都市ごみ焼却炉における燃焼特性*

(第1報, 燃焼状態把握のための実験とシミュレーション)

石 見 忠 之^{*1}, 小 山 正 晴^{*2}
東 村 一 弘^{*3}, 平 山 直 道^{*2}

Combustion Characteristics in a Municipal Solid Waste Incinerator (1st Report, Field Test and Computer Simulation for Combustion Characterization)

Tadayuki ISHIMI, Masaharu KOYAMA,
Kazuhiro HIGASHIMURA and Naomichi HIRAYAMA

The purpose of this work is to investigate design and operation methods for a municipal solid waste incinerator for complete combustion of flue gas, which is essential for reducing the generation of trace hazardous substances such as dioxins. The combustion conditions of an existing incinerator, therefore, are examined by measuring carbon monoxide concentration as an indicator of complete combustion. The effects of oxygen concentration and combustion gas temperature on gaseous combustion are evaluated. Furthermore, the combustion condition of waste on the fire grate is estimated from the distributions of combustion gas components and temperature measured on the section of the furnace outlet. On the other hand, computer simulation is conducted in terms of gas flow distribution inside the incinerator. The results agree with the measured combustion data to a great extent, indicating that the simulation technique is fairly effective to predict gas flow in an incinerator in the case of combustion modification.

Key Words: Pollutant, Furnace, Garbage Incineration, Dioxins, Carbon Monoxide, Municipal Solid Waste, Gas Flow Simulation

1. 緒 言

1977年に都市ごみ焼却炉におけるダイオキシン類の発生が初めて報じられて以来¹⁾, 世界的にもその発生抑制に関する多くの研究がなされてきた^{2) 3)}. わが国では, 1990年12月に厚生省より「ダイオキシン類発生防止等ガイドライン」(以下ガイドライン)が通知され, 都市ごみ焼却炉においてダイオキシン類の排出低減が強く求められている.

都市ごみ焼却炉におけるダイオキシン類の発生源としては, 炉内の燃焼状態に起因して発生するものと, 焼却炉の下流側での排ガス処理過程においてある特定の温度域で再生成されるものに大別される. 発生したダイオキシン類については, 除去・無害化という方策がとられるが^{4) 5)}, 燃焼改善を行うことにより積極的にダイオキシン類そのものの発生を抑制, 制御することがより重要と考えられる. また, この燃焼状態に起因して発生するものに対しては, 燃焼ガスの完全燃焼

化を図ることによりその低減化を図れることが知られている^{6) 7)}. しかしながら, 都市ごみ焼却炉においては, 燃料としてのごみの性状が不均一であり, さらに焼却炉内ではごみの乾燥, ガス化燃焼及び固体燃焼が同時に進行しており, 燃焼としては非定常でかつ非常に複雑な燃焼となっており, 安定して良好な燃焼を行わせることは容易ではない.

一方, 分析の面からダイオキシン類の濃度が非常に微量でかつ連続測定が不可能であることから, 実際の燃焼管理は完全燃焼度合を示す指標として燃焼ガス中の一酸化炭素(CO)濃度を監視して行うことが現実的であり, ガイドラインにおいても具体的な燃焼管理項目として排ガス中のCO濃度の値が与えられている.

そこで本研究では, 既設の都市ごみ焼却炉を用いて, 燃焼ガスの完全燃焼化を図るために, 排ガス中のCO濃度を完全燃焼度合の指標として, ごみの燃焼に対する影響因子とその影響度合の把握を行った. さらに, 大気に放出される最終の排ガス性状の改善のためには, 焼却炉内のごみの燃焼状態や燃焼ガスの流れの状態の把握が必要である. そのため特に, 炉出口における燃焼ガスの性状と分布を詳細に測定し, その結果から炉

* 原稿受付 平成5年5月19日.

^{*1} 正員, (株)クボタ (〒556 大阪市浪速区敷津東1-2-47).

^{*2} 正員, 千葉工業大学 (〒275 習志野市津田沼2-17-1).

^{*3} (株)クボタ.

図1 実験を行った都市ごみ焼却プラントの全体フローシート

図2 焼却炉内への燃焼空気の供給方法

内の燃焼現象を推測するとともに、最終の排ガス性状との因果関係を把握することにした。また、炉内の燃焼状態や燃焼ガスの流れの状態から、燃焼ガスの完全燃焼化を目指した燃焼改善の方向づけを行うための手法を示すため、実炉の実験を報告することとした。また一方で、熱流体解析の手法を用いてコンピュータによる燃焼ガス流れのシミュレーションを実施し、実測データとの比較検討を行うとともに、実測データと合わせて炉内の現象解析を行った。

2. プラント概要

実験を行った都市ごみ焼却プラントの全体フローシートを図1に示す。収集されたごみは、ごみピットに一時貯留され、クレーンで焼却炉に投入される。焼却炉は、水平ストーカ方式で乾燥帯・燃焼帯・後燃焼帯

表1 基準ごみ質

Moisture, %	50.9
Combustibles, %	40.1
Ash, %	9.0
Lower heating value, MJ/kg	7.12
Apparent specific gravity	0.28

を有し、投入されたごみは、ストーカ（図2参照）の往復動により順次搬送されながら焼却される。焼却灰はコンベアにより集められ搬出される。ごみの燃焼により発生した燃焼ガスは、焼却炉の燃焼室を出て廃熱ボイラに入り廃熱回収が行われる。本プラントでは半ボイラ方式を採用しており、ボイラで廃熱回収された後、ガス冷却塔内で水噴霧によりガスはさらに冷却され、後段の排ガス処理設備に入る。HCl等の酸性ガス除去のためガス中に消石灰が噴霧され、その後電気集じん器（EP）でダストの捕集を行った後煙突より大気へ放出される。

図2に焼却炉内への燃焼空気の供給方法を示す。本焼却炉は通常のストーカ下からの空気の供給に加えて、空冷壁と呼ばれる側壁からも空気を投入している⁸⁾。

表1に本プラントに持ち込まれるごみの基準ごみ質を示す。ごみ質のばらつきの範囲は、ごみの発熱量で示すと4.19～10.88MJ/kg（信頼度90%）である。施設に持ち込まれたごみはごみピットに一時貯留され、その間にごみクレーンにて攪拌作業を行いある程度の均質化を図った上で焼却炉に投入される。焼却炉内に投入されたごみは、まず乾燥帯で乾燥されながら燃えやすいごみは燃焼を始める。次に燃焼帯に送られ、ストーカ下及び空冷壁からの十分な空気により活発な燃焼が行われる。その後段には、燃焼帯で燃え切らなかつ

た未燃分を主として表面燃焼により燃焼させる後燃焼帯が設けられている。

本焼却炉は1日24時間運転の全連続燃焼式で1日の定格処理量は50 tである。また、焼却炉の幅は1.7 mである。

3. 実験方法

排ガス規制の観点からは、煙突出口での排ガスの性状が重要であるが、本実験ではさらに、炉出口における燃焼ガス性状を測定することにより炉内の燃焼状態を把握し、最終の排ガス性状との因果関係を調べることとした。

焼却炉本体部分の構造を図3に示す。炉出口断面においては、燃焼ガス性状にかなりのばらつきがあることが予想されるため、本図に示すように、同一レベルに4ヶ所の測定口を設けた。燃焼状態を把握するために、完全燃焼の度合を示す指標として一酸化炭素(CO)濃度を測定し、同時に、燃焼条件をつかむために酸素(O_2)濃度及び燃焼ガス温度について測定を行った。炉出口断面の燃焼ガス性状の測定は、断面全範囲にわたり測定可能な長尺のガスサンプリング管及び熱電対を用い、4ヶ所同時に順次差し込み深さを変えて行った。ガスサンプリングについては、高温のガス中を通過してサンプリングを行うため、途中でのCOの反応を抑えるために水冷の三重管を用いた。

また、ガス冷却塔出口及びEP出口にも測定口を設け測定を行った。さらに燃焼空気量の配分量の測定は、それぞれの供給ダクトにおいて熱線流速計を用いて行った。表2に測定機器の仕様をまとめた。

実験は、1条件につき1時間連続して行い、データは、0.5秒おきに収集した。1つの条件下での実験中は、できるだけ総空気量と各ゾーンへの空気配分を変えないように、中央制御室にて手動で操作を行った。今回の実験において基準とした操炉条件を表3にまとめた。

また一方で、熱流体解析の汎用ソフトウェアを使用して焼却炉内の燃焼ガス流れのシミュレーションを実施し、実測データとの比較検討を行った。

なお、本報告においてCO濃度は全て12% O_2 換算値で示されている。また、燃焼後のガスを燃焼ガスと呼ぶが、この燃焼ガス中に含まれるCO、炭化水素などの不完全燃焼成分を総称し未燃ガスと呼んでいる。

4. 実験結果と考察

4・1 O_2 濃度と炉出口温度との関係 一般にごみ焼却においては、理論燃焼空気量の2倍程度の空気

図3 焼却炉本体の構造

表2 測定機器仕様

Item	Specification of measuring device
Gas temperature	K-type thermocouple - With protecting tube of recrystallized alumina (Outer diameter: 17 mm) - Length: 2 000 mm
Air flow rate	Hot-wire anemometer
CO concentration	CO meter - Non-dispersive infrared analyzer
O_2 concentration	O_2 meter - Magnetic pressure type
Gas sampling	Water cooled triplex tube - Length: 2 152 mm - Outer Diameter: 42.7 mm

表3 基準とした操炉条件

Waste feed rate, kg/h	2 083
Excess air ratio	2.0
Total flow rate of combustion air, Nm ³ /h	9 000
Flow rate of underfire air, Nm ³ /h	6 500
Flow rate of side wall air, Nm ³ /h	2 500

図4 O_2 濃度と炉出口温度との関係
○：ガス冷却塔出口，△：EP出口

が供給されるが、空気量が多いとその分燃焼ガスが冷されることになる。燃焼ガスの燃焼反応を促進し、完全燃焼化を図るためには、ガスの温度を高温に保つ必要があり、この意味から空気量の制御は重要である。

図4にガス冷却塔出口及びE P出口における O_2 濃度と炉出口温度の関係を示す。各測定点は1時間の測定データの平均値である。また炉出口では、各測定点において燃焼ガス温度にばらつきがあるため、4点の測定点の平均値を炉出口温度とした。実験結果より燃焼ガス温度は O_2 濃度と直線関係にあり、ガス冷却塔出口及びE P出口のいずれの場合においても、 O_2 濃度が1%上昇すれば炉出口温度は約 $30^{\circ}C$ 低下することがわかる。ガス冷却塔出口においては燃焼ガスは十分に混合していると考えられ、また炉出口からガス冷却塔までの間に空気の投入がないことから、この測定点での O_2 濃度が炉内の燃焼における O_2 濃度を代表していると考えられる。一方、実際の運転管理はE P出口での O_2 濃度により行われるが、E Pにおいて碍子保護のためシールエアが投入されること、また、誘引送風機によりE P内が負圧となりエアリークがあることなどから、ガス冷却塔出口に比べ O_2 濃度として約1.5%高くなっていることに注意が必要である。空気過剰率2.0に相当する O_2 濃度は、ガス冷却塔出口およびE P出口でそれぞれ約10.5%および12%である。

4・2 炉出口温度とE P出口CO濃度との関係

炉出口温度とE P出口CO濃度との関係をまとめると図5のようになる。炉出口温度は燃焼ガス温度の4ヶ所の各測定データの1時間の総平均である。この結果によると、燃焼ガス温度が低くなるとE P出口での排ガス中のCO濃度が指数関数的に上昇している。このことから未燃ガスの燃焼反応に対して燃焼ガス温度の影響が非常に大きいことがわかる。

この図より、E P出口での排ガス中のCO濃度を12% O_2 換算値で100ppm以下にするためには、炉出口温度を $850^{\circ}C$ 以上にする必要がある。また、温度をさらに高温にしてもCO濃度の低下割合は小さくなるため、排ガス中のCO濃度を安定的に50ppm以下にするためには何らかの燃焼改善が必要となると考えられる。

4・3 E P出口でのCO濃度と O_2 濃度との関係

排ガス中のCO濃度と O_2 濃度との関係についてどちらもE P出口での測定データをプロットすると図6のようになる。データは4時間分の実験データを2分間隔に抜き出したものである。実験中においては燃焼空気量を一定に保ったが、ごみ質が変動する結果として燃焼状態が変化し、排ガス中の O_2 濃度も変動して

いる。排ガス中の O_2 濃度が高くなるとCO濃度も急に高くなっているが、これは空気過剰のため燃焼ガス温度が低下しCOの反応が抑えられたためと考えられる。一方、 O_2 濃度がある範囲を越えてさらに低くなると、燃焼温度は高くなるにもかかわらず、CO濃度は高くなる傾向が現れた。これは、投入されたごみに対し相対的に空気量が不足し、未燃ガスの発生が多くなったためと考えられる。しかしながら、 O_2 濃度が9%としても空気比は1.75であり燃焼としては十分な空気が供給されていることになる。このことは、燃焼ガ

図5 炉出口温度とE P出口CO濃度との関係

図6 E P出口でのCO濃度と O_2 濃度との関係

図7 炉出口断面の形状と測定位置

スと空気との混合を促進することにより燃焼改善が図れることを示唆している。

4・4 炉出口断面における燃焼ガスの状態 炉出口の断面の形状と測定位置を図7に示す。本断面の中央がストーカ上において乾燥帯と燃焼帯との境である。この炉出口断面において測定した燃焼ガスのCO濃度、 O_2 濃度及び温度の分布をそれぞれ図8(a)、(b)及び(c)に示す。図に分布を示した測定値は各測定点での1時間の平均値である。

まず、図8(a)の炉出口での燃焼ガス中のCO濃度の分布を見ると、乾燥帯側で非常に高いピークを示し、燃焼帯側へ行く程急激に低下している。乾燥帯側でCO濃度の最も高い部分の平均値は約6500ppmであり、燃焼帯側で最も低い部分の平均値は約660ppmとなっており、約10倍の差があることになる。断面の奥行き方向の違いは、ごみ質のばらつきや燃焼空気の供給の不均一さによるものと考えられる。

次に図8(b)に示す O_2 濃度の分布を見ると、CO濃度の分布とは逆に乾燥帯側で低く、燃焼帯側で高い分布を呈している。乾燥帯側の最も低い部分の平均値は4.2%であり、また、燃焼帯側の最も高い部分の平均値は15.1%であった。

炉出口断面での燃焼ガスの温度分布を見ると、図8(c)に示されているように乾燥帯側で高く、燃焼帯側で低くなる分布を持っており、その差は約150℃であった。

以上のことから、ストーカ上におけるごみの燃焼状態について次のことが推測される。まず乾燥帯において、非常に空気不足の状態での燃焼が起こっており、熱分解によりガス化した未燃ガスが多く発生し未反応のまま炉出口から排出されている。空気不足のため O_2 濃度は低く、従って高温となっている。一方、燃焼帯では十分な空気が供給されているが、炎のなくなる燃え切り点以降及び後燃焼帯より余分な空気が供給され、結果として炉出口において、 O_2 濃度が高く温度が低いといった空気過多の状態が現れているものと考えられる。

また、炉出口断面においてCO濃度や O_2 濃度が場所によって非常に差のある分布をしていることから、燃焼ガスの混合が不十分であり、ストーカ上の各ゾーンから発生したガスが混ざり合わずに炉出口から排出されてしまっていると考えられる。このことから、燃焼ガスの混合を促進することにより、燃焼改善を図る余地があることを示していると考えられる。

5. 燃焼ガス流れのシミュレーション

(a) CO濃度分布

(b) O_2 濃度分布

(c) 温度分布

図8 炉出口断面におけるCO濃度、 O_2 濃度及び温度の分布

表4 熱流体解析に用いた入力条件

	Drying zone		Combustion zone		Burn-out zone	Side wall
	①	②	①	②		
Air flow rate, Nm ³ /h	470	472	4 555	2 277	630	2 500
Air temperature, °C	800	1 000	1 250	1 000	500	250

本焼却炉に対して、焼却炉内の燃焼ガスの流れを見るために、熱流体解析手法により流れのシミュレーションを行った。解析ツールは、ハードウェアとしてグラフィックススーパーコンピュータを用い、汎用熱流体解析ソフトウェア（「FLUENT」(株)流体コンサルタント製）を以下の条件で使用した。(1) 乱流モデル: $k-\epsilon$ モデル, (2) 数値解法: コントロールボリュームに基づく有限体積法, (3) 解法: シンプル法, (4) 分割メッシュ数: 約10万。

また、解析にあたっては炉内での燃焼反応は考慮せず、流体は高温空気とし、炉内の放射計算は行わずボイラおよび炉壁からの冷却は熱流束を与えて計算した。炉壁からの放熱の熱流束は、外壁温度、外気温度をそれぞれ60°C、20°Cとし、シルバー塗装された外壁の放射率 0.52、対流熱伝達率 11.6 W/(m²・K)を用いて求め、611 W/m²とした。また、廃熱ボイラ部の熱流束は、ボイラの吸収熱量を伝熱面積で割ることにより求め、26500 W/m²とした。流体の持つ総熱量は、定格処理量における基準ごみ質の持つ総熱量に一致するように決定した。各ゾーンから炉内に入る空気の温度は、まず最初に炉内の燃焼状況から推定した各ゾーンに対する熱量の配分により決めた。次に、この空気温度を用いて炉内温度分布を計算し、その計算結果と実炉内の計測可能な箇所の燃焼ガス温度の実測値とを比較して、補正をかけることにより最終決定した。シミュレーション計算のための入力条件を表4に示す。なお計算上入力条件として、乾燥帯及び燃焼帯をそれぞれ二分割して考えた。

計算結果は三次元的であるが、図9に炉内中央断面の温度分布を示す。炉出口における温度分布を見ると、乾燥帯前半のガス流れの影響で乾燥帯側の壁近くが実測値よりも温度が低くなっているが、それ以外は実際の炉の温度分布を良く表している。実際の焼却炉では、乾燥帯前半から空気不足の状態で燃焼が始まっており、ガスが流れるに従い発熱反応により温度上昇しながら流れているものと考えられる。燃焼ガスが廃熱ボイラ内に入るとガスは急激に冷却される様子がわかる。このことからボイラ内に入るとCOの低減の速度は急激に抑制されると推測される。

図9 炉内温度分布の計算結果

図10 ガス濃度分布の計算結果

また、ストーカ上の各ゾーンから出るガスの炉中央断面における濃度分布を図10に示す。本図には、乾燥帯後半及び燃焼帯前半からのガスの濃度分布を示すが、本図からわかるように、各ゾーンから出るガスのお互いの混合は弱く、それぞれが層状になって流れていることが裏付けられた。さらに、本法は改善案等のシミュレーションにも使えることがわかった。また、混合状態の判定には、ストーカ燃焼帯から出たガスの濃度分布が参考になるが、これは次報に述べる。

6. 結 論

本報告では、都市ごみ焼却炉排ガスの完全燃焼化を図るため、まず、既設焼却炉内の燃焼状況について調査し、燃焼に対する影響因子とその影響度を把握した。また一方で、コンピュータによる焼却炉内の流れのシミュレーション解析を行って、炉内の燃焼状況の把握と解析を行った。得られた結果は次の通りである。

(1) 炉出口断面における燃焼ガス中のCO濃度、O₂濃度及び温度の分布測定により、温度は高いがO₂濃度が極端に低くCO濃度がピークをもっている部分と、逆に、CO濃度は相対的に低いO₂過多で温度が低い部分とに明確に分かれていることがわかった。このことから燃焼空気の供給方法の改善や燃焼ガスの混合促進により燃焼の改善が図れることが期待できる。

(2) 未燃ガスの燃焼反応に対しては燃焼ガス温度の影響が大きく、燃焼ガス温度が高くなるとEP出口排ガス中のCO濃度は指数関数的に低下する。

(3) 排ガス中のCO濃度とO₂濃度の関係は2次関数的であり、CO濃度低減化のための最適なO₂濃度範

囲が存在することからO₂濃度は重要な燃焼管理項目と言える。しかしながら、適正なO₂濃度範囲においても空気比は1.75以上あり、このことから燃焼ガスと空気の混合促進によりさらに低酸素での燃焼改善が図れることが期待できる。

(4) 燃焼ガス流れを高温空気のモデルとして熱流体解析によりシミュレーションを行い、これが焼却炉内の燃焼ガス流れをよく表していることを確認した。このことにより、燃焼改善における炉形状変更等に有効な設計手段として利用できると考えられる。

文 献

- (1) Olie, K., ほか2名, Chlorodibenzo-p-dioxins and Chlorodibenzofurans are Trace Components of Fly Ash and Flue Gas of Some Municipal Incinerators in the Netherlands, *Chemosphere*, Vol. 6, No. 8, (1977), pp. 455-459.
- (2) United States Environmental Protection Agency, *Municipal Waste Combustion Study*, (1987), National Technical Information Service.
- (3) Environment Canada, *National Incinerator Testing and Evaluation Program: Environmental Characterization of Mass Burning Incinerator Technology at Quebec City*, (1988), Beauregard Press Limited.
- (4) Fujimoto, T., ほか5名, *Melting Treatment of Fly Ash from MSW Incinerator*, Vol. 2, (1992), pp. 385-398, EF-Verlag für Energie-und Umwelttechnik GmbH.
- (5) 石見・ほか2名, 都市ごみ焼却残さの溶融処理, 日本機械学会環境工学総合シンポジウム'91講演論文集, (1991), pp. 163-168.
- (6) 永田, 都市ごみ焼却炉におけるダイオキシン対策の現状と動向, 廃棄物学会誌, Vol. 3, No. 3, (1992), pp. 217-237.
- (7) 平岡, 廃棄物処理におけるダイオキシン類の生成と制御, 廃棄物学会誌, Vol. 1, No. 1, (1990), pp. 20-37.
- (8) 井上・ほか3名, 都市ごみ焼却炉の空冷壁システムについて, 第9回全国都市清掃研究発表会講演論文集, (1988), pp. 166-168.