDOの「高温空気燃焼制御技術研究開発プロジェクト」として、廃棄物を構成する物質の熱分解・燃焼基礎データを取得し¹⁾、アレニウス型反応速度式の実験定数として公表している。また、その基礎データを用いた単一粒子の伝熱・熱分解・燃焼モデルを構築している。図1下部に示すとおり、ごみを

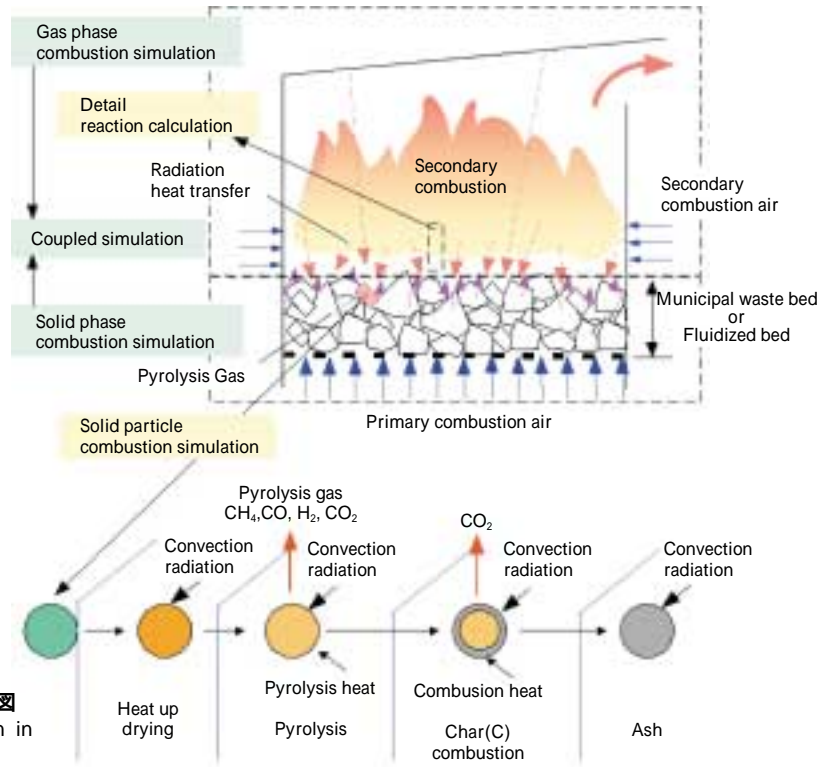


図1 都市ごみ焼却炉内燃焼シミュレーション概念図
Fig. 1 Schematic diagram of combustion simulation in municipal solid waste incinerator

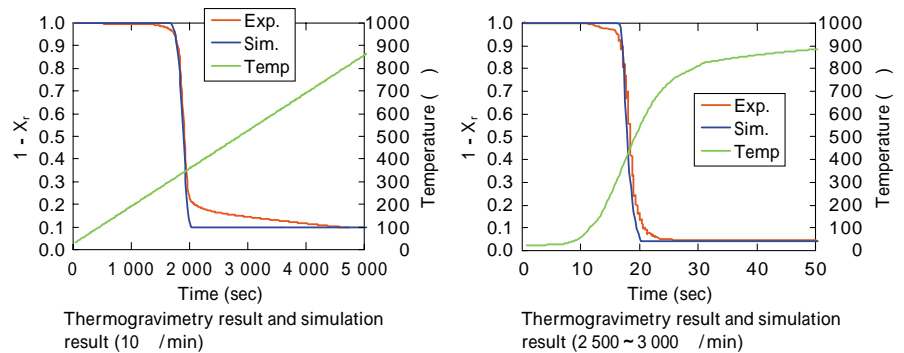


図2 単一固体粒子の熱分解シミュレーション結果
Fig. 2 Results of pyrolysis simulation for single solid particle

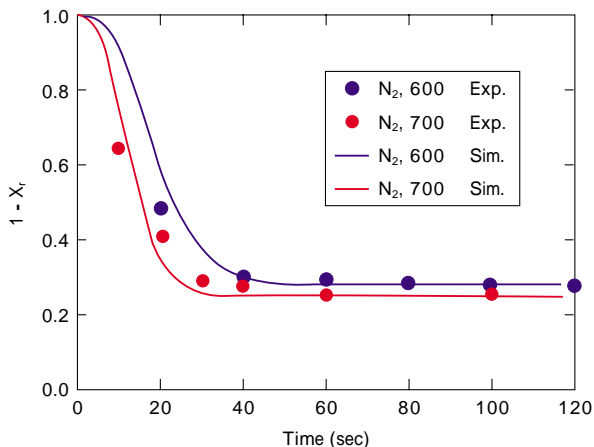


図3 単一固体粒子の流動層内熱分解シミュレーション結果
Fig. 3 Pyrolysis simulation results of single solid particle in fluidized bed

単一の球形粒子と考え、外部との伝熱と自身の熱分解を解析するもので、図2に本モデルによるセルロースの熱分解シミュレーション結果を示す。10 /min で昇温したときのセルロースの温度と未反応率(1 - X_r)の熱分解結果を再現できることを確認した後、その熱分解速度を用いて、流動層における被焼却物の加熱速度に匹敵す

る約2500 ~ 3000 /min の昇温速度での熱分解を予測した結果、温度と未反応率の関係を良好に予測できていることがわかる。

この単一粒子燃焼モデルを用いて、ごみ粒子と砂の熱伝達率 200W/(m²・K) を与えることによる流動層内熱分解を想定して計算を行った結果を図3に示す。実験結果は、所定の温度に維持した流動層に、乾燥し、計量したドッグフード粒子を投入し、所定時間で引上げ、クエンチした後計量して熱分解・燃焼速度を得たものである。流動層内での粒子の燃焼を良好に予測できることがわかった。これらの実験に裏付けられた解析により、廃棄物を構成する物質の熱分解・燃焼の基礎データがあれば、その物質の流動層内燃焼挙動が予測できるまでになっている。流動層内の流動砂の動きは2相モデル²⁾と言われる手法で実験式に基づき表現し、固体の燃焼部分には上記燃焼モデルを組み込んで燃焼シミュレーションに使用している。

この解析は、例えば、下水汚泥などの低発熱量廃棄物用焼却炉形状の適正化、あるいは、単位砂層容積当たりの都市ごみ投入負荷が大きい流動層ガス化炉の適正な形状と寸法の決定に使用していく予定である。

3. ガスの燃焼シミュレーション

都市ごみ焼却炉からのダイオキシン類排出抑制のためには、3 T と呼ばれる、1) 燃焼温度の高温維持 (Temperature), 2) ガス滞留時間の確保 (Time), 3) 混合攪拌の確保 (Turbulence) の3種類のパラメータが重要と言われている。この3つのパラメータのうち、燃焼温度は炉の運転条件 (被焼却物発熱量, 空気比など) により予測可能であり、滞留時間はその温度とガス量から所定の時間がとれるようにサイジング可能である。

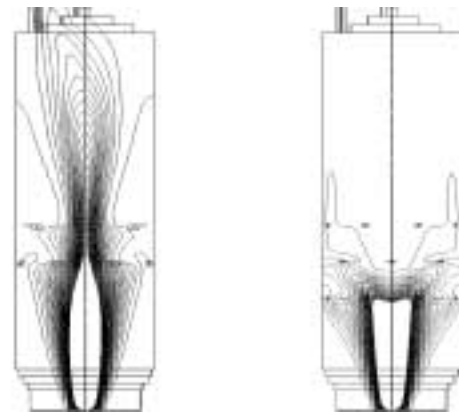
当社では、最も重要な未燃ガスと2次空気の混合に対しては、他の2つのパラメータのような簡易予測が困難であるために、シミュレーションを駆使した2次燃焼の適正化を10年以上前から実施し、並行して計算結果の検証にも注力してきた。燃焼シミュレーションに十分な精度を確認できなかった時期には、非燃焼混合計算を実施し、混合度合いを評価するパラメータを提案して2次空気の吹込み方法を適正化してきた³⁾。

図4に空気吹込み方法を変化させた場合の炉内CO分布を示す。中心部白抜部がCO高濃度域を示す。a)は2段吹込みで下段を回転させ、上段は半径方向吹込みとしているが、半径方向吹込みの貫通力が弱く中心部分を砂層から発生した未燃ガスが吹抜ける結果となっている。b)の3段吹込みは図5に示す構造となっており、この効果は、最下段の旋回吹込みにより砂層表面から噴出する未燃ガスを中心に集める役割を持ち、中段の半径方向吹込みで未燃ガスの中心部吹抜けを阻止する。半径方向に広がった2次空気と未燃分を上段の逆旋回吹込みで混合する。

各段の空気流量配分を適正化することにより、砂層からの未燃ガスが局所に片寄っても、あるいはパルス的に振れても完全に混合することが可能な炉を実用化できた。

燃焼も含めたシミュレーションでの精度向上のために、基礎実験と燃焼シミュレーションの対比を行い乱流モデルと燃焼モデルの検証を実施した後⁴⁾、ごみ供給方法がほぼ同一で処理量の異なる実稼働炉数炉の排出ガス組成実測値とシミュレーション結果の対比を行うことで、出口CO濃度実測値による渦消散モデルの反応速度定数 (Magnussen constant A) の推定を行い図6に示す関係を得た⁵⁾。これにより、ダイオキシン類排出濃度と相関があると言われる排ガス中CO濃度を精度良く予測可能となった。

環境負荷低減のための次世代型ごみ処理システムとして開発した流動床式熱分解ガス化熔融システムでは、流動床式焼却炉の1次燃焼空気を投入したごみの理論燃焼空気の30~50%に絞り、ごみを部分燃焼して発生した熱分解ガスを直結した熔融炉に導入して1250以上の高温で燃焼させることにより、ごみの持つ灰分を熔融・減容すると同時にダイオキシン類を熱的に分解する炉である。ガス化炉から流入する大量の低発熱量ガスを熔融炉内で所期の温度分布で燃焼させるために、炉サイズ、熱分解ガス・燃焼空気の導入口形状などの決定・適正化



a) Existing secondary air supply b) Proposed secondary air supply

図4 2次燃焼部非燃焼混合シミュレーション結果(COコンター図)
Fig. 4 Mixing simulation results in secondary combustion zone of fluidized incinerator

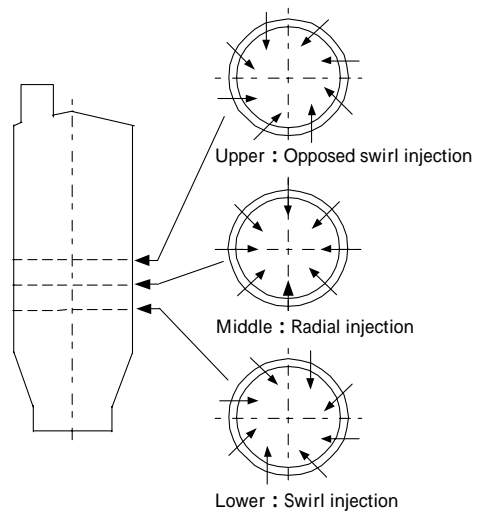


図5 新型2次空気吹込み方法
Fig. 5 Proposed method of secondary air injection

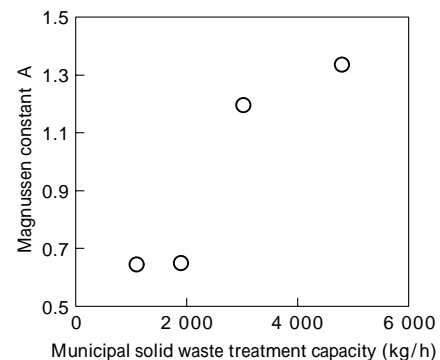


図6 都市ごみ処理量と反応律速定数の関係
Fig. 6 Effects of treatment capacity on reaction rate constant

をシミュレーションで行った。

図7にその結果の一例を示す。速度ベクトル図は全体的な性能低下に及ぼす偏流などの存在チェックに使用し、また、炉頂部分の詳細流れの理解の参考としている。温度コンタ図の炉頂部白抜きの部分は、1600以上の温度領域である。安定した燃焼・熔融を維持するためには炉頂温度を上げる必要があり、設定した軸方向温度分布が達成されるように、熱分解ガス及び燃焼空気の吹込み方法、吹込み位置を適正化した。この種の計算は、耐火物それに外部冷却機構まで含めた計算を実施しており、耐火物内面温度分布と炉内軸方向未燃の分布から熔融部

図7 溶融炉断面速度ベクトル図と温度分布図
 Fig. 7 Cross sectional velocity vector and temperature contour of swirl-flow melting furnace

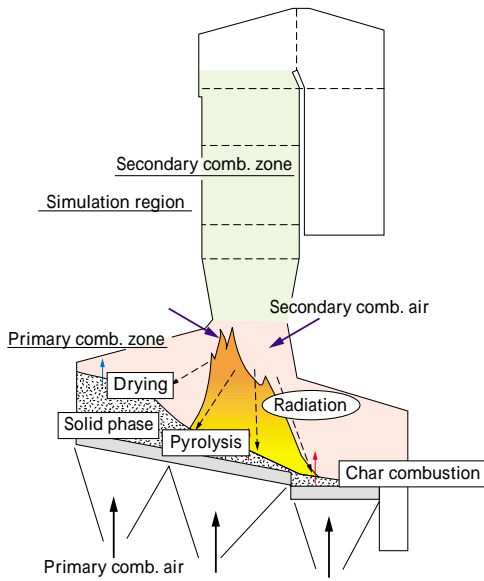
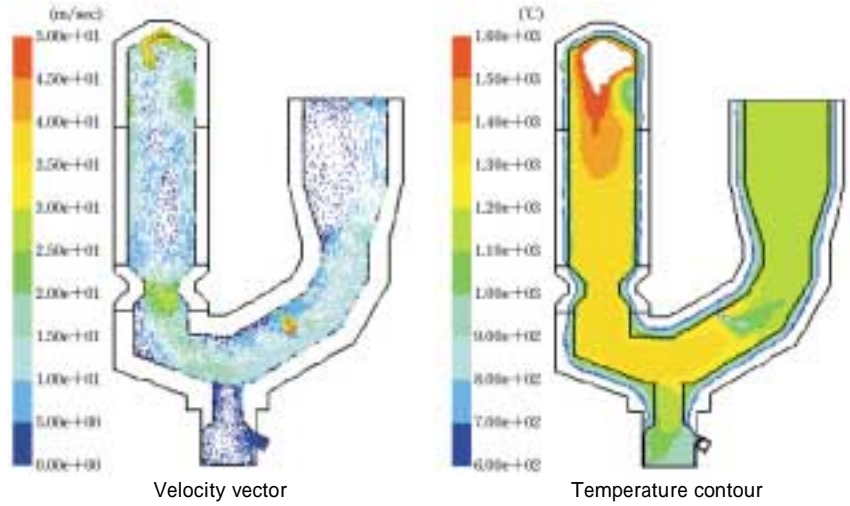


図8 ストーカー炉での燃焼
 Fig. 8 Schematic diagram of MSW combustion in stoker type incinerator

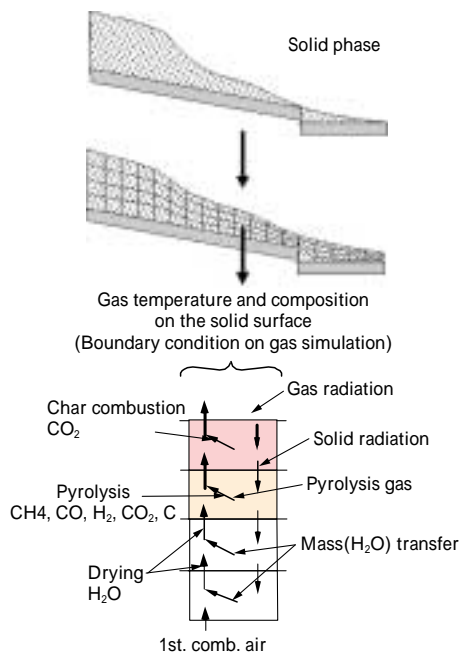


図9 ストーカー炉ごみ層解析概念図
 Fig. 9 Schematic diagram of solid phase combustion simulation

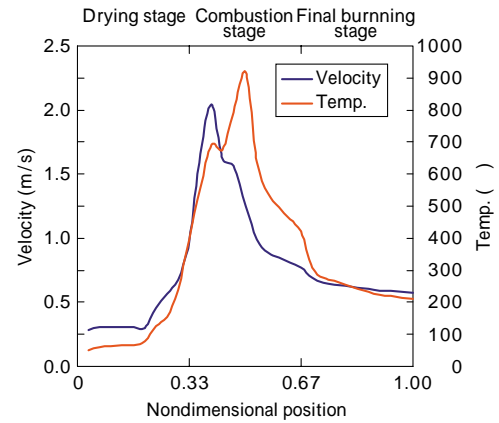


図10 ストーカー炉ごみ層解析結果(ごみ層表面ガス速度とガス温度)
 Fig.10 Coupled simulation results of stoker type incinerator (Gas velocity and gas temperature at solid phase surface)

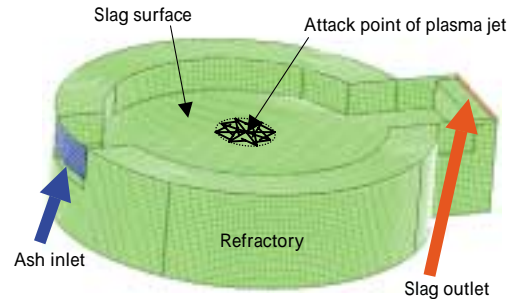


図11 解析領域
 Fig.11 Calculation domain of plasma melting furnace

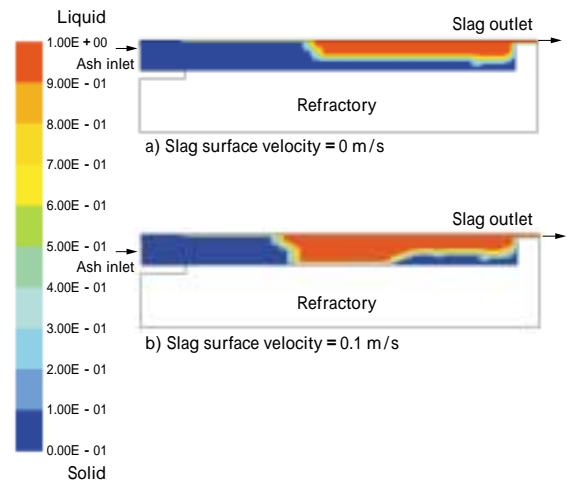


図12 熱流動解析結果 固液分布図
 Fig.12 Calculation result of plasma melting

分の容積（長さ）などの検討を行ってきた。さらには、スラグ捕集率向上 大型炉へのスケールアップ 種火バーナの設置位置検討などにシミュレーションを活用している。

ガス相での詳細反応解析については上記のとおり焼却炉の新しいコンセプト構築時の初期検討に使用している。CHEMKIN を使用した検討報告例は参考文献 6) で詳細に報告しているのでここでは割愛する。

4. 固体・ガス燃焼の連成シミュレーション

ストーカ式焼却炉は、低 NO_x 燃焼技術の開発など過去精力的に燃焼改善が行われてきたが、近年、ガス化溶融炉同様に環境負荷低減を目標とした新型ストーカ炉の開発が活発化してきた。

ストーカ式焼却炉では、火格子上でごみは順次下流に送られながら、乾燥・熱分解・燃焼・後燃焼している（図 8 参照）。ストーカ式焼却炉におけるごみ層の燃焼を簡易的に扱ったごみ層燃焼モデル解析を実施し、ごみ質あるいは運転操作と燃焼性能の関係などを適正化するために使用している。当社のごみ層解析モデルは、図 9 に示すとおりごみ層をごみの送り方向、ごみ層厚さ方向に数分割し、ごみ層表面は火炎、壁面からの輻射で加熱され、固体間には輻射伝熱、固体とごみ層中の気体間には対流伝熱を仮定して順次計算していくもので、前節で述べたガス相シミュレーションのための境界条件である流入ガス量、ガス組成、ガス温度などを求める。ごみ層解析の結果である流入ガス条件を使用してガスの燃焼解析を実施し、結果としてごみ層表面への輻射量を求め、それを境界条件として再度ごみ層を解析する。このように、ごみ層解析とガス燃焼解析とを連成させることにより、ごみ層・ガス相からなる炉全体の燃焼を解析している。

図10は、乾燥・燃焼・後燃焼段のごみ層表面から主燃焼室に噴出するガスの流速と温度の計算結果である。それぞれの位置でガス組成も計算しており、この結果をもって、ストーカ摺動方向のどの部分で主に固体の燃焼が進行しているかが判断できる。

5. プラズマ溶融炉における熱解析技術

廃棄物の焼却処理で発生する焼却灰、飛灰を減容化・利材化・無害化できる溶融固化処理が期待されており⁷⁾、溶融技術は環境保全という意味で有用である。当社では焼却灰・飛灰を溶融するプラズマ溶融炉を商品化してお

り、安定出滓、耐火物の長寿命化など溶融炉の最適な設計をするためには、溶融浴内部の流動シミュレーションによる浴形状の予測が重要となる。

金属類をはじめ様々な成分の混合物である焼却灰の熱物性・粘性・密度といった物性の温度依存性を適切に考慮することで、より正確なシミュレーションが可能となる。当社で実施しているこれら灰物性を考慮した凝固を伴う熱流動解析の一例を示す。溶融浴解析の範囲は図11に示すとおり、常温で溶融炉に入った焼却灰がプラズマジェットにより加熱・攪拌され、溶解したスラグが流動化して出滓口から出滓される。

図12に解析結果の例を示す。a)はプラズマジェットによる攪拌がない条件の結果であり、b)はジェットのせん断力で溶湯表面が0.1m/sの速度で流動する条件の結果である。ジェットによる溶湯の攪拌効果が加わると浴内部への熱移動量が増大し、スラグ浴の形状が異なってくるのが分かる。このシミュレーション手法を用いることで、スラグ浴形状は灰の性状、処理量、トーチ出力、炉形状を考慮した最適な炉設計となった。

むすび= 燃焼シミュレーションは都市ごみ焼却炉・灰溶融炉の開発・設計に欠かせないツールになりつつあるが、何処にどの程度の誤差を見込むかは実炉の計測による裏付けが必要である。当社では、汎用コード、自社コードを使用し、その精度検証に注力してきた。今後も検証を積重ねながら活用してゆきたい。

本報告の一部は、NEDO「高温空気燃焼制御技術研究開発プロジェクト」の一環として行われたことを記し、ここに感謝の意を表す。

参 考 文 献

- 1) 高橋和雄ほか：第38回燃焼シンポジウム講演論文集，(2000) p.271.
- 2) 小林晴夫ほか：化学工学，Vol.29 (1965) p.885.
- 3) 須舘 護ほか：1993 環境工学総合シンポジウム，(1993) p.130.
- 4) 北村竜介ほか：R&D 神戸製鋼技報，Vol.43, No.2 (1993) p.79.
- 5) 小山謙一ほか：第7回廃棄物学会研究発表会講演論文集，(1996) p.618.
- 6) 西村真ほか：R&D 神戸製鋼技報，Vol.51, No.2 (2001) p.8.
- 7) 古角雅行：廃棄物学会誌，Vol.5, No.1 (1994) p.46.