

都市ごみ焼却施設での近年のごみ質の変化に関する統計的解析

酒井 護, 増田淳二

Statistical analysis for recently annual variation in composition and chemical properties of wastes brought in municipal solid waste incineration plants

Mamoru SAKAI and Junji MASUDA

Abstract

The incineration amounts of municipal solid waste have been increasing until the latter of the 1990s in Japan. Since the early 2000s, these have been reduced due to various administrative policies.

The waste properties survey are held the four times per year at municipal solid waste incineration plants. Osaka City Research Center of Environmental Science has been cumulating these data of composition and chemical properties of waste brought in the plants of Osaka Waste Management Authority from 1970s.

In this study, statistical analysis with these recently 15-year data from FY2005 to FY2019 were carried out about two kinds of issues. The one is about the annual variation of incineration amount of each composition, and the other is about the annual variation of carbon content, hydrogen content and lower calorific values. The amount of incineration municipal solid waste in Osaka City, in the last 15 years has reduced by about 720,000 tons. It was suggested that reduce of some compositions was strongly correlated with that of total amount due to the influence of administrative policy. In evaluation of annual variation in carbon content, hydrogen content and lower calorific values, several data were estimated as larger or smaller ones compared to other years, sporadically.

Key words: annual variation, composition of waste, municipal solid waste

I. 諸言

日本国内の都市ごみの年間収集量は、データの確認できる1965年には約1,625万トン[1]であった。その後は増加し、2000年度には最大の約5,483万トンとなった後は減少に転じ、2019年度は約4,274万トンであった[2]。1960年代には、当時の社会の衛生状態から、都市ごみは焼却による処理が求められていた。しかし、1970年代初めころより、生活様式の変化等によりごみの内容が多様化し、粗大ごみやプラスチックなど焼却による処理が不向きとなるものが増えはじめた[3]。また、ごみ量の増大により、1980年代以降、焼却残渣(灰)を埋め立てる最終処分場の確保が困難となってきた[4]。こうした背景から1990年代以降、都市ごみの処理は焼却のみでなく、排出抑制、資源化などの行政施策が実施されるようになった[5]。

大阪市では、都市ごみの焼却による年間の処理量は、1965年度には約32万トンであった。その後焼却による処理量は増加し、1994年度には最大の約186万トンとなった後は減少に転じ、2019年度は約93万トンであった[6]。資源ごみの分別収集の全市実施に関しては、1994年10月より缶・びんの収集が開始された後は、

1997年10月よりペットボトル、2007年4月より金属製の生活用品が追加された。容器包装プラスチックは、2005年4月より分別して収集されているなど、焼却による処理量の減量化につながる施策が実施されている[7]。

都市ごみ焼却施設では、施設の維持管理にあたり、『一般廃棄物処理事業に対する指導に伴う留意事項について』(昭和52年11月4日環整第95号厚生省環境衛生局水道環境部環境整備課長通達)[8] (「環整第95号」)に従い、定期的にごみ質を分析している。大阪市立環境科学研究所(当時。現在は大阪市立環境科学研究センターに名称を変更。これらを総称して「環科研」と表記)では、この通知が発出される以前の1970年代前半より、大阪市清掃局(当時。大阪市環境事業局、大阪市環境局、大阪市・八尾市・松原市環境施設組合から現在は大阪広域環境施設組合に組織を変更。これらを総称して「環境施設組合」と表記)の焼却施設への搬入物に係るごみ質調査を行ってきた。本報文では、この調査により蓄積されたデータのうち、2005年度から2019年度までのものを使用し、①ごみの組成別重量及び、②炭素分・水素分及び低位発熱量、の経年的な変化について統計的な解析を行った結果を報告する。

II. 方法

1) 測定の項目と方法

本報文では、2005 年 4 月から 2020 年 3 月までの 15 年間に環境施設組合の各焼却施設への搬入物に対して実施されたごみ質調査結果を用いる。環境施設組合の焼却施設数は、2005 年 3 月末では 10 施設であったが、その後 5 施設が閉鎖され(2008 年 12 月、2010 年 3 月、2013 年 3 月、2014 年 3 月及び 2016 年 3 月)、1 施設が開設され(2010 年 4 月)、現状では 6 施設となっている。

都市ごみ焼却施設への搬入物のごみ質は、環整第 95 号通達 別紙 2 の I に掲げる方法により測定される。この測定方法の工程及び年度別の測定の実施者は図 1 に示した通りである。測定は、四半期に 1 回の頻度で実施される。以下では、「ごみ質」とは、表 1 に示した可燃物 6 組成及び不燃物の重量比率、ごみの三成分(水分・灰分・可燃分の重量比率)、低位発熱量及び炭素分・水素分をいう。本報文では、各組成の重量比率について、表 1 の可燃物 6 組成の合計のみを分母とした絶対乾燥可燃物基準(「乾乾可燃基準」)及び表 1 の可燃物 6 組成に不燃物及び水分を加えた 8 組成の合計を分母とした搬入物基準(「搬入物基準」)の 2 種類の基準を使用している。

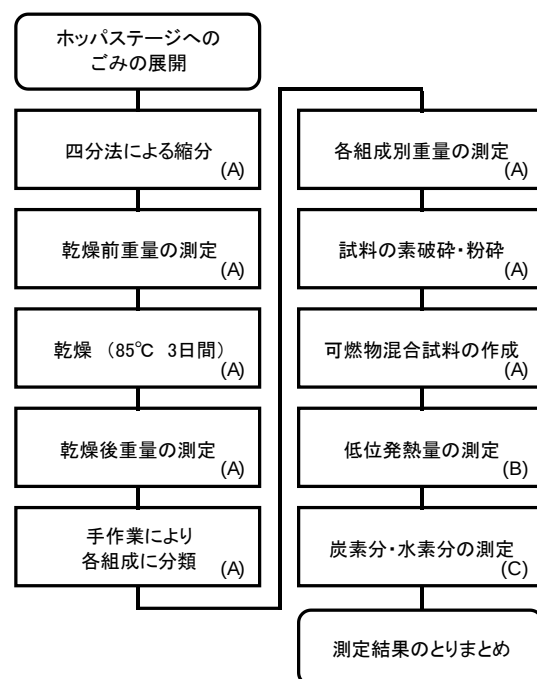
2) 組成別焼却量の計算方法

各焼却施設で焼却されたごみの重量の月間合計は、環境施設組合の WEB サイト[9]または年度別の統計年報[10]にまとめられている。ごみ質調査は、四半期ごとに実施されていることから、当該四半期の焼却量の合計と各組成の重量比率の積を当該四半期間での組成別の焼却重量とする。

3) 統計的解析の方法

本報文では、測定結果を統計的に解析している。そのための手法として、成書[11-13]の記述などを参考に、表計算ソフトウェアで関数を作成して行った。分散分析により、有意差があるとされた場合、ボンフェローニ法により補正した p 値による多重比較を行った。

箱ひげ図によるプロットにおいて、データ全体での四



期間(年度)	工程A	工程B	工程C
2005-2010	環境施設組合	環境施設組合*	環境施設組合*
2011-2013	委託業者	委託業者	環科研
2014-2019	委託業者	委託業者	委託業者

「環境施設組合」とは、各焼却施設の職員

(* 2005-2010 年度の期間において、工程 B 及び工程 C の測定結果に疑問がある場合は、環科研で追試験を行っていた)

「委託業者」とは、環境施設組合が分析を委託した業者

図 1 作業のフローと年度別の各工程の実施者

分位偏差の 1.5 倍以上外側に位置する測定結果は、はずれ値として別に○印によりプロットした。この際、最小値と最大値は、はずれ値を除いてプロットしたが、その他の四分位値は、はずれ値を除かずに計算された数値でプロットした。△は、はずれ値も含めた算術平均値である。

一部の統計処理において、平均値がゼロ、標準偏差が 1 となるように正規化したデータを使用している。絶対値が大きく異なるような複数のデータの分布の比較が容易になることを目的としている。また、正規化したデータで表した場合、平均からのズレの程度を容易に推測することができる。

III. 結果と考察

1) ごみ分析結果の総括

(1) 測定結果の平均値と年度別の測定件数

図 1 の方法により測定された各組成の重量比率及び三成分の値を、各工場別・四半期別の焼却量の合計と年間焼却量との比率で加重平均したものを表 2 に示した。ただし、2011 年度のみ、紙と繊維を合計して重量比率を測定していたため、当該欄はまとめて表示している。

表 1 分類した組成とそれぞれに含まれるものの例

本文中の表記	具体例
厨芥	動植物性残渣、卵殻、貝殻など
紙	紙類など
繊維	合成繊維、布類など
木草	木・竹・ワラなど
プラ	ビニール・合成樹脂・ゴム・皮革類など
雑物	孔眼寸法約 5mm の篩を通過したもの
不燃物	石陶器・ガラス・鉄・非鉄金属など

表2 年度別の組成重量加重平均(搬入量基準)、三成分、炭素分・水素分、低位発熱量、焼却量、測定件数の一覧

年度	組成別重量比率（搬入量基準）							三成分			炭素分	水分分	低位 発熱量	年間 焼却量	測定 件数	
	厨芥	紙	繊維	木草	プラ	雑物	不燃物	水分	灰分	可燃分						
																%
MJ/kg																
2005	3.0	31.5	5.1	5.6	9.9	2.3	9.7	32.9	16.0	51.1	47.1	6.21	9.32	1,710,288	40	
2006	3.0	28.6	5.9	6.4	10.9	3.3	9.6	32.3	16.4	51.3	47.2	6.28	9.81	1,698,717	40	
2007	3.2	28.8	5.7	7.0	10.2	3.6	11.0	30.5	17.7	51.8	47.8	6.45	9.70	1,617,490	40	
2008	3.4	26.9	5.1	6.4	12.8	3.6	9.3	32.4	16.2	51.5	49.2	6.65	10.32	1,474,091	38	
2009	3.2	28.7	6.3	5.6	10.5	3.1	9.0	33.7	15.9	50.4	48.1	6.34	9.80	1,300,013	35	
2010	3.7	26.2	7.0	5.7	11.4	3.8	8.7	33.3	15.8	50.9	48.0	6.40	10.52	1,268,471	36	
2011	4.4		32.7	3.4	13.0	2.6	4.0	39.9	8.5	51.6	54.6	7.53	9.94	1,263,795	36	
2012	4.5	29.1	3.7	3.9	11.6	2.8	5.7	38.7	11.0	50.3	52.8	6.81	9.48	1,238,455	35	
2013	5.6	26.2	4.2	3.9	11.4	2.9	3.4	42.4	8.9	48.7	46.4	5.88	8.99	1,133,084	32	
2014	4.1	28.9	3.6	3.3	14.2	2.2	3.1	40.7	8.9	50.4	46.8	6.25	9.82	1,036,029	28	
2015	5.0	26.4	4.4	4.6	11.1	2.2	3.6	42.5	9.0	48.5	45.6	6.15	9.20	1,021,072	28	
2016	5.1	24.7	5.6	4.1	12.6	2.1	3.6	42.3	8.8	49.0	47.3	6.38	9.78	994,989	24	
2017	4.3	24.9	5.4	6.2	12.7	2.6	3.4	40.4	8.6	51.1	48.6	7.16	10.01	996,148	24	
2018	4.9	28.3	5.1	4.2	14.2	2.4	3.1	37.7	8.1	54.2	48.7	7.35	10.87	1,030,218	24	
2019	4.5	25.4	6.0	6.0	13.5	2.6	2.8	39.1	7.9	52.9	49.1	7.08	10.40	1,029,165	24	
全体	4.0		33.0	5.2	11.8	2.9	6.5	36.6	12.5	51.0	48.6	6.57	9.84	--	484	

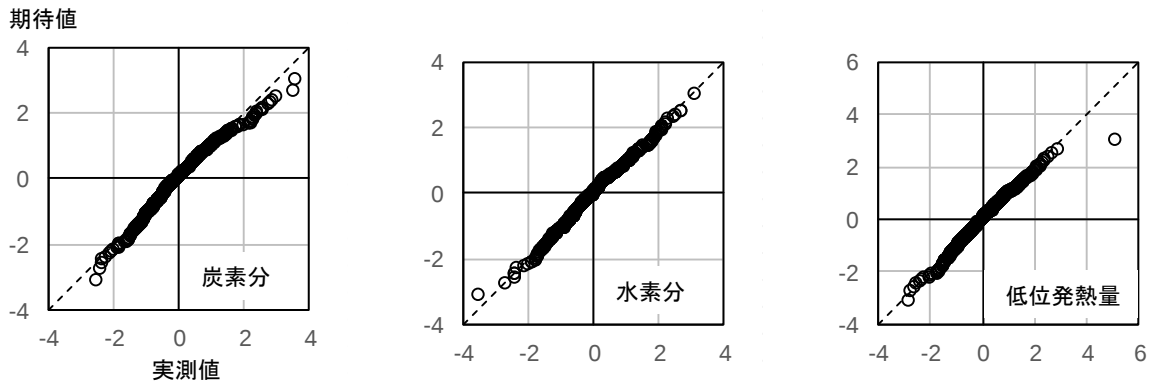


図2 炭素分・水素分・低位発熱量(正規化済み)の正規確率プロット

また、表2に炭素分・水素分、低位発熱量、年度別の測定の件数及び年間の焼却量[10]を合わせて示す。ただし、炭素分・水素分及び低位発熱量は、絶乾可燃基準での単純な算術平均である。

(2) 炭素分・水素分及び低位発熱量測定結果の正規確率プロット

炭素分・水素分及び低位発熱量について、正規分布性を確認するために、484個のデータにより正規化して計算した正規確率プロット(Q-Qプロット)を図2に示す。図2において対角線は、直線 $y=x$ である。いずれの場合でも正規化した実測値の絶対値が2を超える範囲では、 $y=x$ から外れることもあるが、正規化した実測値の絶対値が2以下の場合は $y=x$ 上にある。このことから、これらはいずれも正規分布していると考えられた(いずれの場合も、Q-Qプロットにおいて測定値と期待値の相関係数は0.99以上であった)。

2) 組成別の焼却重量

(1) 焼却重量の経年変化

表2のデータにより計算した各組成の焼却重量、焼却残渣発生量[10]について、経年的な変化を図3に示す(紙と繊維は合計で計算)。図3で計算された結果について、全焼却量との相関係数 r を計算することにより、直線的な関係を数値化できる。この計算結果を表3に示す。まず、 $r > 0.95$ であったものは、紙・繊維、不燃物及び焼却残渣であった。これらは、この期間での全焼却量の減少と同様の傾向で減少していることが考えられた。次いで、 $0.8 < r < 0.9$ であったものは、木草、プラ、雑物及び水分であった。これらも、全焼却量の減量との間に強い相関が見られた。逆に、厨芥と全焼却量の相関係数は、 $0.1 < r < 0.2$ であった。全焼却量は大きく減量しているが、厨芥の焼却重量は増減の傾向が一致しないとされた。

表3 各組成と全焼却量の経年変化の相関係数

組成	紙・繊維	不燃分	木草	雑物	水分	プラ	厨芥
r	0.989	0.955	0.876	0.865	0.860	0.820	0.163

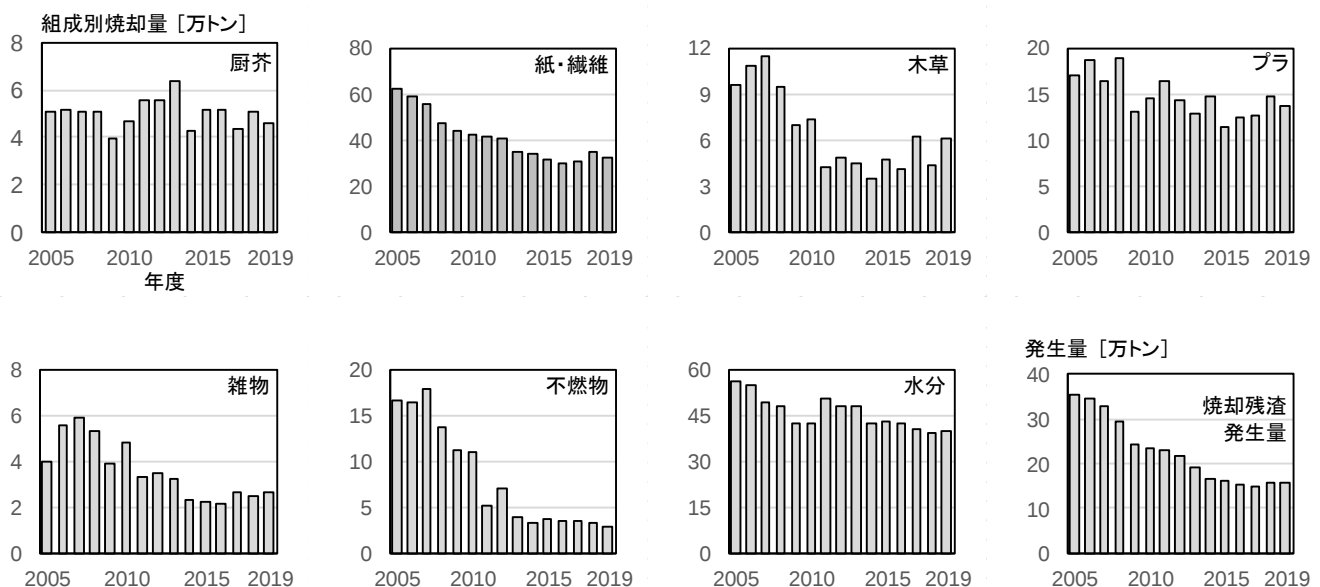


図3 最近15年間の年度別各組成の焼却量及び焼却残渣発生量(焼却残渣発生量は[10]より作成)

(2) 全焼却量の経年変化との相関係数が 0.95 以上であった組成に見られた傾向

紙・繊維の焼却量が減少した要因として、2005 年度には約 16 万トンであったオフィスビルなどでのリサイクル量が 2019 年度には約 29 万トン[6]になったことや、2013 年度から全市域に拡大された古紙衣類の回収量が 2019 年度に約 2 万トンになるなどによるところが大きいと考えられた。また、これらが減量した影響により全焼却量も変化したと思われる。

図 3 より焼却残渣の発生量は、2010 年度までは 20 万トン以上であったが、2014 年度以降は 15 万トン以下となっている。不燃物は、2010 年度までは 10 万トンを超えていたが、2013 年度以降は 4 万トン以下となっている。焼却物中の不燃物重量の減量が、焼却残渣の減量に対応していると考えられた ($r = 0.964$)。

3) 炭素分・水素分及び低位発熱量測定値の統計解析

(1) 分散分析による年度別の傾向についての考察

炭素分・水素分及び低位発熱量の測定値を因子として、測定年度を水準とした分散分析を行った。その結果、いずれの因子についても、 $p < 0.001$ であり、年度別の平均値には、差があるとされた。これらの年度別の測定結果を測定値の平均の小さい順に並べ、有意水準 $\alpha = 0.05$ として複数の水準を除外して分散分析を行った結果、各因子に対し、図 4 の太い線で示した水準の部分のみでは、有意差がなかった。もとの 15 水準中、炭素分では 11 水準、低位発熱量では 13 水準と 73% 以上の水準のみを考慮すれば、経年的な変化がないことから、ほぼ安定していると考えられた(炭素分では、2011 年度と 2012 年度が高値側、2013 年度と 2015 年度が低値側に分布していた以外は、経年的な変化が見られなかった)。水素分に関しては、53% に相当する 8 水準のみでは経年的な変化が見られないが、2017 年度以降は、それ以前の傾向と比較して高値側に分布している傾向にあった。

(2) 絶乾可燃物中の重量比率との関係

炭素分・水素分及び低位発熱量について、全データを用いてクラスタ分析を行った。データは正規化したのちに距離を計算し、クラスタの結合はワード法によった。結果のデンドログラムを図 5 に示す。なお、図 5 では、スペースの都合により 474 ステップまでの結果は省略し、最終の 9 ステップのみで表示した(図 5 において、例えば、グループ A には 38 個分のデータによるデンドログラムが存在するが、その部分は 1 本の線で表示した)。図 5 より、全体を 3 個のクラスタに分割した場合、クラスタ 1 には、グループ A からグループ D までの 242 個のデータ、クラスタ 2 には、グループ E からグループ G の 109 個のデータ、クラスタ 3 には、グループ H からグループ J

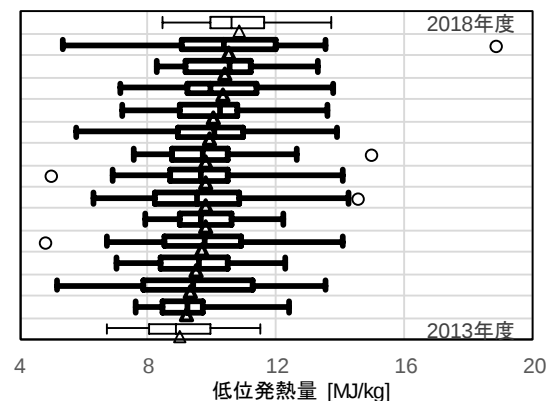
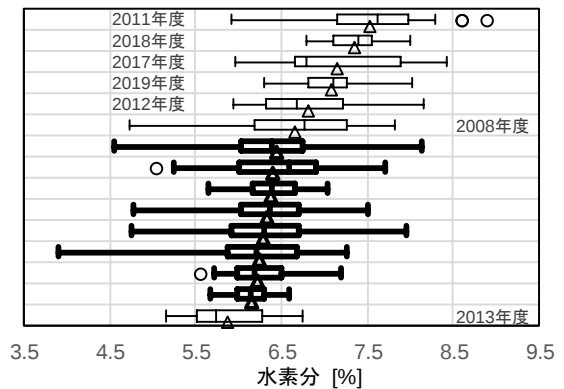
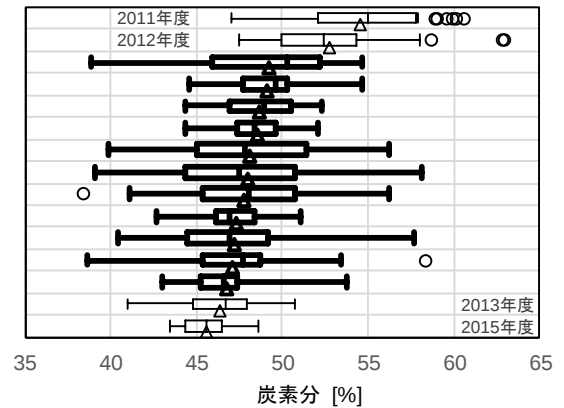


図 4 年度別測定結果の分布

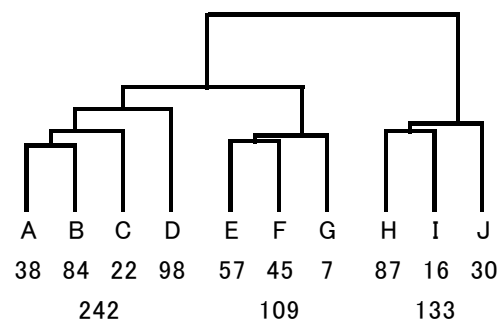


図 5 クラスタ分析結果
(474 ステップまでの結果は省略)

表 4 各クラスタに含まれる年度別の件数

年度	分類したクラスタ		
	1	2	3
2005	26	10	4
2006	25	10	5
2007	19	12	9
2008	12	10	16
2009	20	9	6
2010	16	12	8
2011	4	3	29
2012	17	5	13
2013	28	4	0
2014	18	8	2
2015	26	2	0
2016	16	7	1
2017	9	6	9
2018	1	5	18
2019	5	6	13
合計	242	109	133

までの 133 個のデータが含まれる。各クラスタについて、年度別の件数を表 4 に示す。また、各クラスタに含まれる正規化したデータの分布は、図 6 の箱ひげ図の通りとなった。各クラスタに分類されたデータの平均値について多重比較を行った結果、炭素分及び水素分では、クラスタ 3 には、高値側に分布しているが、クラスタ 1 及びクラスタ 2 には差が見られないとされた。低位発熱量は、クラスタ 2 > クラスタ 3 > クラスタ 1 の順に高値側に分布しているとされた。

絶乾可燃基準での各組成(紙・繊維は合計で表した)の重量比率を 484 個のデータにより正規化し、各クラスタに分類されたものの平均値を表 5 に示す。ただし、2011 年度は、紙と繊維は合計して重量比率測定されていたため 2011 年度を除いた 14 年間のデータによる平均である。表 5 の結果について、多重比較により他のクラスタの平均と比較して大きいと推定されたものは太字、小さいと推定されたものは、斜体(下線)で表した。炭素分及び水素分が高値側に分布していたクラスタ 3 では、プラの重量比率が大きく、紙・繊維合計及び紙の重量比率が小さいとされた。また、低位発熱量が高値側に分布していたクラスタ 2 では、厨芥及び水分の重量比率が小さいとされた。

表 5 各クラスタに含まれる各組成の重量比率の平均(正規化後)

組成	分類したクラスタ		
	1	2	3
厨芥	0.16	<u>-0.48</u>	0.10
紙・繊維	0.10	0.20	<u>-0.34</u>
木草	-0.02	0.27	-0.19
プラ	-0.28	-0.13	0.61
雑物	0.07	-0.08	-0.06
水分	0.27	<u>-0.72</u>	0.10
紙	0.10	0.09	<u>-0.32</u>
繊維	-0.03	0.16	-0.10

多重比較の結果により、他のクラスタの平均よりも小さいとされるものは斜体、大きいとされるものは太字で表した

既報[14]で測定した通り、炭化水素を含むプラスチック類は、炭水化物やたんぱく質など構造に酸素や窒素などの元素を含む他の組成と比較して炭素分及び水素分とも大きくなる。そのため、炭素分・水素分とも、平均値の大きいクラスタ 3 に分類されるデータは、プラ比率が大きいものが分類されたと考えられた。また、図 4 において、水素分が高値側に分布していた 2008 年度より上側の 6 年分のもは、クラスタ 3 に分類されている割合が 37%を超えている。すなわち、焼却物中のプラの重量比率が大きくなることで、水素分が大きくなるのが統計的にも示された。なお、プラ及び紙・繊維の重量比率の相関係数は -0.55 と負の相関があるとされた。何らかの要因により、ごみ中のプラ比率が大きくなり相対的に紙・繊維の重量比率が小さくなることもあり、その影響によりクラスタ 3 に分類されたデータの紙・繊維の重量比率の平均が小さくなったものと考えられた。

低位発熱量は、可燃分の燃焼により発生する熱量から水の蒸発潜熱を引いたものとして測定される。そのため、水分が小さくなれば、相対的に可燃分の比率が増大し、かつ、蒸発潜熱も減少することになる。低位発熱量の平均値が大きいクラスタ 2 は、他のクラスタと比較して、水分及び厨芥の重量比率が小さいとされている。既報[14]で測定した通り、厨芥は水分を多く含んでいる。すなわち、焼却物中の水分や厨芥の重量比率が小さくなることで、低位発熱量が大きくなるのが統計的にも示された。

IV. まとめ

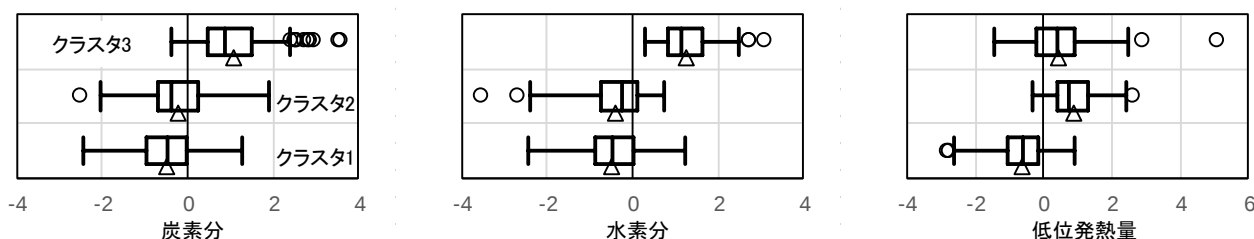


図 6 各クラスタに分類された測定値(正規化済み)の分布

2005年度から2019年度までの15年間に大阪広域環境施設組合の焼却施設への搬入物に対して実施されたごみ質調査結果のデータを統計的に解析し、以下の結果が得られた。

ごみの組成別重量に関して解析した結果、①年間に焼却したごみの重量は、この15年間で最大で約72万トン減少した。経年的な重量の変化と相関が高い組成は、紙・繊維と不燃物の2種類であった。②紙・繊維の減量は、行政的施策によるところが大きいとされた。③不燃物の減量により、焼却残渣の量も大きく減少した。④厨芥の焼却量と全体の焼却量の変化には相関が見られなかった。

炭素分・水素分及び低位発熱量に関して解析した結果、⑤これらのデータについて経年的な変動の有無を統計的に解析した。その結果、炭素分では低値側高値側のそれぞれに2年、水素分では低値側に1年及び高値側に6年、低位発熱量では低値側高値側のそれぞれに1年のデータが有意に異なっているとされた。⑥この場合、絶乾可燃物中のプラスチックの重量比率が大きくなれば水素分が大きくなるとされた。⑦また、搬入物中の水分及び絶乾可燃物中の厨芥の重量比率が小さくなれば低位発熱量が大きくなるとされた。

謝辞 本報文でのデータ解析にあたり、大阪広域環境施設組合施設部のご協力をいただきましたことを記し深謝いたします

参考文献

- 1) 厚生白書 昭和41年版
(厚生白書は、[3,4]も含め厚生労働省サイト:
https://www.mhlw.go.jp/toukei_hakusho/hakusho/kousei/ を参照した)
- 2) 環境省 環境再生・資源循環局廃棄物適正処理推進課. 日本の廃棄物処理(令和元年度版)
http://www.env.go.jp/recycle/waste_tech/ippa/r1/index.html

- http://www.env.go.jp/recycle/waste_tech/ippa/r1/data/disposal.pdf
- 3) 厚生白書 昭和44年版, 昭和45年版
- 4) 厚生白書 昭和56年版
- 5) 環境省大臣官房廃棄物・リサイクル対策部企画課循環型社会推進室日本の廃棄物処理の歴史と現状
http://www.env.go.jp/guide/pamph_list/list_ja01.html
http://www.env.go.jp/recycle/circul/venous_industry/ja/history.pdf
- 6) 大阪市環境局. 令和2年度事業概要 参考資料1,
<https://www.city.osaka.lg.jp/kankyo/page/0000422476.html>
- 7) 大阪市環境局. 令和2年度事業概要 参考資料5
- 8) 環境省サイト. 一般廃棄物処理事業に対する指導に伴う留意事項について.
<https://www.env.go.jp/hourei/11/000013.html>
- 9) 大阪広域環境施設組合 WEB サイト. 月間運転状況.
<https://www.osaka-env-paa.jp/shokyaku/jokyo/jokyo.html>
- 10) 大阪市環境局. 各年度別の統計年報.
<https://www.city.osaka.lg.jp/kankyo/page/0000420405.html>
<https://www.city.osaka.lg.jp/kankyo/page/0000405699.html>
- 11) 田中豊, 脇本和昌. 多変量統計解析法. 現代数学社; 1998.
- 12) 酒折文武, 大石正平, 竹内光悦. Excel 徹底活用推測統計入門. 秀和システム; 2006.
- 13) 黒澤和人. 統計・OR 入門. 共立出版; 1995.
- 14) 酒井護, 北野雅昭, 西谷隆司. 大阪市の都市ごみ焼却施設搬入ごみ質調査, 大阪市立環科研報告, 73: 59 - 64.

(WEB サイトの内容は、2021年7月1日に確認した)