

ごみのバッチ燃焼における排ガス生成のモデリング

○藤原健史*, 岩田憲和**, 武田信生*, 高岡昌輝*, 江口正司***

*京都大学大学院工学研究科

**京都大学大学院工学研究科(現 堀場製作所株)

***太陽築炉工業株

概要: ダイオキシン類等の有機塩素化合物の発生を抑えるために、未燃ガスを出さない炉の設計や燃焼管理が必要である。ごみの燃焼はごみの大きさや形状の違い、不均一さ、多種の成分を含むなどの理由により複雑な現象である。ごみの燃焼を総括して簡単な動的モデルで表わすことができれば、の燃焼を設計する上で有効である。これまでの実験から、燃焼が始まったときに未燃ガスが高濃度で生成することがわかっている。本研究では、ごみの代表的成分である紙を電気炉で燃焼し、CO、CO₂および炭化水素類といった生成ガスの経時変化を測定した。そして、ごみ燃焼の伝達関数モデルを同定した。

キーワード: 固形廃棄物、熱分解・燃焼、電気炉、ガス分析、ガス生成モデル

1 はじめに

物質循環社会を目指してリサイクルが促進されているが、現状の都市ごみ処理の約8割は焼却処理であり、今後も焼却は大きな役割を果たす。従って、焼却処理でダイオキシン類等の有機塩素化合物の発生を抑えるために、未燃ガスの生成を抑制した炉の設計や燃焼管理が必要とされる。ごみの燃焼はごみの大きさや形状の違い、不均一さ、多種の成分を含むなどの理由により複雑な現象である。ごみの燃焼を総括して簡単な動的モデルで表わすことができれば、炉内の燃焼特性を解析する上で有効である。これまでの実験から、燃焼が始まったときに未燃ガスが高濃度で生成することがわかっている^{1,2)}。本研究では、2cm×2cm大の紙片を束ねた試料を電気炉で燃焼し、CO、CO₂および炭化水素類といった生成ガスの経時変化を調べる。そして、そのデータに基づきごみ燃焼の伝達関数モデルを同定する。

2 電気炉における熱分解ガスおよび燃焼ガスの分析

2.1 実験内容

(1) **実験装置(図1)** 電気炉の炉部分は、内径66mm長さ600mmのアルミナ管で、温調付き縦型管状電気炉で加熱する。試料はステンレスの針金で編んだカゴに封入し、ステンレス製のシャーレ(直径50mm)に載せた。シャーレと試料の重量それらを吊り下げている電子天秤にて測定する。キャリアガス(熱分解実験ではN₂を、燃焼実験ではN₂+Air)は流量8L/minでポンプよりアルミナ管下部に供給する。生成したガスはガラス繊維ろ紙、グラスウール入りガラスびん、氷冷された塩化カルシウム入りU字管を通り、ダスト、タール分、水分がトラップされる。アルミナ管上部の蓋からガスが漏れないように、インバータ付き誘引ファン

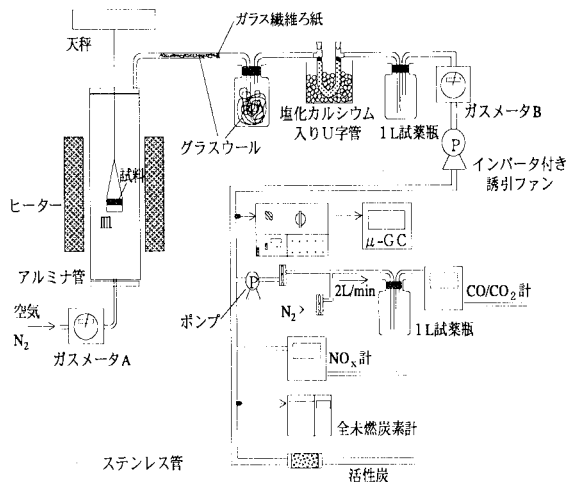


図1 電気炉実験装置

ンで炉内圧力を負圧に調整する。排ガスは CO/CO₂ 計に導入されガス濃度が測定される。

(2) 実験試料・条件 試料の紙 (新聞紙) には、2cm×2cm に切って重ねたもの 3g を用いる。試料をまず絶乾状態にしてから、含水率が 0% (絶乾) ,12%,25%,37%,40%になるように水分を与える。また、試料を封入するカゴの大きさを変えて見かけ密度が 0.125, 0.171, 0.25, 0.341, 0.5g/cm³になるように調整する。雰囲気温度は 500, 600, 700, 800, 900℃になるように調整する。

(3) 実験手順 電気炉を設定温度まで加熱してキャリアガスを流す。炉の下部より試料を入れて下蓋を閉じ、重量測定とガス測定を開始する。30 秒後、試料を炉の中央にセットする。反応の終了を確認した後、測定を終了する。試料は炉の下部に引き下げておき、しばらくして取り出し残渣重量を測る。

2. 2 実験結果及び考察

燃焼実験時の生成ガスの流量変化を図 2 に示す。ガス濃度とガス流量から求めた生成ガス流量を縦軸、横軸は経過時間 (秒) をとった。700℃以下の温度条件でおこなった実験では表面燃焼期間で CO が生成した。雰囲気温度を高くすると炎燃焼期間での CO および全未燃炭化水素の流量が大きくなり、表面燃焼期間での CO の流量が小さくなった。炎燃焼期間では雰囲気温度が高いほど熱分解が促進され、反応が急激に進むため酸素不足となり CO および全未燃炭化水素の生成が多くなると考えられる。表面燃焼期間では 700℃以下で CO が生成しており、雰囲気温度が低いほど CO 生成が多かった。500℃では全未燃炭化水素が表面燃焼期間にも CO が生成したが、試料の外側と内部で表面燃焼と炎燃焼が同時に進行し、試料内部において局所的な酸素不足が起きたためと推測される。

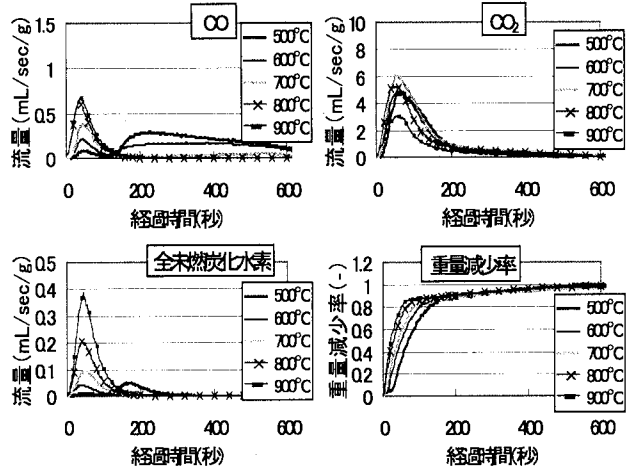


図 2 燃焼時の生成ガス変化

(紙: 含水率 0%、見かけ密度 0.25g/cm³)

3 ガス生成のモデル化

3. 1 重量減少率のモデル式

ごみの熱分解時の重量減少率の時間変化は変曲点を持つ曲線で表されることから、熱分解の動特性を非振動型 2 次遅れ要素で表すことにした。重量減少率の伝達関数を G(s) とすると(1)式となる。

$$G(s) = \frac{K}{(1 + T_1 s)(1 + T_2 s)} \tag{1}$$

K は静ゲイン、T₁、T₂ (T₁ > T₂) は時定数である。このとき、重量減少率の経時変化 g(t) はそのステップ応答として表される。

$$g(t) = g_{\infty} \left(1 - \frac{T_1}{T_1 - T_2} e^{-\frac{t}{T_1}} + \frac{T_2}{T_1 - T_2} e^{-\frac{t}{T_2}} \right) \tag{2}$$

静ゲイン K は重量減少率の最終値 g_∞ に相当する。時定数 T₁、T₂ は、インパルス応答のモーメントから求める方法³⁾を用いて、重量減少速度の実測値のモーメントから算出する。図 3 に雰囲気温度、含水率、見かけ

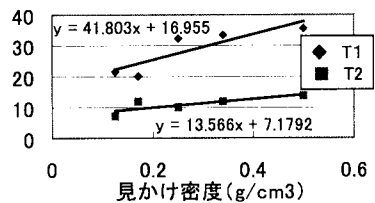
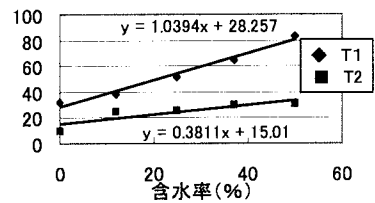
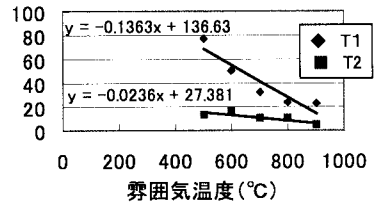


図 3 T₁、T₂ の変化

(紙、熱分解)

密度を変えて紙を熱分解したときの結果から求めた T_1 、 T_2 を示す。また、各操作条件を変数とした T_1 、 T_2 の線形近似式も示した。図より、 T_1 、 T_2 は雰囲気温度に対して減少し、含水率と見かけ密度に対して上昇することが分かった。700℃、0%、0.25g/cm³ を基準条件として、3変数で T_1 、 T_2 、 g_{∞} を再調整した。

紙の燃焼は炎燃焼期間と表面燃焼期間とに分かれるため、測定結果を前半と後半に分けてそれぞれが非振動性2次遅れ要素となると仮定し、別々の T_1 、 T_2 および g_{∞} を求めて質量減少率を足し合わせた。図4に重量減少率の測定結果と計算結果との比較を示す。基準条件から離れた条件ではずれが見られるが、全体的によく合っていた。

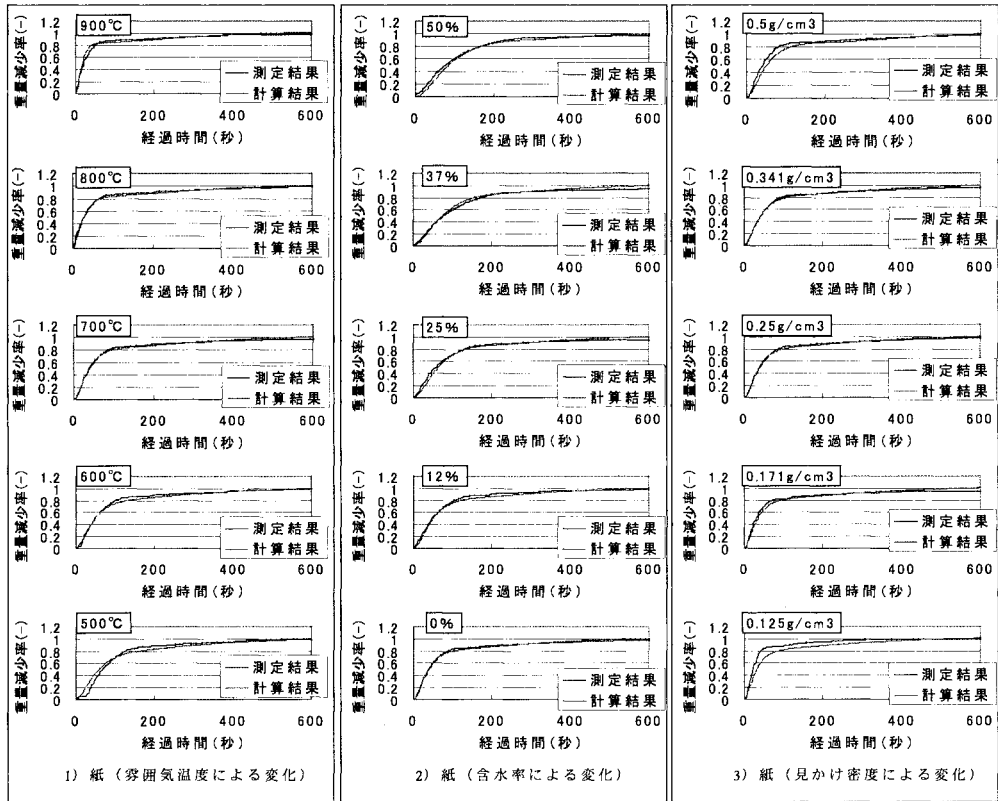


図4 燃焼時の重量減少率の測定結果と計算結果の比較

3. 2 ガス生成量のモデル

ガス生成量のモデルとして、最初、重量減少量の一部がガスへ転換すると考えて、重量減少モデルに1次遅れ要素を加えた非振動性3次遅れ要素で計算したがうまくフィットしなかったため、振動性3次遅れ要素で表すことにした。生成ガス流量の経時変化の式は静ゲインに生成ガスの総流量 G_{∞} を用いて以下のように表わされる、

$$\begin{aligned}
 Gas(t) = G_{\infty} \frac{\omega_n}{\sqrt{1-\xi^2}} \left[e^{-\xi\omega_n t} \left\{ \sin \omega_0 t + \frac{T}{\omega_n^2 T^2 - 2\xi\omega_n T + 1} \left((\xi\omega_n - \omega_n^2 T) \sin \omega_0 t - \omega_0 \cos \omega_0 t \right) \right\} \right. \\
 \left. + \frac{\omega_0 T}{\omega_n^2 T^2 - 2\xi\omega_n T + 1} e^{-\frac{t}{T}} \right] \quad (3)
 \end{aligned}$$

次に、重量減少率と同じように2つの燃焼期間に分けて、各期間で(3)式の係数を雰囲気温度、含水率および見かけ密度の式で表した。本研究では、生成ガスのうちCOについてモデル式 $CO(t)$ を作成した。2つ

の期間でCOが見られたため、各期間について振動性3次遅れ要素を用いた。CO(t)によって求めた生成ガス流量の経時変化と実際の測定値との比較を図5に示した。図4と同じく、基準条件から離れる条件ほど測定結果と計算結果とのずれが大きくなった。雰囲気温度については800℃と900℃では実際の測定値がほとんど変わらず、900℃の結果を使って線形近似したことにより係数を求めた計算結果とのずれが大きくなっている。また、含水率を変化させた実験では小さい含水率で測定結果と計算結果がずれた。

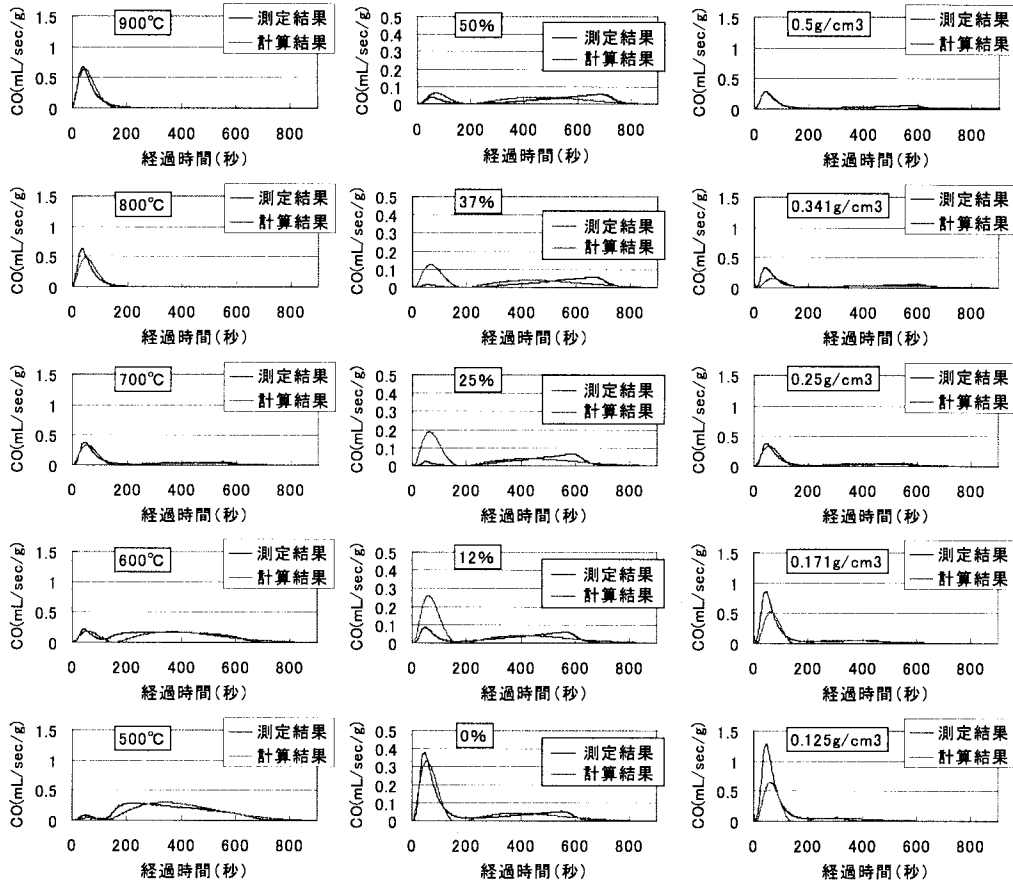


図5 燃焼時の生成ガス測定結果と計算結果の比較(紙)

5. おわりに

紙について電気炉で熱分解・燃焼実験をおこない、重量変化と生成ガス流量の変化を調べた。その結果、①雰囲気温度が高いほどCOと未燃焼炭化水素の生成量のピークは高くなった。②燃焼は炎燃焼と表面燃焼に分けられ、重量および生成ガスの変化はこれらの燃焼期間で違いが見られた。③重量減少率を非振動性2次遅れ要素で、ガス生成量を振動性3次遅れ要素で表すと実測値によく一致した。

【参考文献】

- 1) 谷口美希, 藤原健史, 武田信生: 固形廃棄物の燃焼挙動に関する基礎的研究, 環境工学研究論文集, Vol.36, pp.391-401 (1999)
- 2) 岩田憲和, 藤原健史, 高岡昌輝, 武田信生: ごみのバッチ燃焼時に発生する排ガス成分の測定, 環境工学研究論文集, Vol.37, pp.467-476 (2000)
- 3) 堀田和之: プロセス動特性, 倍風館 (1975)