

令和 4 年 6 月 9 日現在

機関番号：24402

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02277

研究課題名(和文) 下水汚泥焼却工程における閉塞トラブル発生メカニズムの解明と発生抑制対策の提言

研究課題名(英文) Elucidation of the Mechanism of Clogging Trouble in Sewage Sludge Incineration Process and Countermeasures to Reduce the Trouble

研究代表者

貫上 佳則 (KANJO, Yoshinori)

大阪市立大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：90177759

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,700,000円

研究成果の概要(和文)：下水汚泥焼却施設で発生している閉塞トラブルの原因究明と対策について示差熱分析と熱力学平衡計算から検討した結果、閉塞トラブルが発生しやすい下水汚泥には汚泥焼却温度よりも低い融点の化合物が含まれていることが確認された。また、下水汚泥中のPとNa、及びKが多いほど低融点化合物が形成されやすく、逆にSiとAlが多いほど低融点化合物が形成されにくくなることがわかった。これらの元素組成を制御することで、低融点化合物の生成を抑制できる可能性が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

温暖化ガスの1種であるN₂Oの発生抑制対策として下水汚泥の焼却温度を上昇させた結果、各地の下水処理場で閉塞トラブルが発生している。当初は冬季を中心に発生しやすく、経験的に鉄化合物の添加でトラブル発生を未然防止されていたが、最近は発生時期が拡大傾向にあり、薬剤コストの増大も課題となっている。このように、閉塞トラブルの原因と対策が求められる中、実際の下水汚泥を用いた長期間の結果から、閉塞トラブルの原因が低融点化合物の存在であることを明らかにし、元素組成との関係と閉塞トラブル防止策の方向性を提示できたことは意義深く、また理論面からも閉塞現象を解明でき、学術的な意義も高いと判断している。

研究成果の概要(英文)：Differential thermal analysis and thermodynamic equilibrium calculations have confirmed that the sewage sludge that causes clogging problems in sewage sludge incineration facilities contains compounds with melting points lower than the sludge incineration temperature. In addition, the higher content of P, Na, and K in sewage sludge led to the formation of compounds with lower melting points, while the higher content of Si and Al led to the formation of compounds with lower melting points. By controlling the composition of these elements, the possibility of suppressing the formation of compounds with low melting points was obtained.

研究分野：水環境工学

キーワード：下水汚泥 焼却 示差熱分析 融点 元素組成 閉塞トラブル

1. 研究開始当初の背景

一部の分流式の下水処理場の汚泥焼却設備において、排気ダクトや空気予熱器内で白色粉末の堆積物によって閉塞する現象が発生していると多数の自治体で報告されている。高度処理の普及によって、下水汚泥中のリンが高濃度化し下水汚泥の組成が変化していることや、温室効果ガスである N_2O ガスの発生抑制のために下水汚泥焼却温度を 800 から 850 以上に高めたことが原因として考えられている。そのため、下水処理施設では、経験的に脱水ケーキにポリ硫酸第二鉄を添加する対策が行われており、そのコストに自治体は頭を悩ませている。

既往研究¹⁾では、焼却灰中の溶融物が煙道に付着し、固形物が堆積することで閉塞現象が発生していると推定されているほか、リンと他の無機成分との比率によって閉塞現象発生の危険性予測が複数提示されている。下水汚泥焼却炉関連施設で閉塞現象が発生すると汚泥の焼却効率の低下や空気予熱器の破損につながり、汚泥処理施設の停止に繋がることから、閉塞現象の発生機構の解明や、薬剤添加よりもコストのかからない対策が強く求められている。

このような閉塞現象の発生は、下水汚泥中の無機成分の組成により、汚泥の焼却温度付近で溶融する物質(低融点化合物)が生成することが原因であると考えられる。下水汚泥の融点に関する研究は、下水汚泥の溶融処理を行う上で基本となる特性であることから、融点と無機成分との関係については多くの研究²⁾が行われており、下水汚泥の熱特性を調べるために熱重量・示差熱分析を活用した研究が実施されてきた。また、石炭火力発電所では炉内や後段のボイラでも灰の一部が溶融して、炉壁や伝熱面への付着や腐食を引き起こすスラッシングやファウリング現象が報告されており、石炭灰の無機成分を元にした評価指標が用いられている³⁾。しかし、下水汚泥溶融処理は 1200 以上で処理され、石炭火力発電所では 1300 以上の高温で燃焼されることから、下水汚泥の焼却処理温度域(800~850)よりもかなり高温域で発生する現象である点が大きく異なる。一方で、低炭素社会の実現に向けて、化石燃料である石炭やバイオマス資源である下水汚泥との混焼や、都市ごみ、もみ殻などと下水汚泥との混焼時における焼却灰の熱特性に関する研究も進められつつあるが、焼却灰の無機成分の構成割合が大きく異なる場合が多い。

2. 研究の目的

本研究では下水処理場の汚泥焼却施設で頻発している閉塞現象の発生機構を調べ、解決策の提案を行うことを目的とした。すなわち、下水汚泥試料の示差熱分析を行うことで得られる熱特性(融点、溶融物量)と、熱力学平衡計算結果から、閉塞トラブルは低融点化合物の生成が主原因であることを示し、低融点化合物の生成に影響を与える無機成分を整理した。そして、汚泥からリン含有量を低減する事が閉塞トラブルの抑制に効果的であることを示した。

3. 研究の方法

本研究では、ともに分流式で同程度の施設規模であり、生活排水以外はほぼ流入しない 2 つの下水処理場であるが、これまで空気予熱器で閉塞現象が発生している N 下水処理場と、閉塞現象が発生していない O 下水処理場を対象とした。両下水処理場の焼却炉に投入される前の脱水汚泥を採取し、600 で 1 時間焼成して有機分と水分を除去して保存していた

各々約 80 サンプルを「焼成試料」として用いた。また、焼成試料中の無機成分である Fe_2O_3 , Al_2O_3 , CaO , MgO , Na_2O , K_2O , SiO_2 , P_2O_5 の 8 種類の含有量は下水試験方法に則って測定した。これらの試料に対し 3 回ずつ示差熱分析を行い、平均値で結果を整理した。DTA によって得られた DTA 曲線に吸熱ピークが生じ、かつその温度で重量変化が生じなければ試料の一部が溶融したと判断した。また、熱力学平衡計算ソフトウェアである FactSage と、熱力学データベースである GTOX を用いることにより、下水汚泥の焼却温度域(850)における多成分系の混合物の熱力学的平衡状態を予測した。

さらに、N 下水処理場 A₂O 系列の余剰汚泥 3L に対してグルコース(濃度 200g/L)10mL を添加し嫌気条件で攪拌した後、遠心分離して得られた汚泥固形分を脱水し、600 で焼成させたリン除去試料を作成した。このリン除去試料に対して示差熱分析を行ったが、リン含有量が高いためか試料がガラス化して DTA 曲線上に吸熱ピークが得られなかったため、脱リン汚泥中の無機成分含有率を用いて FactSage により溶融物割合を計算した。

4 . 研究成果

(1) DTA 分析による N 焼成試料の融点の経時変化を図 1 に示す。図 1 から、N 焼成試料は年間を通じて 860 前後の融点が測定されることが多く、10 月から 3 月には融点が 800 近くまで低下することがわかった。そのため、850 以下の融点が測定された期間には下水汚泥の焼却温度(850)で溶融する物質(低融点化合物)が含まれていることが分かった。

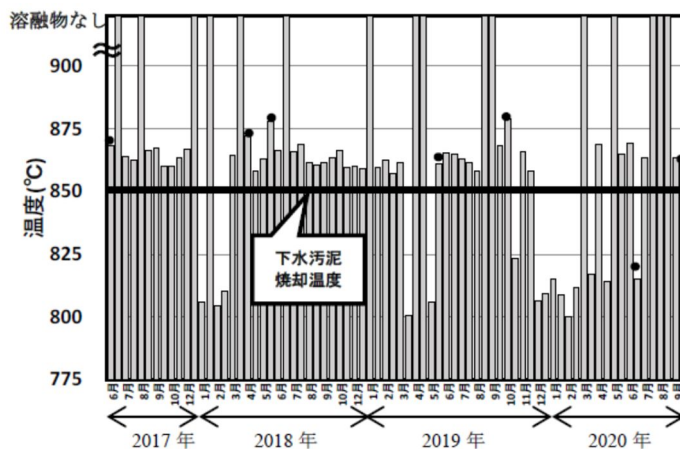


図 1 N 焼成試料の融点の経時変化

さらに図 2 に O 焼成試料の融点の経時変化を示す。図 2 より、大半の試料では 1000 までの温度範囲で融点を示さないことがわかり、図 1 に示した N 焼成試料との違いが明確に現れていることがわかる。そのため、両下水処理場での閉塞現象の発生状況から考えて、下水汚泥中の低融点化合物の存在の有無が閉塞現象の発生機構に関与していることが分かった。

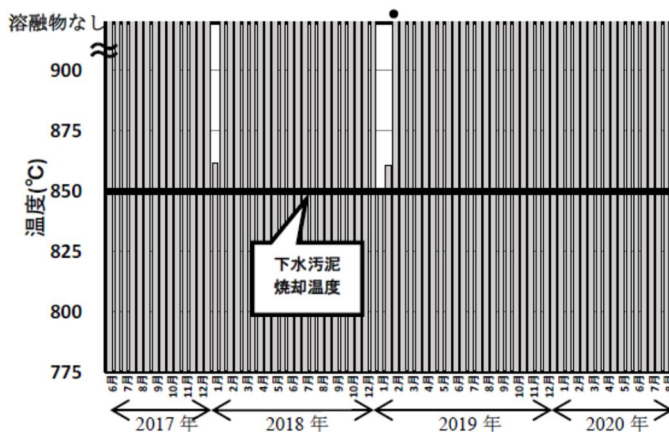


図 2 O 焼成試料の融点の経時変化

(2) N 焼成試料と N 焼成試料に試薬を段階的に加えて作成した模擬試料に対する示差熱分析結果のうち、一例として Al 含有率と融点および溶融物量の関係を図 3 に示す。図 3 より、Al 含有率が増加しても融点はほとんど変化しなかったが、溶融物量は徐々に減少した。これは、850 で溶融する化合物種は変化しないものの、その化合物の生成量が減少した結

果であると考えられる。一方、 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ や P_2O_5 を添加した模擬試料の場合は、850 まで加熱するといずれもガラス化してしまい、DTA 曲線上にピークが現れなかった。そのため、試薬添加実験からはリン含有量と融点、溶融物量との関係を確認することができなかった。

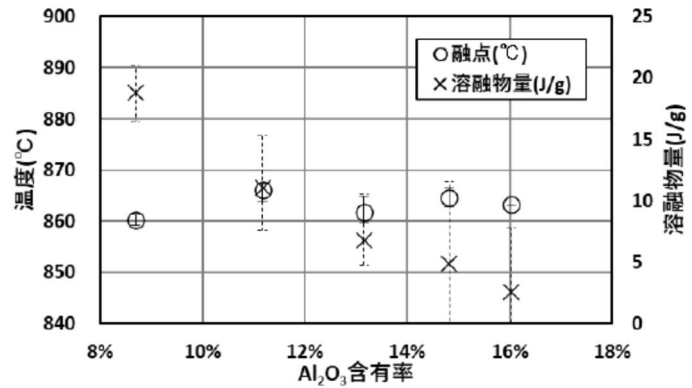


図3 PACの添加による熱特性の変化

(3) 各元素の含有量と融点、溶融物量との関係を推定するため、N、O 焼成試料の無機成分の平均含有率を基準として、Al もしくは P の含有率のみを 5 段階 (30%減, 15%減, 平均, 15%増, 30%増) に変化させ、850 での融点と溶融物量を FactSage で計算した結果を図 4、図 5 に示す。○は N 焼成試料で、△は O 焼成試料を用いた結果である。白色は平均含有率を示した。もともと溶融物が存在する N 焼成試料では、 Al_2O_3 含有率が増加するほど溶融物割合が減少した。また、 P_2O_5 含有率が増加するほど溶融物割合が増加した。溶融物が存在しない O 焼成試料では Al_2O_3 含有率を 30%減少させたときに溶融物が発生し、 P_2O_5 含有率を増加させると溶融物が発生して増加する結果が得られた。

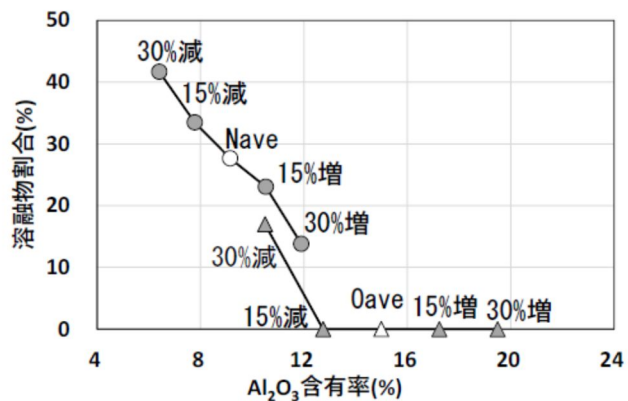


図4 Al_2O_3 含有率を変化させたときの溶融物割合

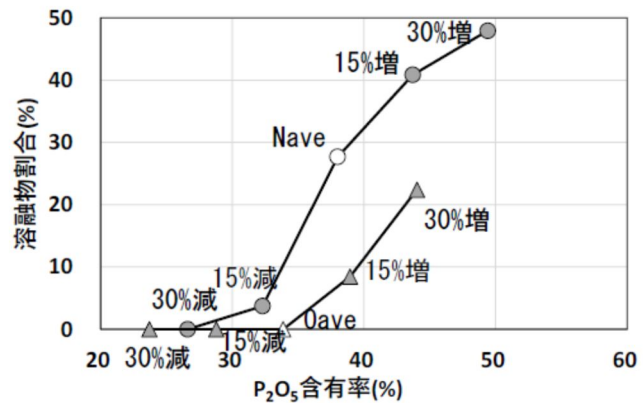


図5 P_2O_5 含有率を変化させたときの溶融物割合

以上の結果から総合的に判断すると、閉塞現象を促進する効果を持つ元素は Na, K, P であり、閉塞現象を抑制する効果を持つ元素は Si, Al であることがわかった。

(4) 最後に、下水汚泥を嫌気条件下で 48 時間攪拌することで上澄みリン濃度は 0mg/L から 75.1mg/L まで上昇した。この脱リン汚泥の元素組成をもとに FactSage で 850 における溶融物量を推算したところ、図 6 に示したように、脱リン前の汚泥の溶融物割合が 34.8% だったのに対し、48 時間後にはリン含有率は約 7% 減少したにもかかわらず、溶融物

量が18.4%までほぼ半減することがわかった。したがって、汚泥からリンを除去することで、閉塞トラブルの減少につながると推定された。

<引用文献>

- 1) 中田友三：下水汚泥焼却炉の閉塞危険性評価方法及び閉塞防止方法，東京都下水道局技術調査年報 - 2016 - Vol40，pp.135-148，2016. など
- 2) 村上忠弘ら：下水汚泥灰分の溶融特性に関する考察，下水道協会誌，Vol.26，No.296，Page.12-18，1989. など
- 3) 辻博文ら：微粉炭燃焼時のスラッキングとファウリングの発生機構，評価法と研究展望，Journal of the Japan Institute of Energy，Vol.89，No.9，pp.893-902，2010. など

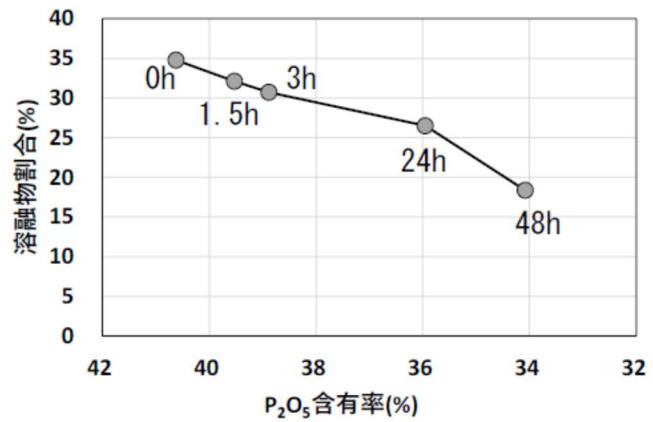


図6 嫌気条件での攪拌時間ごとの溶融物割合

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 幸田直也、貴上佳則、有吉欽吾、下岸徹也、田仲弘幸	4. 巻 77
2. 論文標題 下水汚泥焼却時における溶融物生成に及ぼす下水汚泥中の無機成分の影響	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 土木学会論文集G(環境)	6. 最初と最後の頁 _393- _401
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 幸田直也、松崎雄生、貴上佳則、檜物良一、下岸徹也
2. 発表標題 下水汚泥焼却時における溶融物生成に及ぼす下水汚泥中の無機成分の影響
3. 学会等名 公益社団法人日本下水道協会 第57回下水道研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 松崎雄生、笹川武暉、貴上佳則、檜物良一、下岸徹也
2. 発表標題 下水汚泥の融点の季節変化特性と元素組成との関係
3. 学会等名 公益社団法人日本下水道協会 第56回下水道研究発表会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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	有吉 欽吾 (ARIYOSHI Kingo) (80381979)	大阪市立大学・大学院工学研究科・准教授 (24402)	

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
---------	---------