

示差熱分析データからみた焼却灰・飛灰の溶融パターンの分類

高岡昌輝¹・藤原健史²・藤田淳³・武田信生⁴

¹正会員 工博 京都大学助教授 工学研究科環境工学専攻(〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

²正会員 工博 京都大学助教授 工学研究科環境工学専攻(〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

³工修 (株) 神戸製鋼所 都市環境カンパニー(〒657-0845 神戸市灘区岩屋中町4丁目2-15)

⁴フェロー会員 工博 京都大学教授 工学研究科環境工学専攻(〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

都市ごみ焼却灰、飛灰および、下水汚泥焼却灰など多種多様な灰分に対して、熱重量示差熱分析を適用し、高温下での試料の挙動を観察し、溶融パターンを分類することを試みた。41試料は示差熱曲線の形状より、5パターンに分類された。また、900~1450°C範囲の約1°Cごとの示差熱曲線のデータ(577データ)を特徴抽出することにより、平均19データに圧縮することができた。各分示差熱曲線類における示差熱曲線の代表パターンを決定するため、採用すべき共通温度とその数を決定した。さらにパターン認識を用いた最適化により代表パターンを決定し、示差熱曲線の判別モデルを作成した。本モデルを未知試料に対し適用し、簡便に示差熱曲線から溶融パターンが分類できることを明らかにした。

Key Words: differential thermal analysis, bottom ash, fly ash, fusion characteristics, feature extraction

1. はじめに

現在、都市ごみ焼却灰・飛灰および下水汚泥焼却灰はさらなる減容化、無害化を求められ、溶融処理が行われるようになってきている。特に都市ごみ焼却残渣についてはダイオキシン類に代表される有機塩素化合物や、灰から溶出する重金属類の問題に対し溶融処理が有効であることが確認されてきており、今後も残渣の処理・処分法の大きな柱になるとを考えられる。

溶融処理プラントでは正確な溶融温度を測定することにより、的確な溶融温度管理が可能となり、溶融炉内耐火壁の耐久性の向上、投入エネルギーの低減さらには防災上も有利である。従来からの基本的な溶融特性の測定方法では、灰を円錐型、円柱形などに成型した試料を加熱し、その形状変化により軟化点、融点、溶流点を決定する手法(JIS法、DIN法)が用いられる。この方法は灰の粘性や表面張力を含んだ溶融特性であり、本質的な意味での融点、すなわち灰の相変化を表しているわけではない。また、形状を判断する基準に測定者の主観がはいる余地があり、特に都市ごみ焼却残渣などの多成分かつ腐食

性のある試料では試料と試料台との反応は避けられず、測定結果に誤差を生じる点が問題である。

そこで、本研究では、都市ごみ焼却灰、飛灰および、下水汚泥焼却灰など多種多様な灰分に対して、窯鉱業、金属精錬、高分子工業等の分野で汎用的に用いられている熱分析の一手法である熱重量示差熱分析(TG-DTA: Thermogravimetry - Differential Thermal Analysis)を適用し、高温下での試料の挙動を観察し、溶融パターンを分類することを試みた。TG-DTA法では、試料の脱水、燃焼、融解、揮散などの反応に伴う微細な熱的変化を測定することが可能である¹⁾。この法は、本質的な意味で試料の熱変化に関する情報を与え、JIS法より詳細に温度に対応した時系列情報を与える。試料の熱変化についてはそれぞれTGとDTAのデータおよび熱分析終了後に試料を観察することによってわかる。さらにDTA曲線のパターンを解析することにより、被溶融物が何℃で溶融されたかを知ることができる。多くの試料についてこのTG-DTA法を適用し、データを蓄積することで高温域でのパターンを分類することにより、未知試料の高温域での挙動を予測することが可能であると考えられる。

表-1 試料の由来と灰組成

仕様		試料名	Ca	Si	Al	Fe	Mg	Na	K	P	Cl	S	その他	塩基度	
都市ごみ焼却残渣	ストーカ	電気集じん機	EP1	16.5	4.4	3.1	0.5	1.6	9.3	9.0	0.4	27.5	1.9	25.8	2.44
			EP2	19.3	6.2	4.4	0.7	2.4	7.9	6.0	0.7	20.8	1.7	29.9	2.03
			EP3	14.5	9.2	6.6	1.6	3.0	8.4	5.9	0.8	16.9	2.8	30.3	1.03
			EP4	27.2	7.8	5.9	1.0	3.2	3.9	3.2	0.8	11.3	1.4	34.3	2.27
			EP5	30.1	6.9	5.3	0.8	2.0	4.3	3.0	0.5	13.8	0.9	32.2	2.84
			EP6	18.7	7.3	5.1	1.0	2.7	6.2	5.1	0.7	18.7	1.5	33.1	1.67
			EP7	12.6	9.2	5.4	1.4	3.6	7.2	6.6	1.0	13.1	3.7	36.3	0.89
			EP8	15.0	7.5	5.0	1.5	2.9	11.2	7.6	0.8	15.3	4.3	28.9	1.30
			EP9	24.5	6.5	4.6	1.1	2.6	5.4	4.0	0.6	16.0	2.2	32.6	2.46
			EP10	20.0	13.6	9.8	1.8	3.0	2.1	1.6	0.7	5.3	0.6	41.7	0.96
			EP11	11.7	8.1	4.5	2.1	3.0	10.4	6.4	0.6	17.3	3.7	32.1	0.94
			EP12	12.4	8.7	6.0	1.7	2.9	7.9	5.3	0.5	16.9	1.4	36.3	0.93
			EP13	12.3	8.1	5.1	1.5	2.5	8.4	5.8	0.6	16.3	2.5	36.9	0.99
			EP14	13.7	8.5	6.3	1.6	3.2	8.3	4.3	0.6	14.7	1.9	36.9	1.05
			EP15	12.3	8.9	5.3	2.2	3.3	8.2	5.8	0.6	11.8	4.2	37.5	0.90
			EP16	13.9	9.0	6.1	6.3	3.3	7.3	4.4	0.7	10.1	3.6	35.3	1.01
			EP17	13.9	9.5	6.2	1.8	3.8	7.6	5.4	0.8	11.4	3.7	35.9	0.95
			EP18	15.7	10.5	7.1	1.8	3.6	6.1	3.9	0.8	10.9	1.8	37.9	0.98
	バグフィルタ		BF1	37.3	6.3	1.2	0.5	0.6	1.9	1.6	0.1	16.7	1.5	32.3	3.85
			BF2	35.9	3.2	2.2	0.4	1.4	2.6	2.3	0.2	18.4	1.2	32.1	7.24
			BF3	30.0	6.4	1.7	0.6	1.1	3.3	3.3	0.3	19.3	2.0	31.9	3.04
			BF4	37.6	6.1	1.1	0.4	0.6	1.8	1.5	0.1	16.5	1.5	32.6	4.00
	流動床	電気集じん機	FEP1	30.1	6.6	5.2	2.3	2.2	2.7	1.6	0.5	12.7	0.8	35.2	2.98
			FEP2	28.0	7.2	5.3	1.3	2.6	3.3	2.2	0.8	11.8	1.0	36.6	2.55
		バグフィルタ	FBF1	35.2	5.7	4.5	1.3	2.2	2.3	1.2	0.5	8.9	0.7	37.5	4.02
			FBF2	32.4	6.6	4.6	1.3	2.2	3.7	2.2	0.7	10.7	0.8	34.8	3.23
	ストーカ	焼却灰	BA1	22.9	11.4	8.7	1.4	2.6	1.4	1.0	0.9	1.6	0.6	47.5	1.31
			BA2	36.3	3.2	2.1	0.4	1.4	2.7	2.3	0.2	18.9	1.2	31.3	7.48
			BA3	20.7	9.4	6.4	4.3	2.4	1.8	1.1	1.0	1.9	1.7	49.4	1.44
下水汚泥焼却灰	流動床	有機系凝集剤添加	OS1	7.2	14.2	9.1	2.6	4.3	0.9	3.7	14.8	0.0	0.1	43.2	0.33
			OS2	7.1	13.8	9.0	5.2	3.0	0.5	2.3	14.6	0.0	0.2	44.3	0.34
			OS3	9.3	21.0	10.0	5.3	1.8	0.6	1.7	7.4	0.0	0.4	42.5	0.29
			OS4	8.6	15.6	10.0	4.6	2.5	0.9	1.9	12.6	0.0	0.3	42.9	0.36
			OS5	9.4	15.2	9.2	4.0	3.6	0.5	2.6	13.8	0.0	0.2	41.5	0.40
			OS6	8.9	11.5	8.8	8.0	3.0	1.6	2.2	11.8	0.0	1.5	42.7	0.50
	多段流動床	無機系凝集剤添加	IS1	4.4	21.6	11.5	8.6	1.7	0.8	2.1	6.4	0.0	0.4	42.4	0.13
			IS2	26.6	10.7	5.4	7.9	2.2	0.4	1.5	8.0	1.5	1.3	34.5	1.63
			IS3	30.5	6.1	3.5	14.4	0.8	0.3	0.5	3.0	3.5	2.5	34.8	3.25
			IS4	29.3	10.5	5.2	6.5	1.2	0.3	0.9	3.7	1.3	1.3	39.9	1.82
			IS5	20.6	9.7	5.7	12.5	1.8	0.4	0.9	8.5	0.5	1.8	37.6	1.38
			IS6	35.5	6.5	6.4	10.1	1.5	0.1	0.4	3.9	1.6	1.3	32.6	3.54

本論文では、まず41試料の焼却灰・飛灰のDTA曲線を測定し、観察された現象について考察した。次にDTA曲線が時系列で得られることに注目し、41試料の焼却灰・飛灰の溶融パターンを5グループに視覚および計算で得られるデータ間の統計的距離により分類した。さらに、各試料においては900~1450℃のDTA曲線に対して特徴抽出を行うことにより約1℃ごとの577データを14~32(平均19)データに圧縮した。圧縮後のデータに対して、各分類の示差熱曲線の代表パターンを決定するため、採用すべき共通温度およびその数を決定した。さらにパターン認識を用いた最適化により上記で分類したグループごと

に代表パターン(ベクトル)を決定し、DTA曲線の判別モデルを作成した。最後に、このモデルの評価を行うために未知試料に対して DTA曲線を測定し、どのパターンに分類されるかを決定した。

2. 実験方法

(1) 試料

表-1に示すように、都市ごみ焼却残渣は都市ごみストーカ炉電気集じん機(EP)灰を18試料(EP1~18)、都市ごみストーカ炉バグフィルタ(BF)灰を4

試料(BF1~4), 都市ごみ流動床灰はEP灰・BF灰をそれぞれ2試料ずつ(FEP1~2, FBF1~2), 都市ごみ焼却灰を3試料(BA1~3)サンプリングした。また、下水汚泥焼却灰は、脱水時の凝集剤として有機系または、無機系高分子凝集剤を使用していた焼却灰をそれぞれ6試料ずつ(OS1~6, IS1~6), 計41試料についてサンプリングした。表-1中の試料IS1では、ボリ塩化アルミニウムを凝集剤として使用している。また試料OS3とIS4は同一の下水処理場からサンプリングし、それぞれ有機系と無機系の凝集剤を使用している試料である。

都市ごみ焼却灰の3試料については灰パンカで冷却水に浸っていたものをサンプリングしたため、前処理として105°Cで10時間乾燥した。また、脱水ケーキの状態でサンプリングした試料OS1, OS2, IS2については、105°Cで乾燥後、電気炉内で800°C, 約3時間焼却し灰化した。以上の試料を均一化するためふるいにかけ500 μm以下を試料とした。

試料は波長分散型の蛍光X線分析装置(島津製作所製:XRF-1700)により元素分析を行った。定量法はファンダメンタルパラメータ法により行った²⁾。測定は各試料につき2回を行い、これを平均した値を採用した。灰分の溶融特性に大きな影響を与える指標として、塩基度(CaO/SiO₂)が汎用的に用いられ、この値が1付近で最も融点が低くなることが経験的に知られている³⁾。さらに、これらの成分の他にも酸化アルミニウム(Al₂O₃)、酸化鉄(Fe₂O₃)、酸化マグネシウム(MgO)、酸化ナトリウム(Na₂O)、酸化カリウム(K₂O)、五酸化二リン(P₂O₅)の成分も比較的多く含まれ、溶融特性に影響を及ぼすことが報告されているため³⁾、成分分析の対象とした。また、塩化物の多くは溶融時に蒸発していると考えられるが、溶融域までに達する間の試料の変化を解析するため塩素および硫黄量についても対象とした。これらの元素は本報ではすべて元素濃度表記とし、他の元素は「その他」として表記した。

(2) 热分析方法

a) 実験装置

本実験で使用した装置は、TGとDTAが同時に測定可能な高温型の示差熱天秤装置(理学(株)製、TG8110)であり、これに雰囲ガス流量を変化させるために流量計を接続して用いた。また、試料皿には白金ロジウム製サンプルパン(Φ5.2mm × h2.5mm)を使用した。試料ホルダーは酸素などの活性雰囲気や試料からの分解生成物に対して耐食性をもたせるために、アルミナでコーティングしたものを使用した。基準物質にはα-Al₂O₃を用いた。また、電気炉、

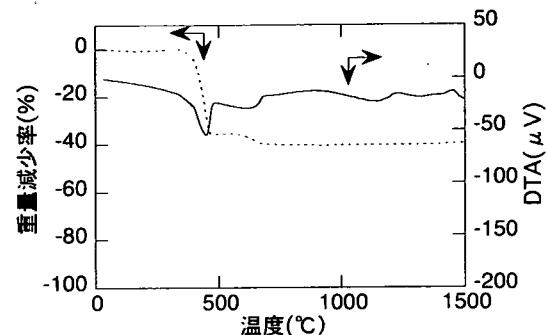


図-1 Ca(OH)₂のTG-DTA曲線

試料、基準物質の温度を測定する熱電対はPt-13%Rh合金とPtとを組み合わせたもの(JIS, R型)を使用した。

b) 実験条件

熱分析の基本条件として、試料重量は約10~15mg、ガス流量はTG測定にぶれが生じない程度の150mL-空気/minとし、加熱最大温度は装置上の制約から1450°Cとした。昇温速度が大きくなると、反応が開始する温度やピーク位置が高温側に移行するため、適正な値に設定しなければならない。したがって、昇温速度を2, 5, 10, 20°C/minに変化させてその影響を予備的に検討すると、2~10°C/minではDTA曲線が下降しはじめる位置にはほとんど違いがみられなかったが、昇温速度が20°C/minの測定では、約70°C高温側に移行していることが確認された。昇温速度が小さい方が、より正確な試料の物性を与えると考えられたが、分析時間を考慮して昇温速度は10°C/minとした。測定回数は再現性に関する試験を行った結果から、1つの試料につき2回の実験を行い、これらを平均化して測定結果として採用することとした。すべてのデータはブランクによる補正を行った。

3. 実験結果

TGは重量減少率を表し、DTAは、下向きのピークが吸熱反応、上向きのピークが発熱反応を表す。試料の分析とともに灰分に多量に含まれると考えられる化合物Ca(OH)₂(図-1)、CaO、CaCl₂·2H₂O(図-2)、CaCl₂·6H₂O、CaCO₃(図-3)、NaCl(図-4)およびKCl(図-5)について同様の測定を行い、考察に加えた。

(1) 都市ごみストーカ炉EP灰

都市ごみストーカ炉EP灰の代表として試料EP1の

測定結果を図-6に示した。重量減少は100°C付近に水分の蒸発あるいは CaCl_2 水和物の脱水反応により、約5%の吸熱ピークを伴う重量減少が生じた。つづいて、800~1000°Cにかけて NaCl , KCl などの塩類の分解や、金属塩の揮散蒸発による25~30%の重量減少がみられた⁹⁾。その後1350°C付近から溶融と考えられる吸熱反応が開始した。EP灰は測定している試料数が多いこともあるが、TG-DTA曲線にはいくつか異なるパターンが見られた。1450°Cにおける都市ごみストーカ炉EP灰の平均重量減少率は29.4%であった。

(2) 都市ごみストーカ炉BF灰

都市ごみストーカ炉BF灰の代表として試料BFIの測定結果を図-7に示した。都市ごみストーカ炉BF灰では、HCl除去のため $\text{Ca}(\text{OH})_2$ が過剰に吹き込まれているため、Caの含有割合が約30~38%と高かった。まず、100°C付近に試料EP1と同様の脱水による吸熱ピークを伴う約5%の重量減少が生じた。つづいて400, 600°C付近で $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の脱水反応と考えられる吸熱反応を伴う重量減少がみられた。900°C付近には大きな吸熱反応のようなものが観察されるが、測定後の試料をみると、これら都市ごみストーカ炉BF灰はどれも溶融していないため、吸熱反応は溶融に伴うものではないことがわかった。 CaCl_2 水和物のDTA曲線と良く似ていたので、試料BFIにおけるこの温度域のDTA曲線の形状は消石灰とHClが反応した CaCl_2 が強く影響を及ぼしていると推測された。1450°Cにおける都市ごみストーカ炉BF灰の平均重量減少率は37.4%と、他のカテゴリーと比べて最大の重量減少を示した。都市ごみストーカ炉EP灰の重量減少の様子と比較すると、400~600°Cにかけての $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の脱水反応に由来すると考えられる重量減少により都市ごみストーカ炉EP灰よりも平均的に大きな重量減少を示した。

(3) 都市ごみ流動床炉EP・BF灰

都市ごみ流動床炉EP・BF灰の代表として試料FEP1, FBF1の測定結果をそれぞれ図-8, 図-9に示した。都市ごみ流動床炉EP・BF灰ではストーカ炉BF灰と同様にCaの含有割合が約28~35%と高かったため、類似した曲線がみられた。1000~1200°CにおけるDTA曲線の形状はやはりCa化合物に由来するものと考えられた。ストーカ炉BF灰と異なる点は、1400°C付近から溶融と考えられる吸熱反応が生じた点であった。1450°Cにおける都市ごみ流動床炉EP, BF灰の平均重量減少率は23.9%であった。このカテゴリーの灰分は、都市ごみストーカ炉BF灰の重量減

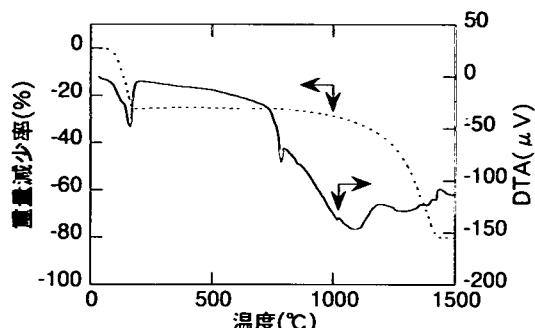


図-2 $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ の TG-DTA 曲線

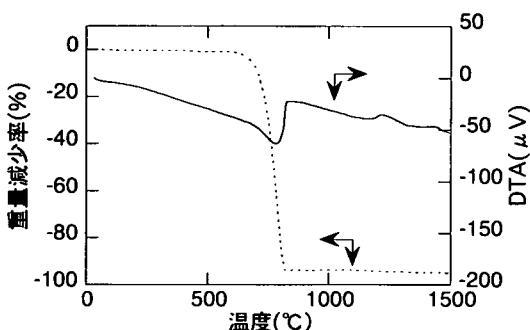


図-3 CaCO_3 の TG-DTA 曲線

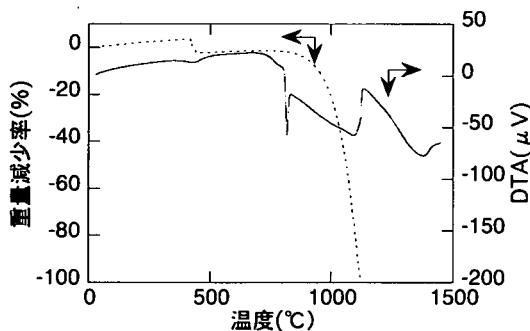


図-4 NaCl の TG-DTA 曲線

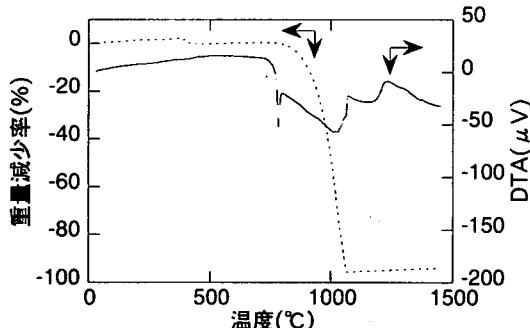


図-5 KCl の TG-DTA 曲線

少に比較的似た傾向を示し、約400~600°CにかけてのCa(OH)₂の脱水反応に由来すると考えられる重量減少がみられた。しかし約1000°C以降はほとんど重量減少を示さなかったため、都市ごみストーカ炉BF灰より小さな重量減少になった。

(4) 都市ごみ焼却灰

都市ごみ焼却灰の代表として試料BA1の測定結果を図-10に示した。都市ごみ焼却灰ではCaの含有率のばらつきが大きく、3試料で20~36%の幅があった。試料BA1ではTG曲線はなだらかに下降し、600°C付近から約7%の重量減少がみられた。これはCaCO₃の熱分解ではないかと考えられた。その後はほとんど重量減少はみられず、1100°C付近から溶融と考えられる吸熱反応が開始した。1450°Cにおける都市ごみ焼却灰の平均重量減少率は23.9%であった。

(5) 有機系凝集剤添加下水汚泥焼却灰

有機系凝集剤添加下水汚泥焼却灰の代表として試料OS1の測定結果を図-11に示した。脱水過程に有機系凝集剤を使用している汚泥灰分には凝集剤として石灰が投入されていないため、Caの含有率は平均8%程度であった。DTA曲線では1000~1250°Cにかけて吸熱反応がみられるが、これは芹沢ら⁵⁾が石炭灰の溶融特性を測定する際に定めた吸熱ピークが2つ観察されるパターンであると考えられた。この吸熱ピークは重量減少を伴わないため、1000°Cと1250°Cからの2段階の溶融が生じていると考えられる。また、無機系下水汚泥灰分の組成と比較すると、Caが少なくSi, Al, Pが多かった。無機系下水汚泥灰分にはこのような2段階の吸熱ピークがみられないため、この前段階の吸熱ピークはPとSi, Alを含む化合物が影響すると考えられた。1450°Cにおける有機系下水汚泥灰分の平均重量減少率は4.0%であった。これは組成中に揮発成分であるNaCl, KClがほとんど含まれないためであると考えられた。

(6) 無機系凝集剤添加下水汚泥焼却灰

無機系凝集剤添加下水汚泥焼却灰の代表として試料IS2の測定結果を図-12に示した。無機系下水汚泥灰分のカテゴリーから試料IS1を代表としなかったのは、この試料では他の無機系下水汚泥灰分とは異なり、凝集剤としてポリ塩化アルミニウムを用いていたために、異なる傾向が現れたからである。試料IS2のCaの含有率は約27%と大きかったが、都市ごみ焼却残渣にみられたようなCa化合物の影響は特にみられなかった。このことから、都市ごみ焼却残渣中にはCa化合物は他の化合物と共に融混合物をつくらず、そ

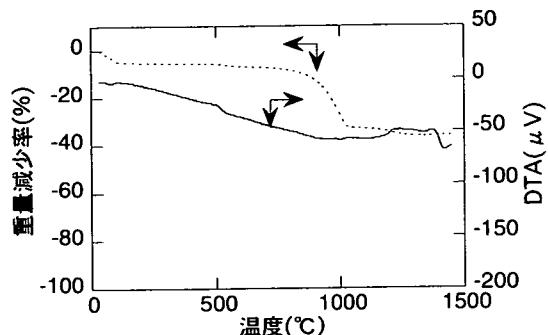


図-6 試料EP1のTG-DTA曲線

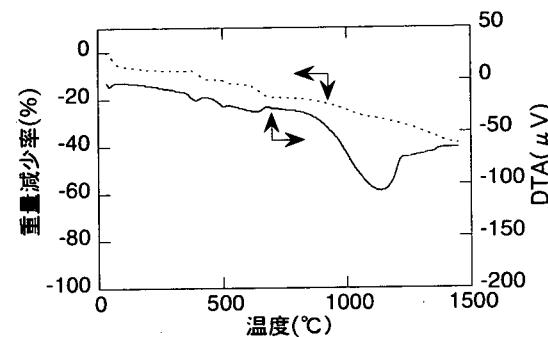


図-7 試料BF1のTG-DTA曲線

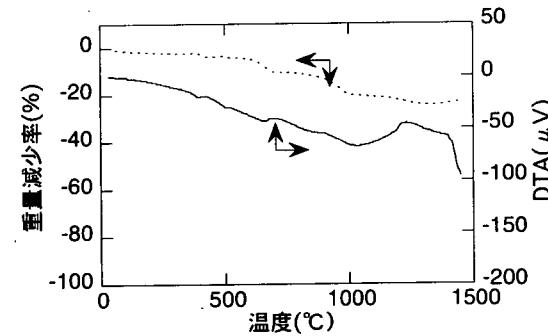


図-8 試料FEPIのTG-DTA曲線

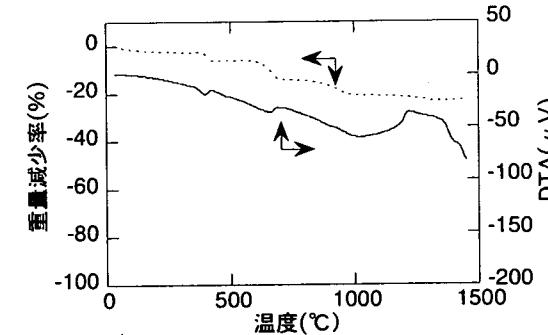


図-9 試料FBFIのTG-DTA曲線

のままの形態で含有されており、下水汚泥焼却灰ではすでに共融しているものと考えられた。また有機系下水汚泥灰分にみられた1000℃付近からの吸熱ピークは観察されず、1200℃付近から溶融と考えられる吸熱反応が観察された。1450℃における無機系下水汚泥灰分の平均重量減少率は9.0%と小さかった。

4. 溶融パターンの分類

(1) グループ化

a) 視覚によるグループ化

TG-DTA測定から900℃以上の溶融温度域におけるDTA曲線をその形状によって5つのグループに分類した。分類した基準は、グループ(G₁)は溶融のための吸熱反応が1450℃までにみられない試料、グループ(G₂)は吸熱反応が1400℃付近の高温域で開始している試料、グループ(G₃)は1000, 1200℃付近で2段階の吸熱反応が観察されるものとした。残りの試料では全体的な傾向として顕著な特徴がなく、どれも1200℃付近から吸熱反応が始まっていた。そこで溶融時の吸熱反応の傾きによって、溶融状態に差がみられたことを考慮して、DTA曲線の傾きを比較して2つに分類した。傾きが比較的急なものをグループ(G₄)、緩やかなものをグループ(G₅)とした。以下これらのグループをそれぞれ、G₁～G₅と表示した。

b) データ間統計的距離による修正

ここでは計算機によりデータ間の統計的距離を計算し、上記のグループ分けの評価、再検討を行った。各試料のDTA測定データより、900～1450℃のDTA値を取り出した。各測定のデータ数には多少のばらつきがあるため、データ数をそろえるために約1℃ごとに1450℃から数えて577個のデータを取り出し、温度の低い方のデータから順にX_i=(x_{i,1}, x_{i,2}, ……, x_{i,j}, ……, x_{i,577})、(i=1～41)とした。i, jはそれぞれ試料番号とデータの番号を示す。

次に、ベースラインの位置やピークの高さは、同条件の測定であっても異なり、また、ピークの高さにばらつきがあるため、これらの点を補正するために次の手順でX_iの初期値(x_{i,1})が0、最小値(Min(X_{i,j}))が-1となるように標準化を行った。以下の計算によって標準化されたデータをX'_i=(x'_{i,1}, x'_{i,2}, ……, x'_{i,j}, ……, x'_{i,577})とした。

$$X'_i = \frac{1}{\text{Min}(X_i)} (0, x_{i,2} - x_{i,1}, \dots, x_{i,j} - x_{i,1}, \dots, x_{i,577} - x_{i,1}) \quad (1)$$

この標準化によって得られたX'_iの差をとり、その平方和の大きさによりデータ間の統計的距離を比較

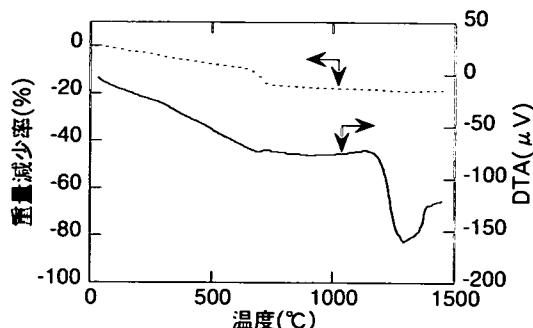


図-10 試料 BAI の TG-DTA 曲線

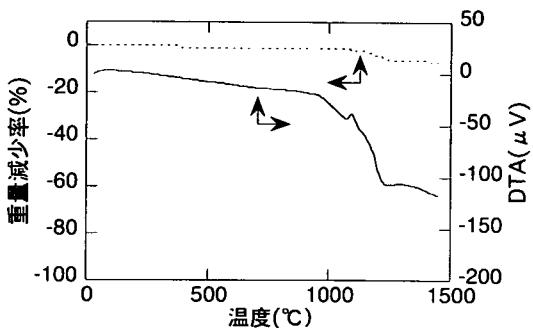


図-11 試料 OS1 の TG-DTA 曲線

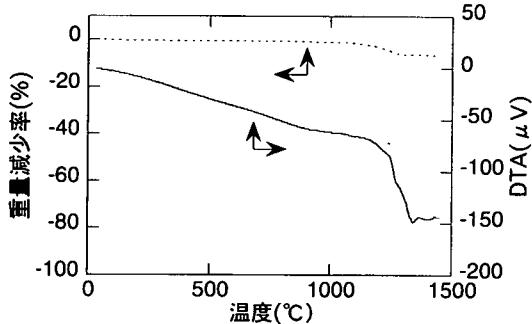


図-12 試料 IS2 の TG-DTA 曲線

した。たとえば、データ X₁, X₂ の統計的距離を、

$$d_{1,2} = \sum_{j=1}^{577} (x'_{1,j} - x'_{2,j})^2 \quad (2)$$

と表した。この標準化により、標準化を行わなかった場合に比較して、データ間の差がより明確に現れることが確認された。DTAデータ間の統計的距離による結果と先に行った視覚による分類結果を比較すると、試料IS1, IS5がG₃よりG₅、試料BA3がG₄よりG₃、試料EP10がG₄よりG₅、試料IS2がG₅よりG₄の方がデータ間の統計的距離が小さいためそれぞれのグループへと移動させた。このように、視覚によってある程度の分類は可能であるが、上記のように計算

表-2 各グループの DTA 曲線の模式図と分類結果

分類	DTA曲線における特徴 (900~1450°C)	試料名	灰の特性	溶融状態	塩基度
G1	溶融のための吸熱反応なし	BF1 BF2 BF3 BF4	Ca:30.0 - 37.6% Cl:16.5 - 19.3% Si:3.2 - 6.4%	未溶融	3.04 ~ 7.24
G2	1400°C付近から吸熱反応	EP1 EP5 FEP1 FEP2 FBF1 FBF2	EP1以外は Ca:28.0 - 35.2% Cl:8.9 - 13.8 % Si:5.7 - 7.2%	半溶融	2.44 ~ 4.02
G3	1000, 1200°C付近の2カ所で吸熱反応	BA3 OS1 OS2 OS3 OS4 OS5 OS6	BA3以外は Si:11.5 - 21.0% P:7.4 - 14.8 % Al:8.8 - 10.0% Ca:7.1 - 9.4% Fe:2.6 - 8.0%	溶融	0.29 ~ 0.50 BA3:1.44
G4	吸熱反応の傾きが急である	EP3 EP15 EP7 EP16 EP8 EP17 EP11 EP18 EP12 BA1 EP13 IS2 EP14 IS4	BA1, IS2, IS4 以外は Cl:10.1 - 17.3% Ca:11.7 - 15.7% Na:6.1 - 11.2% Si:7.5 - 10.5% K:3.9 - 7.6% Al:4.5 - 7.1%	溶融	0.89 ~ 1.82
G5	吸熱反応の傾きが緩やかである	EP2 BA2 EP4 IS1 EP6 IS3 EP9 IS5 EP10 IS6	Ca:19.3 - 36.3% Si:3.2 - 21.6% Cl:0.0 - 20.8% Fe:0.4 - 14.4% Al:2.1 - 11.5% P:0.2 - 8.5% Na:0.1 - 7.9% K:0.4 - 6.0%	溶融	0.96 ~ 3.54 IS1:0.13 BA2:7.48

機を用いてデータ間の統計的距離を算出した場合、より厳密な分類ができると考えられた。視覚による分類結果をデータ間統計的距離によって修正した各グループの DTA 曲線の特徴を表-2 に示した。

表-2 をみると、G₁ に分類された試料は全て都市ごみストーカー炉 BF 灰であった。先にも述べたが、DTA 曲線においては、溶融と考えられる吸熱反応は観察されず、TG-DTA の測定後の試料を観察したところ、どの試料も溶融していなかった。灰は Ca と Cl の含有量が大きく、塩基度は 3.04~7.24 と他のグループに比べて高かった。

G₂ に分類された試料は、都市ごみストーカー炉 EP 灰の一部 (EP1, EP5) と都市ごみ流動床灰であった。これらの試料の組成は、G₁ 同様 Ca と Cl が主構成元素であった。塩基度は全て高く 2.44~4.02 であった。TG-DTA 測定後の試料の様子を観察すると、半分程度融解している状態であった。

G₃ は BA3 をのぞいて有機系下水汚泥灰分であり、Si, P, Al, Ca, Fe 含有量が高かった。試料 BA3 は塩基度が 1.44 であったが、有機系下水汚泥焼却灰の塩基度は 0.29~0.50 と小さく、全体的に DTA 曲線間のばらつきは小さかった。

G₄ は都市ごみストーカー炉 EP 灰の試料が多く、Cl が最も含有量の大きい元素であり、Na, K などのアルカリ金属の含有量も高かった。塩基度は 1 前後のものが多くかった。DTA 曲線における特徴は、他のグループの DTA 曲線に比較して、明確な吸熱ピークを形成するものが多く、そのピークも 1250~1300°C 付近に位置するものが多かった。

G₅ は都市ごみストーカー炉 EP 灰、無機系下水汚泥灰分など多種の試料により構成されており、塩基度にもばらつきがみられ、全体的な傾向としては、G₄ よりも高く、2 以上のものが多かった。EP 灰では G₄ に分類されたものより、アルカリ金属の含有量が小さかつ

た。

(2) DTA 曲線からの特徴抽出

この項では、DTA 曲線を時系列データとみなし、各データの特徴をできるだけ損失しないように特徴抽出を行った。この特徴抽出により圧縮されたデータは、以下の項でパターン認識として用いた。

この特徴抽出手法は、プラントオペレーションにおけるプロセス変数の時系列データから、プラントの状態を判断したり、異常を診断したりする目的で作成されたものである⁶⁾。プラントから得られた時系列データからスパイク状変化やステップ状変化などの局所的特徴と、全体的な傾向であるトレンドを同時に抽出することができ、さらにデータの容量削減法としても有効である。本研究では、この手法の全体的傾向(トレンド)を失わずにデータ量を削減できる点に注目し、先に行った DTA 曲線の標準化により得られた時系列データに対して特徴抽出を行った。

本来 DTA の値は、環境温度に対する試料と基準物質の温度差として表されるが、環境温度は一定の速度で加熱しているので、DTA 曲線は時系列データとして用いることができる。以下に、特徴抽出のアルゴリズムに関して、簡単な説明を行う⁶⁾。まず時系列データから極値と変曲点を 3 次スプライン補間法によって求め、エピソード(時区間)ごとに計算した連続関数の属性値を基に、局所的特徴や全体的傾向を抽出するためのエピソードの合併を繰り返し最終的に連続関数を近似した折れ線関数を得た。この特徴抽出は SUN ワークステーション上で作業した。この特徴抽出により、DTA 曲線の 577 個のデータを 14~32 個の変曲点(特徴点)で近似することができた。

後の解析を行うために、各 DTA 曲線の時系列データにおいてできるだけデータの特徴を失わないように、全てのデータに共通した温度での DTA の値が要求される。しかしながら、上記の特徴抽出で行った DTA 曲線は、各試料において特徴点が 14~32 と異なり、また異なる温度での DTA 値が求められているため、特徴点の個数と温度を統一する必要がある。そこで、特徴抽出した結果ができるだけ損なわれず、さらにできるだけ特徴点の個数を減らすことを目的に、以下の手順で統一した特徴点の個数と温度を決定した。

データを取りだした 900~1450°C の温度範囲を一定間隔に分割し、各データの特徴点が含まれる温度域に対してポイントを与えることにより、各データからの特徴点が多く含まれている温度域が、多くの試料に対して特徴抽出した結果を損なうことになる。また、各試料では特徴点の個数が異なることか

ら、特徴点の個数の少ない試料から得られた特徴点の影響力を大きく、特徴点の個数の多い試料から得られた特徴点の影響力を小さくするために、各試料の特徴点のポイントの大きさは、抽出された特徴点の個数で割った値とすることで重みを与え、特徴点の個数の違いによる影響を少なくした。このようにして分割した各温度域でのポイントの合計が多い温度域を上位から決定した。

できるだけオリジナルのデータの特徴が失われないような代表的な特徴点(サンプル点)を決定するために、次の条件を設定し、標準化された DTA 曲線を再プロットし、特徴抽出した結果と比べることで最適な分割数と温度域を決定した。温度範囲は 50, 100 分割の場合で行い、各分割において採用した温度域はポイントが上位から 20, 30, 40 点とした。ただし、900, 1450°C のデータは各データに共通であるので必ず採用した。

分割数、サンプル点の数と採用された温度を表-3 に示した。また、比較的 DTA 曲線が複雑な形状をした試料 ISI における上記の条件での DTA 曲線を図-13 に示した。これらの図には比較のため、先に行つた特徴抽出により得られた結果を共に示した。

表-3 をみると全体の傾向として 1100°C 後半から 1300°C 後半にかけて採用された点が多くなっている。この温度域では吸熱反応が開始し、ピークを形成する温度域であるために、このように採用点の密度が濃い結果となった。図-13 の 100 分割、20 点採用の結果では、900°C の次のサンプル点は 1170°C であるために、特徴抽出したデータとは大きく異なる結果となった。100 分割、30 点採用の結果では、100 分割、20 点採用の結果よりは改善されたが、1020°C 付近と、1150°C 付近で誤差が生じた。100 分割、40 点採用の結果では 1120°C 付近に誤差がみられる以外は、特徴抽出した結果とほぼ同様の DTA 曲線が得られた。

一方、50 分割、20 点採用の結果では、100 分割、20 点採用の結果にみられた 1190°C 付近の誤差が解消されたが、前半部分での誤差が大きかった。50 分割、30 点採用の結果では、100 分割、40 点採用の結果にみられた 1150°C 付近の誤差が解消されたが、1120°C 付近の特徴抽出の結果との誤差が依然として残った。しかしながら、100 分割、40 点採用の結果とほぼ同等の DTA 曲線が得られた。100 分割の結果では 1177~1266°C の間に採用点が集中した結果、その他の温度域のプロットがおろそかになる傾向があったが、50 分割の場合はこれらの採用点が多少前後に分散されたため、同じ分割数でも 50 分割の結果の方がよかつた。このような傾向は、他の試料においてもみられた。

表-3 特徴抽出における分割数、サンプル採用点数と採用温度

分割数	100			50	
	20	30	40	20	30
1	900	900	900	900	900
2	1117	974	974	1114	971
3	1177	1067	1067	1180	1070
4	1194	1117	1095	1191	1114
5	1205	1177	1117	1202	1136
6	1210	1183	1139	1213	1158
7	1216	1194	1161	1224	1180
8	1227	1205	1177	1235	1191
9	1232	1210	1183	1247	1202
10	1238	1216	1194	1269	1213
11	1244	1222	1205	1279	1224
12	1249	1227	1210	1291	1235
13	1266	1232	1216	1301	1247
14	1282	1238	1222	1323	1257
15	1288	1244	1227	1345	1269
16	1326	1249	1232	1356	1279
17	1348	1266	1238	1367	1291
18	1370	1270	1244	1378	1301
19	1376	1282	1249	1400	1313
20	1450	1288	1266	1450	1323
21		1293	1270		1334
22		1304	1276		1345
23		1326	1282		1356
24		1348	1288		1367
25		1354	1293		1378
26		1370	1298		1390
27		1376	1304		1400
28		1419	1310		1412
29		1431	1326		1434
30		1450	1332		1450
31			1348		
32			1354		
33			1370		
34			1376		
35			1387		
36			1397		
37			1409		
38			1419		
39			1431		
40			1450		

これらの検討により、最も DTA 曲線の情報が損なわれずに特徴を抽出できる温度は、50 分割、30 点採用の結果で採用された温度であることが確認され、以下の項では、この 30 点の温度における DTA の値を用いることに決定した。

(3) パターン認識を用いた判別法

先に分類した各グループに属する試料の DTA データから、各グループの代表的なパターンを算出した。この項では未知試料の DTA データが得られたとき

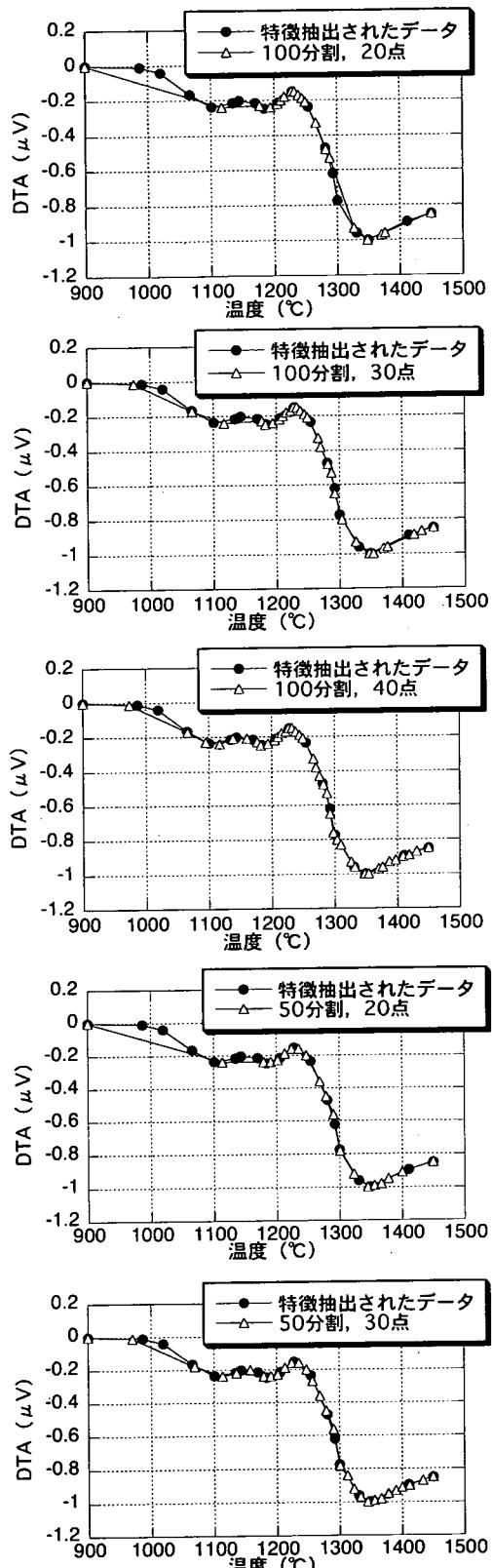


図-13 各分割数、サンプル点数による ISI の DTA 曲線

に、その未知試料がどのグループに属するかを判別するための方法を検討した。

a) パターン認識の概要

この手法は、本来プラントオペレーションにおけるプロセス制御の時系列データから、プロセスの状態や、異常を診断する方法として用いられているものである⁶⁾。この方法は本質的に経験則から異常を診断するものであり、過去において正常と判定された操業データと、異常と判定された操業データの十分な蓄積により、各時系列データのパターンを解析することにより、新しい操業データに対し、どちらのパターンに属するかを判別する方法である。そこで本研究では、プラントオペレーションにおける正常、異常の診断対象を、先に分類した G_1 から G_s のグループに置き換えて、未知試料の判別を行った。

b) 代表パターンの決定

最適な特徴抽出の温度における DTA の時系列データは、以下のような 29 次元のベクトルで表される。起点 (900°C の DTA の値) はどのデータにおいても 0 なので除外した。

$$R_{i,j} = (y_{i,1}, y_{i,2}, \dots, y_{i,29}) \quad (3)$$

式中の i は、グループ G_1 ~ G_s を表す。このベクトル $R_{i,j}$ の向きは、DTA 曲線がどのグループに属するかを表しており、この $R_{i,j}$ を次のように長さ 1 のベクトル $P_{i,j}$ を用いて表す。この $P_{i,j}$ をパターンと定義する。

$$P_{i,j} = \frac{R_{i,j}}{\|R_{i,j}\|} \quad (4)$$

ここで、 G_i に属する $P_{i,j}$ の存在範囲を S_i とすると、 $P_{i,j}$ は 29 次元ベクトルで表されるため、 S_i は G_i 内にある $P_{i,j}$ を全て内包した 29 次元錐体として表される。錐体 S_i は次の条件を満たすべき \hat{P}_i で表すことができ、これを G_i の代表パターンとよぶ。

$$\begin{aligned} & \text{Minimize} |\hat{P}_i| \\ & \hat{P}_i \cdot P_{i,j} \geq 1 \end{aligned} \quad (5)$$

パターンを模式的に二次元ベクトルで表すと、図-14 のように示され、錐体 S_i の側面と単位円との交点における円の接線と、錐体 S_i の軸との交点を求めるとき、円の中心からこの交点に向かうベクトルが \hat{P}_i である。代表パターン \hat{P}_i が求まれば、未知試料の観測パターン P が錐体 S_i に含まれるための必要十分条件は、

$$P \cdot \hat{P}_i \geq 1 \quad (6)$$

で与えられる。図-15 に示したように、領域 S_i に含まれる観測パターン P と代表パターン \hat{P}_i との内積は、 \hat{P}_i

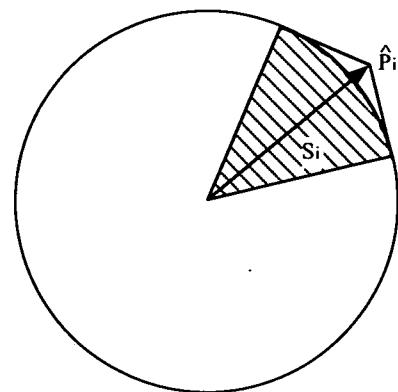


図-14 代表パターン \hat{P}_i ⁶⁾

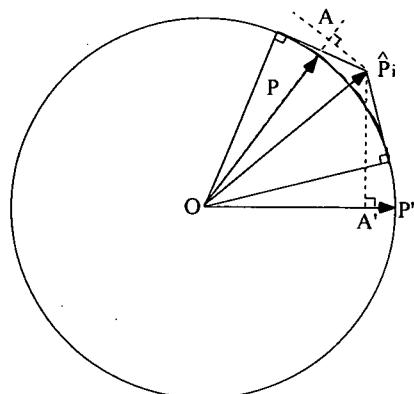


図-15 内積の値による判定⁶⁾

から P におろした垂線の足を A 、単位円の中心を O とすると、線分 OA の長さに等しい。点 A は単位円の外に存在するので、 OA の長さは 1 より大きい。一方、領域 S_i に含まれない観測パターン P' と代表パターン \hat{P}_i との内積は、から P' へおろした垂線の足を A' とすると、線分 OA' の長さに等しい。点 A' は単位円の中に存在するので OA' の長さは 1 より小さい。

このようにして、未知試料の DTA 測定により得られた時系列データからこれまで行ったデータの処理をし、観測パターン P を求め未知試料がどのグループに属するか判別することができる。錐体 S_i の領域が重複する場合は、代表パターン \hat{P}_i の向きが、近い方に判別することとした。代表パターンを決定する際の最適化は SUN ワークステーション上で計算ソフト Matlab (The MATH WORKS Inc.) を用いて行った。

c) パターン認識の検証

パターン認識の結果得られた代表パターンを、表-4 に示した。また、代表パターンの大きさは、錐体 S_i

表-4 各グループの代表パターンのベクトル

ベクトル	G1	G2	G3	G4	G5
y _{i,1}	-0.177	-0.097	-0.019	0.045	0.026
y _{i,2}	-0.716	-0.155	-0.043	0.114	0.045
y _{i,3}	-0.851	-0.141	-0.059	0.143	0.051
y _{i,4}	-0.844	-0.112	-0.073	0.156	0.065
y _{i,5}	-0.770	-0.072	-0.093	0.165	0.078
y _{i,6}	-0.617	-0.027	-0.113	0.160	0.085
y _{i,7}	-0.525	0.008	-0.121	0.147	0.091
y _{i,8}	-0.423	0.064	-0.137	0.123	0.097
y _{i,9}	-0.245	0.165	-0.175	0.081	0.108
y _{i,10}	-0.101	0.243	-0.202	0.008	0.111
y _{i,11}	-0.027	0.267	-0.218	-0.187	0.104
y _{i,12}	-0.019	0.264	-0.226	-0.259	0.086
y _{i,13}	-0.011	0.254	-0.231	-0.275	0.056
y _{i,14}	-0.011	0.238	-0.231	-0.271	0.014
y _{i,15}	-0.011	0.226	-0.228	-0.273	-0.025
y _{i,16}	-0.010	0.208	-0.225	-0.266	-0.083
y _{i,17}	-0.010	0.192	-0.221	-0.270	-0.173
y _{i,18}	0.009	0.175	-0.218	-0.262	-0.212
y _{i,19}	0.021	0.155	-0.217	-0.264	-0.248
y _{i,20}	0.050	0.138	-0.216	-0.269	-0.289
y _{i,21}	0.068	0.115	-0.215	-0.269	-0.315
y _{i,22}	0.093	0.086	-0.213	-0.258	-0.328
y _{i,23}	0.135	0.053	-0.211	-0.251	-0.348
y _{i,24}	0.170	0.001	-0.211	-0.244	-0.339
y _{i,25}	0.212	-0.077	-0.209	-0.240	-0.354
y _{i,26}	0.242	-0.174	-0.204	-0.239	-0.361
y _{i,27}	0.269	-0.291	-0.201	-0.235	-0.340
y _{i,28}	0.257	-0.441	-0.196	-0.227	-0.325
y _{i,29}	0.229	-0.594	-0.194	-0.224	-0.306
大きさ	1.959	1.149	1.009	1.169	1.152

の占める領域を示すため、表中には各代表パターンのベクトルの大きさも付記した。表-4をみると、G₁の代表パターンP_iの長さが他の代表パターンに比較して大きかった。これは、試料BF3のDTA曲線が他のものと比較して大きくずれているためであると考えられた。このように、代表パターンP_iの大きさは、そのグループに含まれるデータのばらつきの大きさとも考えられ、外れ値の検証を行う手段としても用いることが可能であると考えられた。この代表パターンを温度に対して作図したものが図-16である。この代表パターンが表す曲線は、表-2で分類したDTA曲線の形状の傾向がG₃を除いてよく現れている。G₃の代表パターンは、DTAの変動がもとのデータよりも小さくなっているが、これは、G₃に属する各試料のDTA曲線はばらつきが少ないため、代表パターンが錐体を表す領域が小さくなり、その結果代表パターンのベクトルの大きさが小さくなつたことを表している。逆にばらつきの大きかったG₁では代表パター

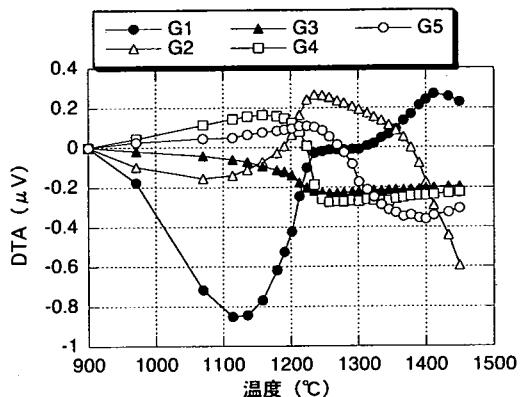


図-16 代表パターンのDTA曲線

ンの変動が大きくなつた。

また、各グループを構成するパターンが、それぞれの代表パターンとの内積が最も大きくなるか、すなわち、各試料の分類が適当であるかを確認するためには、各試料のパターンについて全てのグループの代表パターンとの内積を計算し検証を行つた。全ての試料のパターンは、各々が属するグループの代表パターンとの内積が最も大きかつた。これはもともと試料をそのDTA曲線の形状により分類した際に試料のデータ間の統計的距離をとつて、最も統計的距離が短くなるようなグループへと分類しているため、当然のことといえるが、このようにして分類に誤りがないかを確認することができた。このパターン認識では、各グループにおいて、そのグループの代表パターンとの内積値の大きさをみることで、どの試料が、錐体の中心付近に位置し、どの試料が錐体の端の部分を形成しているか確認することができた。例えば、BF3のパターンとG₁の代表パターンとの内積が約1であることから、BF3はG₁が存在する領域の端の部分を形成しており、一方、内積が大きいBF1はグループの中心近くにある試料であることがわかつた。このようにパターン認識による判別法は分類すること以外にも情報量の多い手法であるといえる。

(4) 未知試料を用いたモデルの評価

未知試料を用いて、DTA曲線の分類、パターン認識による判別を行い、上記の判別モデルを評価した。未知試料としては、以下の3つのタイプの試料を用いた^{8), 9)}。

- ・試料IS6と琵琶湖の浚渫底泥（以下底泥とする）を混合した試料
- ・IS6と通常の溶融操作で融点降下剤として使用されているけい砂を混合した試料
- ・脱水過程で高分子系凝集剤が添加された下水汚泥焼却灰

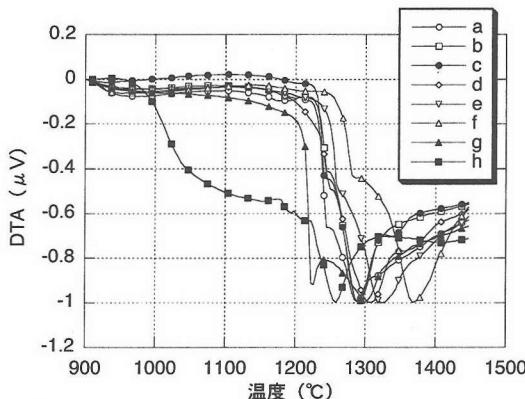


図-17 未知試料のDTA曲線

試料の混合は試料IS6と底泥の重量比で0.8:1, 1:1, 2:1, 3:1, 4:1, 5:1とし、これらの試料をそれぞれ試料a~fとした。また、IS6とけい砂の混合比は、実際に溶融プラントで使用されているけい砂添加率より3:2で混合した。この試料を試料gとした。脱水過程で高分子凝集剤が添加された下水汚泥焼却灰を試料hとした。

図-17に未知試料のTG-DTA測定結果を示した。この図から、試料a, b, cでは1230°C付近から吸熱反応が開始し、1290°C付近で吸熱ピークを形成した。試料dは吸熱反応の開始温度があいまいであるが、吸熱ピークは1310°C付近と試料a, b, cより20°C程度高温側に形成した。また、試料e, fは塩基度が上昇するにつれ、吸熱反応が開始する温度は高温側へと移行し、吸熱ピークも約1320, 1370°C付近となった。

ケイ砂を混合した試料gでは1200°C付近で吸熱反応が開始し、1220°C付近と1300°C付近に吸熱ピークを形成した。これらのDTA曲線の形状から、試料a~fの吸熱ピークは試料gの1300°C付近の吸熱ピークに対応していると考えられ、また、試料gの1220°C付近の吸熱ピークは試料a~fが吸熱反応を開始し、ピークを形成する前に一度傾きが水平近くなる肩の部分に対応すると考えられた。

試料hは、950°C付近からDTA曲線が下降し始め、1150°C付近で一旦傾きは緩やかになり、小さな吸熱ピークを形成した。

各試料を30点で表し、各グループの代表パターン P_i ($i=1\sim 5$)との内積を計算しグループへの判別を行った。結果を表-5に示す。各試料の観測パターンとこれらが判別されたグループの代表パターンとの内積の値は、試料hが0.994であるのを除いて全て1以上であり、いずれかの代表パターンが占める領域に存在した。試料hは G_3 に、試料a~e, gは G_4 に、試料fは G_5 に判別された。試料hは有機系下水汚泥焼却

表-5 未知試料の各代表パターンとの内積

判別対象	G1	G2	G3	G4	G5
試料a	-0.241	-0.224	0.941	1.060	0.871
試料b	-0.257	-0.210	0.922	1.045	0.874
試料c	-0.354	-0.223	0.903	1.071	0.885
試料d	-0.260	-0.221	0.935	1.047	0.903
試料e	-0.324	-0.101	0.892	1.018	1.001
試料f	-0.429	0.104	0.821	0.939	1.072
試料g	-0.125	-0.330	0.986	1.011	0.736
試料h	0.352	-0.213	0.994	0.844	0.651

灰で、1000, 1200°C付近に2段階の吸熱反応を示し G_3 に分類されるのは妥当であり、試料a~e, gは傾きが比較的急であるために G_4 に分類されたと考えられた。試料fは1段階目の吸熱反応の傾きは急であるが、その後、一旦緩やかな傾きのDTA曲線を示したため全体の傾向としては緩やかな傾きとなり、 G_5 に判別されたと考えられた。

これらの結果から、このモデルによりDTA曲線から焼却灰の溶融パターンの分類が簡便にできることがわかった。

5. まとめ

本研究で得られた知見を以下にまとめた。

(1) DTA曲線の形状による灰分の分類

都市ごみ焼却灰、飛灰および下水汚泥焼却灰を900~1450°CのDTA曲線の形状から視覚によって分類し、さらにデータ間の統計的距離を計算することにより再評価したところ、5つのグループに分類できた。また各グループには灰分の由来や組成、JIS法の溶融特性などに特徴がみられた。

(2) DTAからの特徴抽出

DTA曲線からの特徴抽出により、900~1450°Cの間の約1°Cごとの577個のデータを各試料において14~32個のデータに圧縮することができた。さらに、もとのデータの特徴を失わないような各試料に共通のサンプル点を30点選択することができた。このことにより、あらゆる灰分の900~1450°CのDTA曲線はこの30点の温度におけるDTA値で表すことができると考えられた。

(3) パターン認識による判別法

分類した各グループにおいて上記30点のDTA値から代表パターンを決定した。これを用いて未知試

料のグループへの判別を行ったところ、未知試料が判別されたグループはその試料のDTA曲線における形状を考慮すると適当な判別が行われたことが確認された。

以上の操作により、客観性の強い示差熱分析データから焼却灰・飛灰の溶融パターンを分類する方法を提案することができた。今後はこの分類をいかして、JIS法による溶融指標との関係を求めていく必要がある。

謝辞：本研究では、多くの自治体に焼却灰・飛灰のサンプル提供を受けた。ここに記して深く感謝する。

参考文献

- 1) 神戸博太郎, 小澤丈夫: 热分析, 講談社, pp.11-14, 1992.
- 2) 高岡昌輝, 中塚大輔, 武田信生, 藤原健史: ごみ焼却飛灰中元素の定量に関する蛍光X線分析法の適用性, 廃棄物学会論文誌, Vol.11, No.6, pp.333-342, 2000.
- 3) 村上忠弘, 石田貴, 鈴木和美, 角田幸二, 笹部薰: 汚泥溶融に係わる指標の検討, 下水道協会誌, Vol.26, No.300, pp.32-46, 1989.
- 4) 古角雅行: 東京都の飛灰対策の現状, 廃棄物学会誌, Vol.5, No.1, pp.46-59, 1994.
- 5) 芦沢雅美, 大丸淳, 市川和芳, 高橋毅, 浜松照秀: 超高温融点測定手法の開発と石炭灰溶融特性, 火力原子力発電, 1995-6, pp.608-613, 1995.
- 6) 藤原健史, 西谷紘一: プロセス監視のための時系列データからの特徴抽出, 化学工学論文集, 第22巻, 第5号, pp.1103-1110, 1996.
- 7) 松山久義, 橋本伊織, 西谷紘一, 仲勇治: プロセスシステム工学, オーム社, pp.180-105, 1992.
- 8) 川上寛明: 下水汚泥焼却灰の溶融時におけるリンおよび重金属類の挙動, 京都大学大学院工学研究科修士論文, 1997.
- 9) 高岡昌輝, 武田信生, 岡島重伸, 平岡正勝, 藤原健史: 琵琶湖浚渫底泥と下水汚泥焼却灰との混合溶融に関する研究, 下水道協会誌, Vol.37, No.453, pp.98-115, 2000.

(2002.5.13 受付)

CLASSIFICATION OF FUSION PATTERNS OF BOTTOM ASH AND FLY ASH USING DIFFERENTIAL THERMAL ANALYSIS

Masaki TAKAOKA, Takeshi FUJIWARA, Jun FUJITA and Nobuo TAKEDA

In this study, DTA (Differential Thermal Analysis) method was applied to classify the fusion patterns of bottom ash and fly ash from municipal solid waste incinerators and sewage sludge incinerators. 41 samples were classified into 5 patterns according to the shapes of DTA curves. 577 data on a DTA curve from 900 to 1450 °C were compressed to av.19 data by a feature extraction method. The common temperatures were selected to determine the typical patterns of DTA curves in each class by the optimization using pattern recognition. Based on above procedures, we developed a model to distinguish DTA curves of unknown samples and found that the fusion characteristics were classified by measuring the DTA curve.