

令和 5 年 6 月 22 日現在

機関番号：82101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K12277

研究課題名(和文) ごみ組成の変化に対応した焼却施設の安定運用、焼却残渣の有効利用に関する研究

研究課題名(英文) Research on stable operation of incineration facilities and recycling of incineration residues in response to changes in waste composition

研究代表者

飯野 成憲 (Iino, Shigenori)

国立研究開発法人国立環境研究所・福島地域協働研究拠点・主任研究員

研究者番号：90792531

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：ごみ減容化施策の浸透やライフスタイルの変化に伴い、今後、焼却施設で受け入れるごみ組成の変化が予想される。そこで、過去5年間(年4回)、炉形式の異なる21施設のデータを用い、重回帰分析により炉形式、主灰の成分、ごみ組成の関係を表現する予測モデルを構築した。また、ストーカー炉18施設(2015～2018年)を対象にごみ組成と焼却残渣の発生量・含有元素の関係についてマクロ的解析を実施した。紙が少なく、プラ類が多いと主灰、飛灰の発生量が大きくなることがわかった。紙類が多くプラ類が少ないと総クロムが大きくなり、紙類が少なくプラ類が多いと銅、亜鉛、セレン、鉛が大きくなるという傾向が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ごみの組成は時代によって変化しており、近年ではごみ減量化施策やライフスタイルの変化によって徐々に変わってきている。そして、ゼロカーボン施策や更なる環境意識の高まりによって、今後も変化し続けることが予測される。ごみ組成が変化すると、焼却炉の運転や焼却残渣の性状(量や含有元素)にも影響を及ぼし、廃棄物の適正管理という側面から考えるとごみ組成は極めて重要な要素である。そこで、本研究では、過去のアーカイブ試料を用いて、ごみ組成が焼却残渣に及ぼす影響について明らかにし、ごみ組成変化から焼却残渣の性状を予測できるモデルの構築を実施し、将来的な廃棄物の適正管理に向けた基本的情報を整備した。

研究成果の概要(英文)：With the spread of waste volume reduction measures and changes in lifestyles, it is expected that the composition of MSW to be accepted at incineration facilities will change in the future. Therefore, using data from 21 facilities with different furnace types for the past five years (four times a year), a prediction model was constructed to express the relationship among furnace type, bottom ash composition, and MSW composition through multiple regression analysis. Macroscopic analysis was also conducted for 18 stoker furnaces (2015-2018) on the relationship between MSW composition and the amount of incineration residue generated and elements contained. It was found that the generation of bottom ash and fly ash was larger when there was less paper and more plastics. A trend was obtained where total chromium was larger when there was more paper and less plastics, and copper, zinc, selenium, and lead were larger when there was less paper and more plastics.

研究分野：廃棄物工学

キーワード：ごみ組成 焼却 焼却残渣 安定運転 有効利用

1. 研究開始当初の背景

ごみ減量化施策の浸透やライフスタイルの変化等に伴い、将来、ごみ組成の変化が予想される。ごみ組成、ごみ質の変化は焼却施設の安定運転や焼却残渣の性状に影響を及ぼすことが考えられる。これまでにごみ組成調査の現場確認や経年データから、「紙類」と「プラスチック類」の組成が湿ベースで合計約 60%と多くを占め、また増加傾向にあることを確認している。オフィス等から排出される紙類の割合が大きいこと、プラスチック類のサーマルリサイクルによるエネルギー回収の推進等、地域事情や施策が原因と考えられている。焼却残渣は現在セメント原料化や溶融処理が主に行われているが、溶融施設へのヒアリング調査では、東京都の焼却残渣の塩基度 ($\text{CaO} / \text{SiO}_2$) が一般的に高いというコメントが得られている。塩基度は溶融処理において流動性管理のために重要な指標であり、通常 1.0 が理想とされる。そこで予備調査として、組成割合が最も大きい「紙類」に着目し、焼却施設 20 施設の紙類の組成割合と塩基度を単回帰分析したところ、紙類の割合が大きいほど塩基度は高い傾向が確認できた。したがって、紙類の焼却量が減少すれば塩基度は溶融処理に理想的な 1.0 前後になり、紙類に限らず高い組成割合である廃プラスチック類や厨芥類の組成割合が変化すれば塩基度も変動することが予想された。なお、2016 年度の 20 焼却施設の年間代表ごみについて、ごみ組成別の元素分析、発熱量分析を行なった結果より、ごみ組成の変動による焼却残渣の影響が示唆されている。

一方、焼却残渣のセメント原料化においては、天然原料である石灰石 (CaCO_3) を主原料、石炭灰や鉄鋼スラグ、都市ごみ焼却残渣等を副原料として利用している。石灰石の代替となる Ca 源は極めて限定されることから、Ca が豊富な焼却残渣の受け入れは天然資源利用量削減の観点からも好ましいといえる。これまで、文献やヒアリング等により、都市ごみ焼却残渣のセメント受入条件を設定し、その上で経済的に最適な焼却残渣の有効利用方法を示してきた。そこで、ごみ組成の変動が焼却施設の運転諸条件、さらには焼却残渣にどのように影響するのかを明らかにし、焼却残渣の性状により溶融処理とセメント原料化を組み合わせた最適な有効利用方法を提示できるのではないかと考えている。

2. 研究の目的

これまで、ごみ組成、排ガス性状、エネルギー回収、焼却残渣の有効利用等は、個別の研究として実施されることが多かった。本研究では、過去のごみ組成別の実ごみ試料、焼却施設 20 施設の過去 50 年にわたるごみ組成調査データ、過去 5 年の焼却施設の運転データ、焼却残渣の性状データを活用し、ごみ組成や化学組成が焼却施設の運転や焼却残渣の性状にもたらす影響を統計的、実験的に明らかにする。長期かつ多施設のごみ組成調査をはじめとする各種データを有する機関はおそらく国内でも限られる。通常、自治体によりごみ分類方法が異なり統計処理が困難となることが予想されるが、当研究に使用するデータは 20 施設全て同じ分類方法で統一されており、統計データとしての質が高く、有用な統計処理が可能であることが特徴である。また、有効利用モデルは、多様なごみ組成に基づく焼却残渣の利用先を提示するものであり、大都市、地方都市のいずれのごみ質にも対応可能である。これより、ごみ組成から運転管理、焼却残渣の有効利用までを含む全体最適かつ合理的なごみ処理、残渣の資源化方を提示するための研究成果を創出することが目的である。

3. 研究の方法

(1) 過去のごみ性状分析

東京都環境科学研究所に保管されていた組成別の家庭ごみを混合平均化して、蛍光 X 線分析及び硝酸等による灰化後 ICP-MS 分析を行って、含有元素を測定し、年度別の推移を検討した。使用した試料は、東京都目黒地区から採取した家庭ごみを乾燥後して紙、プラスチック、繊維、厨芥、草木、ゴム・皮革に分け、粉碎した試料であり、1988 年度 4 回分、1991 年度 3 回分、2001 年度 5 回分の各組成試料について同じ重量を混合し、各年度の試料とした。

元素分析では、各粉碎試料をさらに微粉碎して、各試料を 3 検体採取し、主要な元素成分については蛍光 X 線分析を行い、微量な成分は ICP-MS で分析を行った。分析値は 3 検体の平均値とした。蛍光 X 線分析は微粉碎試料をプラスチックカップに取り、Thermo scientific 社製エネルギー分散型蛍光 X 線装置により測定を行った。ICP-MS 分析は試料約 1g をピーカーに取り、少量の水で湿らして硫酸 1ml と硝酸 5ml を加え加熱した。褐色の蒸気が出なくなるまで硝酸を追加し、有機物を分解した。加熱して硫酸を揮発後、王水 10ml を加えて内容物を溶解し、5B ろ紙でろ過し王水分解抽出液とした。ろ紙と分解残渣は 550 で灰化後、炭酸ナトリウム及びホウ酸によるアルカリ融解処理を行い、両者をアジレント社製 ICP-MS により定量し、王水分解抽出量、アルカリ抽出量の和を全含有量 (mg/kg) とした。

(2) ごみ組成が焼却残渣の性状に及ぼす影響について

2012 年度から 2016 年度までの国内都市ごみ焼却施設 21 施設 (ストーカー式: 18 施設、流動床式: 2 施設、ガス化溶融: 1 施設) におけるごみ組成調査データ及び焼却残渣の性状調査データを使用した。ごみ組成調査データ及び焼却残渣の性状調査データについては、いずれも年間 4 回実施しているが、ごみ組成調査と焼却残渣の性状調査を同月同日には実施していないため、ごみ組成と主灰性状は最大で 2 か月程度ずれが生じる場合がある。調査データの解析については、消石灰、粉末活性炭、助剤等、煙道ガス中の酸性ガス量等による焼却残渣の性状変

化の影響を避けるため、焼却残渣のうち主灰（流動床、ガス化溶融炉の場合は流動床不燃物）のみを対象とした。

焼却方式（ストーカー式、流動床式、ガス化溶融）別に、表 1 の乾ベースのごみ組成のうち、最も割合が大きい紙類、厨芥、プラスチック類の割合と、主灰に含まれる元素あるいは元素の酸化物換算値の相関を確認した。また、いずれの種類のごみ組成変化が焼却残渣の性状に影響を及ぼすのか確認するため、重回帰分析を実施した。表 1 に示すごみ組成を説明変数、表 2 に示す主灰・流動床不燃物の組成を目的変数として、元素ごとに重回帰分析を実施した。表 1 のすべての乾ベースごみ組成で信頼区間 10%を初期条件として都度説明変数を信頼区間 5%になるまで絞り込んだ後、赤池の情報量基準（AIC）の変数増減法により AIC が最小となる重回帰モデルを決定した。

（3）ごみ組成と運転実績、焼却残渣の関連分析

ごみの組成の約 8 割を占める紙類、厨芥、プラスチック類に着目し、これらのバランスが主灰・飛灰の発生量及び含有元素にどのような影響を与えるのか把握することを目的に、クラスター分析、並びにロジスティック回帰分析を援用したマクロ的な視点での解析を試みた。図 1 にごみ組成と主灰・飛灰との関係を示す。

使用したデータは、東京二十三区の清掃工場 20 施設のうちストーカ炉方式を採用している 18 施設を対象とし、2015 年から 2018 年にかけての四半期ごとの、ごみ組成、薬品処理に用いた薬品の使用量、主灰・飛灰の発生量や元素分配や元素含有量を集計して用いた。本分析では、主灰及び飛灰の「発生量」への影響を検討する際は、絶対量ではなく「ごみ処理量あたり」に換算した数値として取り扱った。これは、Input のごみ組成と Output の主灰及び飛灰との関係を明確にするためである。

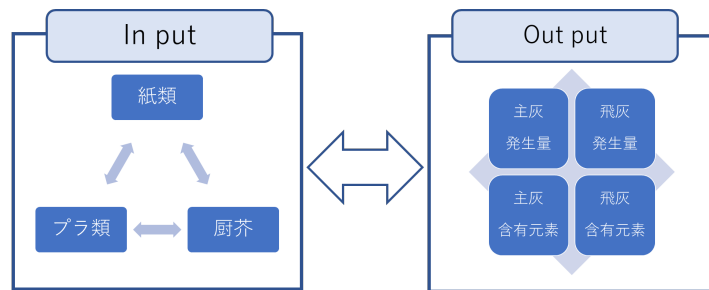


図 1 ごみ組成 (Input) と主灰・飛灰 (Output) の関係

4. 研究成果

（1）過去のごみ性状分析

蛍光 X 線分析による 1988 年度、1991 年度、2001 年度の各ごみ組成について、Si、S、Cl、Ca の含有量を分析した。Si は紙類中の含有量が高く、年度別では 30000 mg/kg 程度でほとんど変化がなかった。プラスチック、繊維、草木、ゴム・皮革でも年度別の変化が少なかった。S は繊維、ゴム・皮革で 20000 mg/kg を超える高い含有量の年度があった。Cl はプラスチック、ゴム・皮革で 2001 年度に 70000 mg/kg 以上の高い含有量を示し、塩ビ製品の廃棄物が増加していた可能性がある。K は厨芥、草木の含有量が高く、植物中に入っている分が影響していたとみられる。1988 年度、1991 年度より 2001 年度のほうが増加している傾向がみられた。Ca は厨芥の含有量が高く、1991 年度に 130000 mg/kg の最大値を示した。紙では後の年度ほど高くなる傾向が見られた。

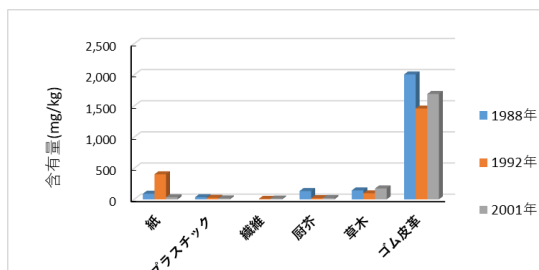


図 2 ごみ組成別の Cu 含有量

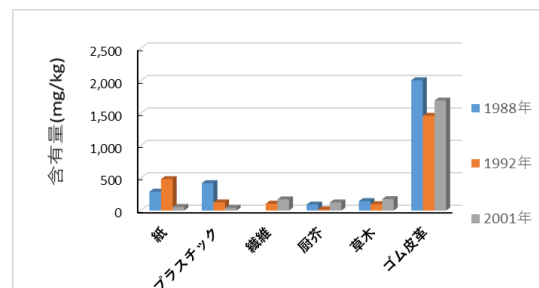


図 3 ごみ組成別の Zn 含有量

次いで、ICP-MS 分析による 1988 年度、1991 年度、2001 年度の各ごみ組成について、Na、Mg、Al、Cr、Cu、Zn の含有量を評価した。一例として Cr と Zn について図 2、3 に示す。Na は厨芥中の含有量が高く、1988 年に 5000 mg/kg あったが、後の年では 3000 mg/kg 以下となっている。プラスチックや繊維も 1000mg/kg から相当低下していた。Mg は紙中に多く、1988 年に 3000 mg/kg 以上あったが、徐々に減っていた。プラスチック、ゴム中に添加剤、充填剤として使われ、1000 mg/kg 程度から多少増加傾向を示していた。Al は紙中に多く、いず

れの年度も 10000 mg/kg 以上あった。紙の表面にアルミを蒸着した製品があるために含有量が高いと推定される。Cr、Cu、Zn では、いずれもゴム・皮革の含有量が他の組成よりも高いが、これは Cr、Zn がなめし剤として使用されているためと考えられる。

(2) ごみ組成が焼却残渣の性状に及ぼす影響について

ごみ組成と主灰中の塩基度及び塩素含有量の関係性を評価した。ここで、塩基度に着目した理由は、自治体及び民間委託での主灰の溶融処理、塩素に着目した理由は、主灰のセメント原料化への影響をそれぞれ検討するためである。流動床炉、ガス化溶融炉においては塩基度が低いことが確認できる。これは炉の構造とともに、流動砂が一部混入していることも影響しているものと考えられる。塩素についても流動床炉、ガス化溶融炉についてはストーカー炉に比べ、低くなっていた。

ごみ組成別では、ストーカー炉の場合、紙類の割合が高いほど、厨芥やプラスチックの割合が低いほど、主灰の塩基度が増加していた。一方、流動床炉、ガス化溶融炉については、サンプル数が限られているため、紙類、厨芥類、プラスチック類の割合と主灰の塩基度には明確な関係は確認されなかった。また、ごみ組成と主灰中の塩素含有量の関係については、ストーカー炉、流動床炉、ガス化溶融炉ともに、明確な関係は確認されなかった。

以上の検討は単回帰分析に相当することから、説明変数相互の影響について把握することが困難であったと考えられる。そこで、重回帰分析により炉形式ごと、主灰の成分ごとにごみ組成の変化に伴う予測モデルを構築した。ストーカー炉におけるごみ組成から主灰組成を予測するモデルを以下に示す。

$$\begin{aligned} \text{CaO} &= 3.0 + 0.22 \times \text{厨芥} + 6.8 \times \text{非鉄} + 0.4 \times \text{紙類} + 0.3 \times \text{プラスチック類} \\ \text{SiO}_2 &= 0.6 + 0.06 \times \text{プラスチック類} \\ \text{Al}_2\text{O}_3 &= 11.6 + 0.5 \times \text{ゴム・皮革} \\ \text{Fe}_2\text{O}_3 &= 3.0 + 0.08 \times \text{厨芥} + 2.1 \times \text{その他不燃物} \\ \text{Cl} &= 0.3 + 0.3 \times \text{鉄} - 0.3 \times \text{ガラス} + 0.03 \times \text{プラスチック類} \\ \text{Na}_2\text{O} &= 3.7 - 1.0 \times \text{非鉄} - 0.01 \times \text{紙類} \\ \text{K}_2\text{O} &= 1.5 - 0.4 \times \text{非鉄} - 0.01 \times \text{紙類} \\ \text{MgO} &= 2.8 - 0.07 \times \text{その他不燃物} \\ \text{P}_2\text{O}_5 &= -1.5 + 0.07 \times \text{厨芥} + 0.07 \times \text{紙類} \end{aligned}$$

モデルより、例えば CaO は厨芥、非鉄、紙類、プラスチック類の組成より、SiO₂ はプラスチック類のみの組成により含有量を予測することが出来る。プラスチック類の増加は、CaO、SiO₂、Cl の含有量の増加に、紙類の増加は CaO、Na₂O、K₂O、P₂O₅ の含有量の増加に、厨芥の増加は CaO、Fe₂O₃、P₂O₅ の含有量の増加にそれぞれ寄与することがわかった。一方、組成割合としては小さい非鉄、ガラス、その他可燃物、その他不燃物が目的変数となっている元素もあることから、改良が必要である。なお、流動床炉、ガス化溶融炉については、サンプル数が少なかったため、適切なモデルは得られなかった。

将来のごみ組成の変化が焼却残渣の性状に及ぼす影響について、5年間（年4回）、21施設のごみ組成調査データ、主灰の性状データを用いて解析した結果、ストーカー炉から排出された主灰中に含まれる CaO の増加には、厨芥、非鉄、紙類、プラスチック類が、SiO₂ の増加にはプラスチック類が、Cl の増加には鉄、ガラス、プラスチック類が寄与していることがわかった。本モデルは、過去5年間のごみ組成調査を活用したものであるため、例えば、プラスチック類や厨芥類の割合が極端に少ないなど、2050年におけるごみ処理におけるカーボンニュートラルを目指した場合等、現状では極端なごみ組成を再現することは困難である。極端なごみ組成を再現するためには、模擬的な燃焼実験等が必要であり、主灰や飛灰への元素分配、薬剤使用量の予測等を実施することも求められる。

(3) ごみ組成と運転実績、焼却残渣の関連分析

紙類、厨芥、プラスチック類の3変数を対象としたクラスター分析を行い、ごみ組成の類似するグループに分類した上で、各グループの紙類、厨芥、プラスチック類の割合、主灰発生量の平均値を求めた。なお、本分析では3変数の特徴を基準化して扱うため、それぞれを偏差値に換算し、レーダーチャートで表すことで差を明確化した。クラスター数を8に設定した結果、主灰では「紙類が多くプラ類が少ない」という特徴を有するグループと「紙類が少なくプラ類が多い」という特徴を有するグループに分類することができた。ここで、「処理量当たり主灰発生量」と「ごみ組成のバランス」の関係を考察するため、図4に示すレーダーチャートを作成した。図中の赤は「紙類：多」、青は「プラ類：多」のグループを表す。同図より、「処理量当たり主灰発生量」の大きなクラスターは、図中の青、すなわち「プラ類：多」に多く見られることが確認できた。

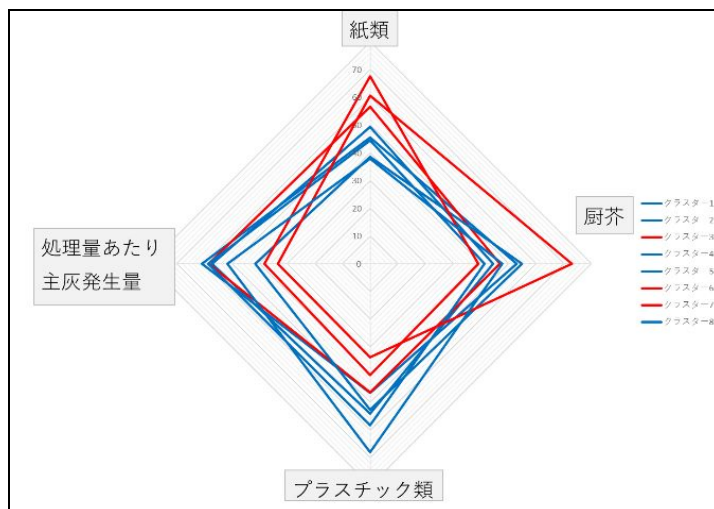


図4 「主灰/組成」のレーダーチャート(偏差値)

処理量当たり主灰発生量の平均値を基準に、高値群：1 と低値群：0 に分類した目的変数とし、ごみ組成、消石灰使用量を説明変数としたロジスティック回帰分析を実施した。飛灰発生量、および元素分配に関しても、上記と同じアプローチを適用した。表1に主灰発生量の多寡に関する適用結果を示す。回帰係数の正負に着目すると、結果は紙類が少なく、プラ類が多い時、主灰発生量の高値群に寄与することを意味している。

表1 主灰発生量に関するロジスティック回帰分析結果

組成	主灰発生量			
	回帰係数	標準誤差	Z値	P値
紙類	-0.0561	0.0295	-1.8990	0.0575
厨芥	-0.0635	0.0585	-1.0860	0.2776
プラ類	0.0740	0.0590	1.2550	0.2094

以上のクラスター分析およびロジスティック回帰分析を援用して清掃工場における「Input と Output」の関係を分析したが、共通して得られた結果は、飛灰発生量が大きくなる組成は紙類の割合が少ない組成であり、消石灰使用量が多い方が飛灰発生量が大きくなる、という結果であった。含有元素分配は、紙類の割合が少ないと B-Pb、F-T-Cr が大きくなり、紙類の割合が多いと B-T-Cr が大きくなる。また、厨芥の割合が少ないと B-As が大きくなり、厨芥の割合が多いと F-As が大きくなるという結果が得られた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 飯野成憲
2. 発表標題 ごみ組成が焼却残渣の性状に及ぼす影響について
3. 学会等名 第43回全国都市清掃研究・事例発表会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>https://www.nies.go.jp/researchers/301682.html</p>
--

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	遠藤 和人 (Endo Kazuto) (10353533)	国立研究開発法人国立環境研究所・福島地域協働研究拠点・室長 (82101)	
研究分担者	荒井 康裕 (Arai Yasuhiro) (50326013)	東京都立大学・都市環境科学研究科・准教授 (22604)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	辰市 祐久 (Tatsuichi Sukehisa) (90869744)	公益財団法人東京都環境公社（東京都環境科学研究所）・環 境資源研究科・研究員（移行） (82816)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関