

一般廃棄物の組成変動がガス化溶融処理における熱分解生成物に及ぼす影響

廃棄物・有害物管理工学研究室 三浦 崇
 指導教官 小松 俊哉
 姫野 修司
 桃井 清至

1. はじめに

現在、日本の廃棄物処理の現状は、大量かつ様々な廃棄物が排出され、この処理のために多くの人員と経費をかけなければならない状況にある。また、廃棄物の中間処理によって、発生するダイオキシン類の対策や最終処分場の逼迫が問題となっている。それらを解決するためには、省資源、省エネルギーの観点から廃棄物の発生を抑制し、廃棄物から出る有価物の再生利用を促進する資源循環型社会の構築が必要である。

また、日本において、廃棄物の焼却によって発生するダイオキシン類は、総排出量の 9 割とされており、この対策として、平成 9 年に「ごみ処理に係るダイオキシン類発生防止等ガイドライン（新ガイドライン）」が策定され、ダイオキシン排出濃度は、0.1 ng-TEQ/Nm³以下と定められた。

さらに、「ごみ処理の広域化計画」が通達されたことによって、ガス化溶融炉が注目されるようになった。ガス化溶融炉は、大きく分けて熱分解工程と燃焼・溶融工程の 2 つの工程からなり、まず、ごみを還元雰囲気中で熱分解し、熱分解残渣と熱分解ガスに分離し、熱分解残渣中の鉄やアルミなどの有価物を回収した後、溶融炉に送られ、熱分解ガスとともに、空気比 1.3 程度で燃焼することで、約 1300 以上の高温燃焼が可能となり、熱分解残渣中の灰分を溶融し、スラグ化する次世代型ごみ処理システムである。

しかし、現在の社会経済活動の結果、廃棄物は多組成かつ時系列、地域的に変動することから、ガス化溶融システムの安定性や安全性が危惧されている。

そこで、本研究では、一般廃棄物の組成の違いが熱分解生成物に及ぼす影響を把握するとともに、ガス化溶融処理の熱分解工程と燃焼・溶融工程を通して最適な熱分解条件を検討することとした。

2. 実験試料

実験試料には、一般廃棄物の多組成とごみ質の変動を反映しなければならないため、本研究では、一般廃棄物の模擬として、ごみ固形燃料（RDF）を用いた。RDF の選定方法は、国内の RDF 化施設約 40 ヶ所において、処理され

表1 RDFのごみ質組成アンケート結果

RDF No.	ごみ質	組成 [wt%]					
		紙類	プラスチック類	厨芥類	木竹類	その他	不燃物
1	可燃ごみ	54.8	21.7	6.9	3.3	2.8	0.4
2		58.4	27.7	7.2	0.5	6.0	0.2
3		53.4	10.0	21.8	11.7	2.1	1.1
4		45.1	24.2	22.4	5.2	1.6	1.6
5		-	-	-	-	-	-
6		68.0	27.0	2.0	1.0	1.0	1.0
7		-	-	-	-	-	-
8	可燃ごみ 厨芥除く	95.7	2.8	<0.1	1.5	-	<0.1
9		64.5	32.0	1.5	1.4	0.3	0.2
10		45.6	53.7	<0.1	<0.1	0.7	<0.1
11	不燃ごみ	8.6	88.1	<0.1	<0.1	0.9	2.4
12		-	100	-	-	-	-
13		60.0	30.0	0.0	0.0	10.0	0.0

- : 施設で未確認

握る上で必要で

あると思われた RDF については、優先順位とは別に分類した。各カテゴリーから処理量の多い順で計 13 施設の RDF を使用した。表 1 に RDF の組成データを示す。

3. 実験方法

3.1 熱分解実験方法

本実験において、熱分解条件は、キルン式ガス化溶融システムの熱分解条件を参考にして設定した。実験条件を表 2 に示す。熱分解条件の違いによる熱分解生成物への影響を把握するために、一般廃棄物の平均的な組成と類似していた RDF (RDF 1 と 2)、そして、プラスチック類の含有割合が高い RDF (RDF 11) を用いた。各 RDF は、微粉碎した物を使用した。

熱分解実験装置は、図 1 に示すような環状型電気炉 (光洋サーモシステム社製 KTF433-S) を用いた。実験手順は、2 つのアルミナるつぼ (ニッカトー社製 SSA-H : 30 ml) に試料 5 g 入れ、管状炉の端に設置した後、炉内を還元雰囲気にするために、窒素ガスを 0.055 m/s で流しつづけた。その後、設定温度まで 2 /min で昇温させ、設定温度に到達した後、炉内温度が完全に安定する 30 分後に、試料を灼熱帯に押し入れ、熱分解させた。熱分解に伴って発生する熱分解ガスは、熱分解開始から 3、5、7、10、15、20、30、40、50、60、70、80、90 分後に、ガスバック (フッ化ビニルフィルム製、膜厚 50 μm、容積 100 ml) で採取し、採取したガス成分は、TCD 型ガスクロマトグラフ (ステンレスカラム : 2 mm × 6 m、カラム充填剤 : 信和化学工社製 SHINCARBON T 60-80、カラム温度 : 50 (8 min) ~ 260 (10 /min)、キャリアーガス : 高純度アルゴン) を用いて H₂、CO、CO₂、CH₄、C₂H₄、C₂H₆ を分離・定量した。

所定の熱分解時間に到達した後、るつぼポートを灼熱帯から退避させた後、活性炭カラムを秤量し、熱分解後の揮発性有機化合物 (VOC) の吸着量を測定した。炉内温度が 80 以下になった後に、熱分解残渣を秤量した。また、タールについては、タール貯めに蓄積した分と電気炉の炉心管内壁に付着した分をペーパータオル等で拭取り、固着して拭取れない分は、アセトンで溶解した後に拭取り、ドラフター内で一晩放置し、アセトンを蒸散させた後に秤量した。

熱分解実験で得られた熱分解残渣は、JIS M 8812 に規定されている方法に準じて、工業分析を行い、水分、揮発分、固定炭素、灰分を測定した。

3.2 熱分析

RDF の熱分解挙動および熱分解残渣の燃焼挙動を測定するために、熱重量・示差熱分析装置 (セイコー電子工業社製 TG/DTA 320) を用いて、表 3 に示す条件で熱分析を行った。

表2 熱分解条件

熱分解温度	熱分解時間	実験試料
400	60min 窒素雰囲気	一般廃棄物の代表 (RDF 1と2)
450		
500		プラスチックの含有割合の 高いRDF (RDF 11)
550		
600		

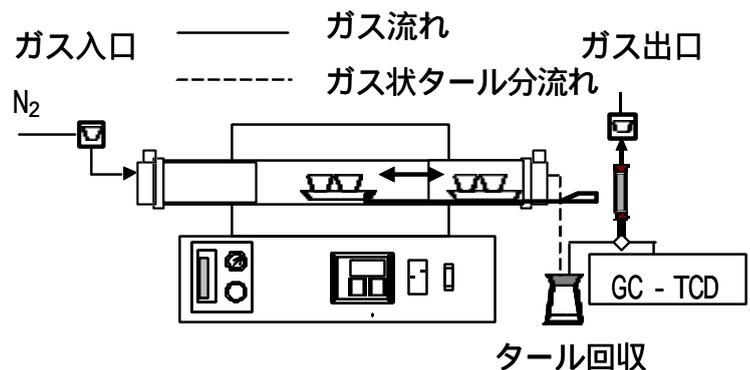


図 1 熱分解実験装置概要図

表3 熱重量・示差熱分析測定条件

	RDF熱分解挙動	熱分解残渣の燃焼挙動
実験試料	RDF	熱分解残渣
試料重量		10mg
加熱速度		5 /min
測定温度範囲		25 ~ 800
流入ガス	N ₂ (200ml/min)	Air(200ml/min)

4. 実験結果および考察

4.1 熱分解生成物割合

図2に各熱分解条件下での熱分解生成物割合を示す。その結果、熱分解残渣については、熱分解温度が高くなるほど、熱分解残渣の生成割合が低くなった。特に、熱分解温度400においては約50 wt%ほどであったが、450では約30 wt%程度となり急激に減少した。特にRDF 11は400と450で急激に減少している。図3に示す各RDFの熱重量変化から、RDF 1と2における熱重量曲線を示したが、RDF 11については、400以上から急激に重量減少することが分かった。熱分解についての既往の研究結果¹⁾⁻⁴⁾より、紙類は、355~371で最も重量減少（セルロースとヘミセルロース）を示し、400から緩やかな重量減少（リグニン）を示し、また、プラスチック類では、ポリスチレン、ポリプロピレン、低密度ポリエチレン、高密度ポリエチレンでは、350~500の間で重量減少が見られ、417~479で最も重量減少する。さらに、PVCでは200~380と380~550の2段階に分かれることが知られている。したがって、400以上からの急激な重量減少は、主にプラスチック類の重量減少であると考えられた。

タールについては、熱分解温度400が一番低く、RDF 1と2は約25 wt%でRDF 11では約16 wt%程度であった。450では、急激に増加しRDF 2では約35 wt%、RDF 1と11では約47 wt%であったことから、少なくとも400より高い温度でタールの生成が活発に行われると思われる。

熱分解ガスおよび活性炭吸着量については、熱分解温度が高くなるに従い増加した。なお、ロスが最大で約20 wt%ほどあるが、これは炉心管内壁に付着したタールの未回収分や、熱分解ガスにおいて炭素数3以上のなかでも活性炭カラムにおいても吸着しにくい炭化水素などが測定できなかったことが原因だと思われる。

以上のことから、熱分解温度が高くなるほど、熱分解残渣の生成割合が減少し、熱分解ガスの生成割合が増加することが分かった。また、プラスチックの含有割合が高いRDFの急激な熱分解が起こる温度は、400以上であることから、ゴミ質によって熱分解生成物割合が異なることが分かった。

4.2 熱分解ガス

図4に各RDFの異なる熱分解条件下での組成別

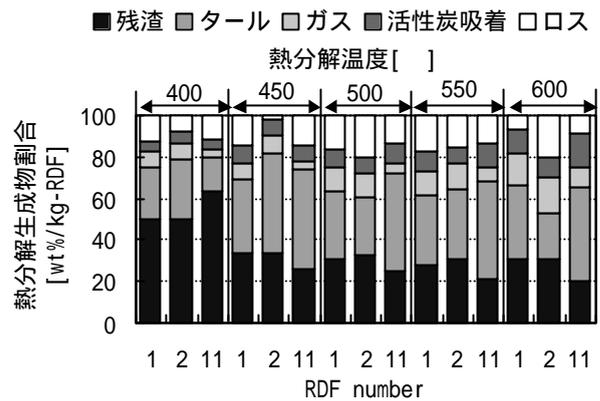


図2 熱分解条件の違いによる熱分解生成割合

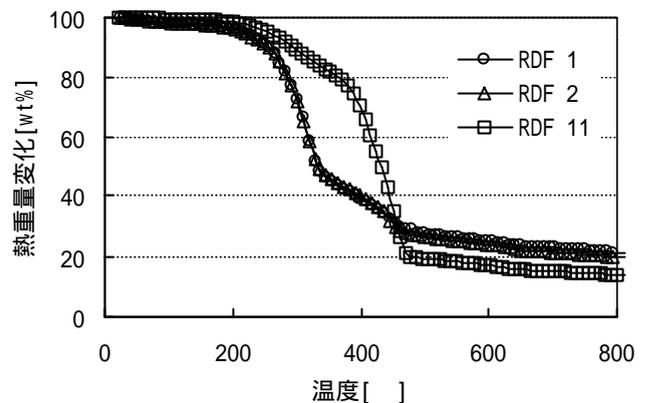


図3 各RDFの熱重量変化

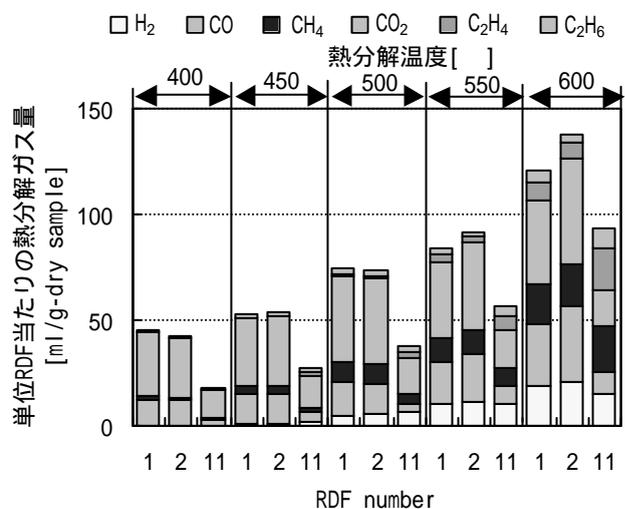


図4 組成別累積熱分解ガス量

累積熱分解ガス量を示す。この結果から、 H_2 や CH_4 などの可燃性ガスの発生は、熱分解温度が高くなるに従い、発生量も多くなっていることが分かる。また、RDF 11 については、プラスチック類の含有割合が多いことから、他の RDF に比べ、 CO や CO_2 などの無機性ガスの発生量が少なく、 C_2H_4 や C_2H_6 の有機性ガスの発生量が多かった。

以上のことから、可燃性ガスの発生量を促進させるのであれば、熱分解温度が高く設定すればよいことが分かった。

4.3 熱分解残渣

図5に熱分解残渣の工業分析結果および工業分析結果から計算した燃料比(=固定炭素/揮発分)を示す。その結果、熱分解温度が高くなるに従い、熱分解残渣中の揮発分が減少し、燃料比が増加した。灰分や固定炭素については、熱分解温度が高くなるに従い、増加することが認められたが、その量は若干量であるため、燃料比の増加は、揮発分の減少が大きく影響していると考えられる。RDF 11では、熱分解温度400 および450 では、その他のRDFと比較して、燃料比が低かったが、500以上からは、ほとんど差が見られなかった。この原因としては、一般廃棄物中のプラスチック類の熱分解は、およそ500前後で完了していることに起因していると考えられる。

図6に熱分解残渣の燃焼時の熱分析結果を示す。これより、熱分解温度が高い熱分解残渣ほど、燃焼開始温度が高温度側に移行していることから、熱分解温度が高くなるほど、熱分解残渣は燃焼しにくい組成に変化していると考えられる。

以上のことから、熱分解温度が高くなるほど、熱分解残渣中の揮発分が減少し、燃料比が高くなり、燃焼しにくい組成に変化することが分かった。

5. 熱分解工程と燃焼・溶融工程を通して最適な熱分解条件の検討

ガス化溶融システムにおいて、熱分解工程は非常に重要な工程であり、熱分解条件によって、熱分解生成物に変化し、後の燃焼・溶融工程に大きな影響を及ぼす。そこで、熱分解工程と燃焼・溶融工程を通して最適な熱分解条件を検討することにした。

検討項目には、溶融するためには、多くの熱量を必要とすることから、単位RDF当たりの熱分解残渣と熱分解ガスの低位発熱量の和とし、熱分解残渣は工業分析結果からの3成分の式、熱分解ガスは各ガス組成の低位発熱量の和から算出した。熱分解工程での処理効率を考慮し、熱分解残渣の生成割合、全体的な処理速度を考慮し、ごみ処理速度とし、尾崎⁵⁾等の燃料比とごみ処理速度の関係から求めることとした。さらに、熱分解残渣の燃焼性および均質性から、熱分解残渣の燃料比、そして、熱分解に必要なエネルギーとして、熱分解温度とした。本来ならば、熱分解温度はエネルギー効率から、エネルギー量として算出

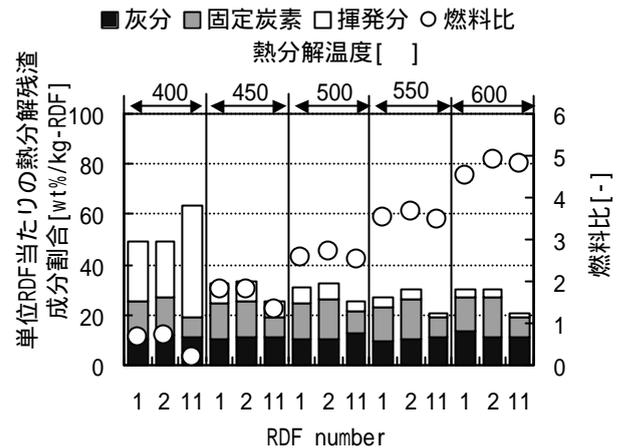


図5 熱分解条件の異なる熱分解残渣の成分割合

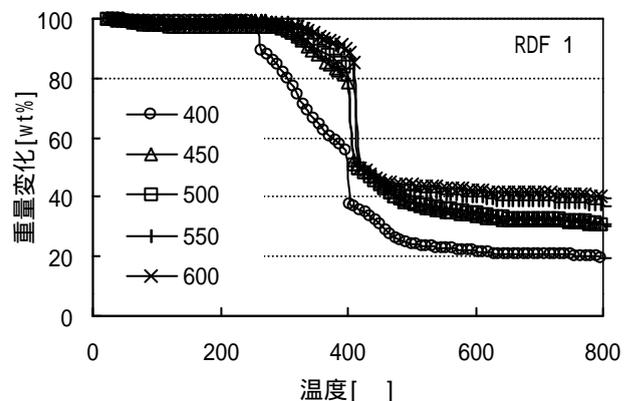


図6 熱分解残渣の燃焼挙動の例

した方が望ましいが、熱のロス分が測定できなかった。今後の課題と致したい。

各種評価項目を表3に示す。熱分解温度400 では、低位発熱量は高いが、熱分解残渣の生成割合が高く、ごみ処理速度が遅いことから、望ましくないと思われる。

熱分解温度600 では、熱分解残渣の生成割合が低く、ごみ処理速度が速いが、熱分解温度が高い割には、低位発熱量が低く、エネルギー効率が悪いと考えられ、望ましくないと思われる。

熱分解温度450～550 では、各評価項目で大きな違いがないため、どの熱分解条件でも良好な処理が可能であると思われる。しかし、どの条件とも良好であるのであれば、熱分解工程における投入エネルギーが低い方が望ましいことから、熱分解温度550 は、その他の2つの条件と比較すると、望ましくないと考えられる。また、熱分解温度450 では、ごみ質の違いによって、燃料比が異なるため、組成が変動することを考慮し、燃焼・溶融工程の安定性を考えると、望ましくないと考えられる。

したがって、熱分解工程と燃焼・溶融工程を通して最適な熱分解条件は、500 付近であると思われる。

表3 熱分解条件と最適化評価における各種評価項目

RDF No.	熱分解温度 []	単位RDF当たりの熱分解残渣と熱分解残渣の低位発熱量の和 [kcal/kg-RDF]	熱分解残渣の生成割合 [wt%]	ごみ処理速度 [kg/m ² h]	燃料比 [-]
1	400	1,870	50.0	30.0	0.65
2		1,780	50.1	29.9	0.69
11		2,410	63.8	36.1	0.17
1	450	1,190	33.4	43.4	1.82
2		1,190	34.1	42.5	1.79
11		800	25.8	56.9	1.33
1	500	1,190	31.0	46.1	2.57
2		1,240	32.8	43.0	2.74
11		710	25.4	56.2	2.52
1	550	1,180	27.9	50.1	3.52
2		1,280	31.2	44.9	3.65
11		810	21.1	66.5	3.48
1	600	1,370	30.9	44.3	4.53
2		1,490	30.6	44.1	4.90
11		1,140	20.6	65.4	4.79

6. 同一熱分解条件下でのごみ質の違いによる熱分解生成物への影響

前節において最適な熱分解条件は、500 付近と考えられた。しかし、一般廃棄物は多組成であり変動することから、様々のごみ質に適用できなければならない。

そこで、表1に示した全国から提供していただいたRDFを用いて、熱分解温度500、熱分解時間を60分で熱分解することとした。

6.1 同一熱分解条件下でのごみ質の違いによる熱分解生成物割合

図7に同一熱分解条件下のごみ質の違いによる熱分解生成物割合を示す。この結果から、可燃ごみ系RDFと厨芥類を除いた可燃ごみのRDFにおける熱分解生成物割合は、ほぼ同じであったが、プラスチック類の含有割合が高いRDFの熱分解残渣の生成割合が低くなり、タールの生成割合が高くなるこ

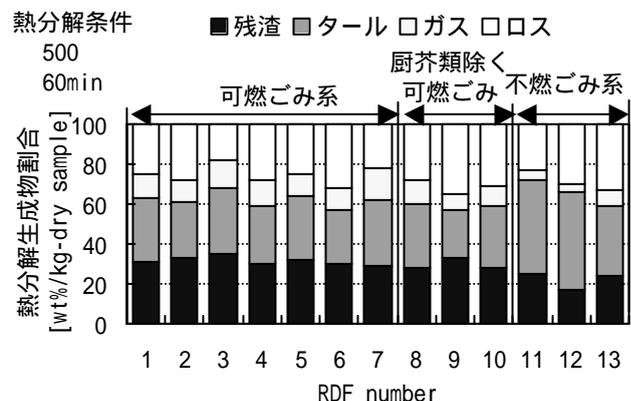


図7 ごみ質の違いによる熱分解生成物への影響

とが分かった。

6.2 同一熱分解条件下でのごみ質の違いによる熱分解残渣への影響

図8に同一熱分解条件下のごみ質の違いによる熱分解残渣の工業分析結果と工業分析から計算した燃料比を示す。表1に示したとおり、ごみ質が大きく異なるにもかかわらず、熱分解温度500、60分で熱分解すると熱分解残渣の燃料比は、ほぼ2~3の間であった。このことから、ごみ質が大きく異なっていたとしても、本研究で提案する条件で熱分解することによって、熱分解残渣を均質にすることができ、後の燃焼・溶融工程において、ごみ質が変化しても安定な処理が可能であると考えられた。

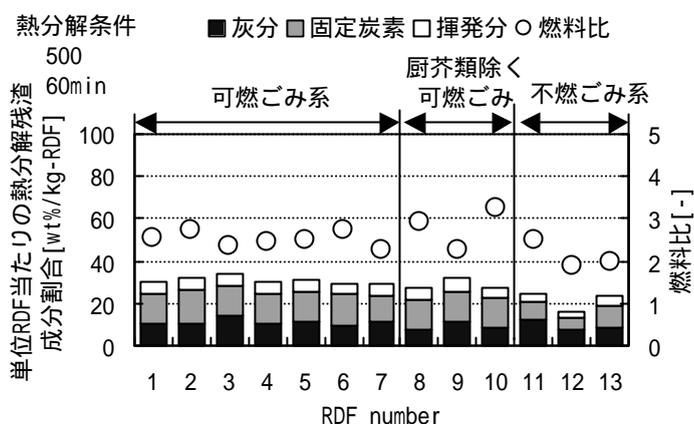


図8 ごみ質の異なる熱分解残渣の成分割合と燃料比

7. まとめ

様々なごみ質から製造されたRDFを模擬ごみとして、熱分解実験を行った結果、以下の知見が得られた。

- 1) 熱分解温度が高くなるほど、熱分解残渣の生成割合が減少し、タールおよび熱分解ガスの生成割合が増加し、熱分解残渣の燃焼性が低下した。
- 2) プラスチック類の含有割合が高いごみ質では、熱分解残渣の生成割合が低く、タールおよびガスの生成割合が高くなることが分かった。
- 3) 熱分解工程と燃焼・溶融工程を通して最適な熱分解条件は、500 付近であることが考えられた。
- 4) ごみ質の組成に変動があっても、500、60 分での熱分解によって、熱分解残渣の成分が均質になり、後の燃焼・溶融工程で、安定した処理が可能であることが示された。

参考文献

- 1) 豊田 素子, 岩本 聡浩, 古角 雅行: 熱重量・示唆熱分析に基づくプラスチックの燃焼特性に関する考察, 第10回廃棄物学会研究発表講演論文集, 371-373, (1999)
- 2) A.M. Li *et al.*: Pyrolysis of solid waste in a rotary kiln: influence of final pyrolysis temperature on the pyrolysis products, *J.Anal.Pyrolysis*, Vol.50, 149-162, (1999)
- 3) L.S rumet *al.*: Pyrolysis characteristics and kinetics of municipal solid wastes, *Fuel*, Vol.80, 1217-1227, (2001)
- 4) 山田 浩一, 福山 丈二, 本多 淳裕: プラスチック廃棄物の熱分解処理, 用水と排水, Vol.15, No.6, 706-718, (1973)
- 5) 尾崎 真司, 黒石 智, 米田 主, 七里 雅隆: ガス化溶融プロセスの燃焼溶融に関する実験的考察, 第9回廃棄物学会研究発表会講演論文集, 601-603, (1998)