

〈研究発表〉

下水汚泥脱水促進に与える繊維状物質や加温方法の影響

堀之内 慎 吾¹⁾, 大 下 和 徹²⁾, 本 間 亮 介³⁾
蓮 中 勇 也⁴⁾, 丹 雅 史⁵⁾, 高 岡 昌 輝⁶⁾

¹⁾ 京都大学大学院 工学研究科都市環境工学専攻
(〒 615-8540 京都市西京区京都大学桂 C-1-3-467 E-mail: horinouchi.shingo.22r@kyoto-u.ac.jp)

²⁾ 京都大学大学院 工学研究科都市環境工学専攻
(〒 615-8540 京都市西京区京都大学桂 C-1-3-463 E-mail: oshita@epsehost.env.kyoto-u.ac.jp)

³⁾ 京都大学大学院 工学研究科都市環境工学専攻
(〒 615-8540 京都市西京区京都大学桂 C-1-3-462 E-mail: homma.ryosuke.6j@kyoto-u.ac.jp)

⁴⁾ メタウォーター(株) R&D センター 資源再生技術開発部 汚泥処理技術開発グループ
(〒 451-0045 愛知県名古屋市西区名駅 2 丁目 27 番 8 号 名古屋プライムセントラルタワー
E-mail: hasunaka-yuya@metawater.co.jp)

⁵⁾ メタウォーター(株) 環境エンジニアリング事業本部 水環境事業部 水再生技術部第一グループ
(〒 101-0041 東京都千代田区神田須田町 1-25 JR 神田万世橋ビル E-mail: tan-masafumi@metawater.co.jp)

⁶⁾ 京都大学大学院 工学研究科都市環境工学専攻
(〒 615-8540 京都市西京区京都大学桂 C-1-3-461 E-mail: takaoka.masaki.4w@kyoto-u.ac.jp)

概 要

下水汚泥の加温脱水における繊維状物の影響および加温対象の制限による影響を調査した。回収繊維や再生紙 100% のトイレットペーパーを余剰濃縮汚泥に投入し加温脱水を行った結果、繊維状物による流路確保と加温による水の粘度低下によって脱水が促進される可能性が示唆された。一方、パルプ 100% のトイレットペーパーでは加温効果が見られず、加温効果に繊維長が影響すると推測された。また、初沈・余剰の片方のみを加温し混合した場合、脱水ケーキの含水率低下と VTS 溶出が抑制され、加温脱水において脱水時温度が重要であることが示唆された。

キーワード：初沈濃縮汚泥、繊維状物、加温処理、遠心脱水、繊維長

原稿受付 2024.7.7

EICA: 29(2・3) 84-87

1. 背景と目的

日本における 2022 年度の下水汚泥発生量は乾燥重量で 235 万トンであり、下水汚泥の有する有機物の全エネルギーを熱量として換算した場合、下水処理場の年間電力消費量の 1.6 倍にも相当する約 120 億 kWh にもなる。下水汚泥のマテリアルとしてのリサイクル率は 2022 年度で 74% と高い傾向にあるが、下水汚泥中有機物のエネルギー利用率は約 26% にとどまっている¹⁾。下水汚泥中の有機物のエネルギー利用が困難である要因として、下水汚泥の高含水性と難脱水性があげられ、濃縮・脱水技術がより重要である。そのため、これまで様々な含水率を低減させる方法が検討されてきており、その一例に加温前処理があり、200℃ 以上での水熱処理後の脱水操作によって脱水ケーキの含水率を自然可能な 52% まで低下させた報告²⁾や、200℃ 以上で水蒸気加熱処理した汚泥を 300 MPa で圧搾脱水することで含水率を 20% 程度まで減少させた報告³⁾がある。しかしながら、これらの温度域や圧力下では汚泥が可溶化され、有機分が脱水分離

液に移行することで、脱水ケーキの有機分の減少や分離液の水質悪化に伴う水処理系への負荷の増加が懸念される。そこで近年では、100℃ 以下の低温域での加温処理に関する研究が進められている。例えば、倭は、混合濃縮汚泥を対象とした場合に、1 液薬注、67℃、1 時間の加温処理で含水率が 4% 程度減少したと報告し⁴⁾、また、荻野は 1 液薬注、70℃、10 分間の加温で含水率が 7.3% 程度低下したと報告しており⁵⁾、その効果が認められている。さらに、これらの知見から、加温時間が異なるものの、対象とする混合濃縮汚泥の成分によって加温による脱水促進効果が異なることが推測される。

これまで本研究グループでは、この促進効果の違いに着目し、混合濃縮汚泥が初沈濃縮汚泥と余剰濃縮汚泥の性状の異なる汚泥の混合物であり、その混合比率が処理場によって異なることから、初沈濃縮汚泥と余剰濃縮汚泥の混合比を変化させて、加温脱水に与える影響を調査してきた。その結果、下水汚泥を採取した処理場の違いに関わらず、混合濃縮汚泥に含まれる初沈濃縮汚泥の比率が大きいほど加温による脱水が促進さ

れた^{6,7)}。しかしながら、この加温による脱水促進の直接的なメカニズムは明らかになっていない。

そこで本研究では、初沈濃縮汚泥と余剰濃縮汚泥における加温効果の要因を、対象とする汚泥の調整や、その加温対象を変化させることにより明らかにすることを目的とした。具体的には、これら2種の汚泥の加温効果の違いは、特に初沈濃縮汚泥に多く含まれる繊維状物によるものであると仮定し、初沈濃縮汚泥から回収した繊維状物やその主な構成要素であると考えられるトイレットペーパーを余剰濃縮汚泥に投入して加温脱水を行い、その促進メカニズムを考察した。また、加温に必要な熱量を減らすため、初沈濃縮汚泥・余剰濃縮汚泥の一方のみを加温後、もう一方と混合して脱水を行う加温方法について検討した。

2. 実験方法

2.1 汚泥試料

汚泥試料はA下水処理場で2023年2月20日に採取した初沈濃縮汚泥と余剰濃縮汚泥を用いた。各汚泥の性状をTable 1に示す。汚泥性状の分析は下水試験方法⁸⁾より実施した。分析は各2-3回実施し、平均値を示した。初沈濃縮汚泥について、TSは34,600 mg/L、VTSは32,200 mg/L、繊維状物量は0.69 g/g-TSであった。一方、余剰濃縮汚泥について、TSは41,400 mg/L、VTSは34,200 mg/L、繊維状物量は0.05 mg/Lであった。これらの結果から、初沈濃縮汚泥は余剰濃縮汚泥に比べTSおよびVTSがやや低い傾向が見られ、繊維状物量が顕著に高いことが分かる。

Table 1 Characteristics of primary and excess concentrated sludge

汚泥種	TS (mg/L)	VTS (mg/L)	繊維状物量 (g/g-TS)
初沈濃縮汚泥	34,600±1,400	32,200±1,300	0.69±0.06
余剰濃縮汚泥	41,400±0	34,200±100	0.05±0.00

Values are expressed as mean ± standard deviation (N=2-3)

2.2 加温前処理脱水実験

加温前処理は、湯煎器(Fine製: Water Bath FWB-21B)に20 mLの汚泥試料を加えた50 mL遠沈管を入れ、温度上昇後、設定温度(40, 55, 70, 80°C)に達してから10分間行った。汚泥試料は通常は冷蔵保存をしているが、使用前日に常温(20°C)にした状態のものを使用した。

脱水実験は、遠心脱水機を想定し、遠心分離機(株式会社サン製: 卓上遠心機 H-36)を使用した。加温直後の汚泥試料に、A下水処理場で用いている高分子凝集剤(カチオン性、ツキフロック TC-391P)を溶解させた0.2%ポリマー水溶液を加え攪拌し、フ

ロックを作成した。得られた凝集汚泥に2,100 G・3分間の遠心分離を行い、上澄み液を回収した。その後、分離した凝集汚泥をナイロン製のガーゼに包み、脱水セル(直径25 mm, 高さ70 mm)に設置後遠沈管に入れ(Photo. 1), 2,100 G・10分間の遠心脱水を行った。脱水後、ガーゼ内に残った脱水ケーキを回収し、含水率を測定した。

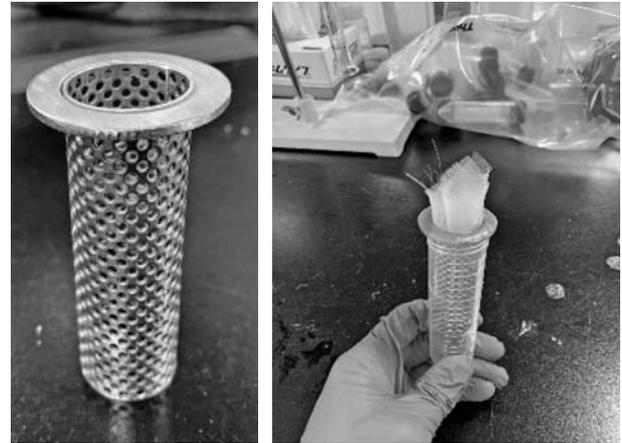


Photo. 1 Dewatering Cell

2.3 実験条件

(1) 繊維状物の混合

汚泥種による加温効果の違いの原因を調査するため、初沈濃縮汚泥に多く含まれる繊維状物に注目し、余剰濃縮汚泥に、初沈濃縮汚泥から回収した繊維状物(回収繊維)と、その主な構成要素であると考えられるトイレットペーパー2種(パルプ100%, 再生紙100%)の計3種類の繊維状物を混合して加温前処理脱水実験を行った。なお、トイレットペーパーは超純水で吸水させて含水率を96.5%(初沈濃縮汚泥の含水率: 実測値)とした。また、サンプル全体の繊維状物量は、初沈濃縮汚泥と余剰濃縮汚泥を固形分比で1:1に混合した際の繊維状物量と同量とし、ポリマー添加率は繊維状物に対し0.5%_TS, 余剰濃縮汚泥に対し1.5%_TSとした。

(2) 加温対象の制限

汚泥加温に必要な熱量を減らすため、混合前に初沈濃縮汚泥または余剰濃縮汚泥の一方のみを加温前処理後、もう一方の汚泥と混合し脱水実験を行った。なお、初沈濃縮汚泥と余剰濃縮汚泥の混合比は、固形分比で1:1とし、ポリマー添加率は初沈濃縮汚泥に対し0.5%_TS, 余剰濃縮汚泥に対し1.5%_TSとした。

3. 結果および考察

3.1 繊維状物の混合

Fig. 1に繊維状物混合実験の結果を示す。まず、

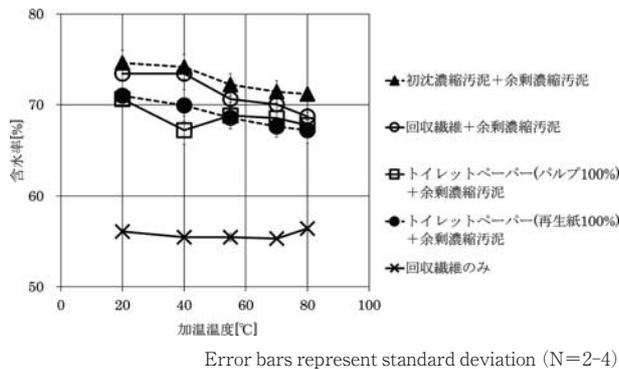


Fig. 1 Results of heating dewatering experiments with mixed fibrous materials

“回収繊維+余剰濃縮汚泥”について、無加温時は脱水ケーキの含水率は73.4%であったが、40、55、70、80℃で加温処理を行うと、脱水ケーキの含水率は73.4、70.6、70.1、68.7%となり、加温温度が高いほど脱水ケーキの含水率が低下し、加温による脱水促進効果が確認された。同様に、“トイレットペーパー（再生紙100%）+余剰濃縮汚泥”についても、20℃において71.0%であった脱水ケーキの含水率は、設定温度での加温処理によって、70.0、68.6、67.6、67.2%となり、加温による脱水促進効果が確認された。一方、“トイレットペーパー（パルプ100%）+余剰濃縮汚泥”の脱水ケーキの含水率は、設定温度で加温処理を行うことで、67.2、68.8、68.5、67.8%となり、無加温時の70.7%よりも低下した結果となったが、加温温度上昇に伴う脱水ケーキ含水率の低下を確認することはできなかった。また、“回収繊維のみ”においても、設定温度での加温処理を行っても脱水ケーキの含水率は55.5、55.5、55.3、56.4%であり、無加温時の56.1%と比較して、加温温度上昇による脱水ケーキ含水率の低下を確認することができなかった。

以上のように、回収繊維のみに対して加温脱水を行っても脱水促進効果が得られなかったことは、回収繊維は加温により変性することなく、上記の含水率で脱水の限界に達していることが考えられる。また、余剰濃縮汚泥に回収繊維を投入すると加温の効果が確認できたが、元々、繊維状物が脱水助剤として有効であることは明らかにされており、その脱水性向上のメカニズムは、繊維が脱水ケーキ中で骨格の役割を果たし、水の流路を確保することによるものと考えられている⁹⁾。この性質に加え、水は温度が上昇することによって粘度が低下することを考慮すると、下水汚泥の加温による脱水促進は、繊維状物は加温によって変性はせず、それによって確保された流路を、粘度が低下した水が通過することによるものと推測される。

一方、“トイレットペーパー（パルプ100%）+余剰濃縮汚泥”において加温効果が確認できなかった理由としては、投入した繊維状物の性状の違いによるもの

であると考えられる。加温効果が確認できた再生紙を構成している古紙パルプ繊維は、再生処理の工程で種々の機械的および化学的作用を受け、変質・損傷している¹⁰⁾。同様に、回収繊維は、元々再生紙が一定の割合で含まれるうえ、下水管内の移動や処理場での処理工程を経て、変質・損傷していると考えられる。実際、回収繊維および再生紙繊維の繊維長の分布を分析した研究¹¹⁾では、回収繊維の繊維長分布のピークは0.7 mmであり、再生紙繊維の繊維長分布のピークは0.8 mmであると報告されている一方で、パルプ繊維の繊維長は、広葉樹由来のもので1-1.5 mm、針葉樹由来のもので3-5 mmであること¹⁰⁾からも、回収繊維が再生紙繊維と同レベルまで変質・損傷している可能性は高いと考えられる。また、繊維長が長いほど繊維間の結合が強くなり、均一な紙シートを作ることが難しいとされている¹⁰⁾。このことから、“トイレットペーパー（パルプ100%）+余剰濃縮汚泥”においては、加温効果が確認できた2種の繊維状物と比べ汚泥内に確保される流路が不十分であり、加温による脱水促進効果に違いが生じたと考えられる。

3.2 加温対象の制限

Fig. 2 に加温対象を制限させた実験結果を示した。“初沈濃縮汚泥のみ加温”と“混合後加温”の脱水ケーキの含水率を比較すると、最大で2.46%（55℃）、最小で0.64%（80℃）の差が生じ、同様に“余剰濃縮汚泥のみ加温”と“混合後加温”の脱水ケーキの含水率を比較すると、最大で2.45%（40℃）、最小で1.62%（80℃）の差が生じた。すなわち、加温する汚泥種にかかわらず、加温対象を制限することで脱水性が抑制された。これは、一方の汚泥を加温後にもう一方の汚泥を混合することによって脱水時のサンプルの温度が低下することに起因し、脱水時のサンプルの温度が水の粘性、ひいては脱水性に影響すると思われる。

また、脱水時に回収した脱水ろ液のVTS量を測定し、脱水前サンプルのVTS量との比率を算出しVTS溶出割合とした。Fig. 3 に加温によるVTS溶出割合

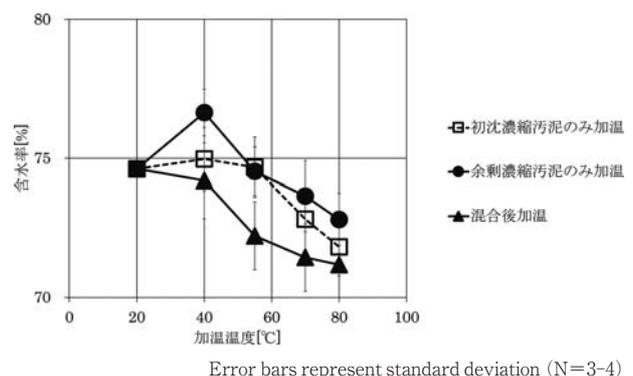


Fig. 2 Results of heating target limitation experiments

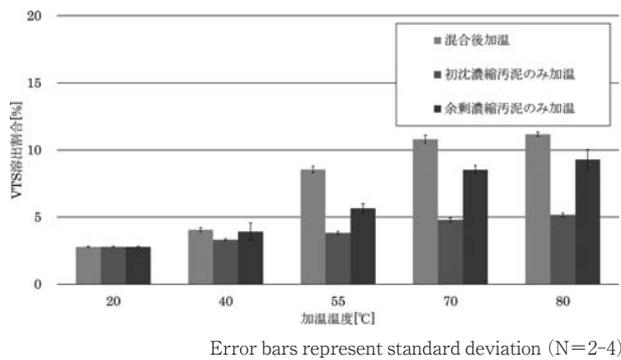


Fig. 3 Results of VTS leaching ratio calculation

の変化を示した。脱水ろ液に溶出した VTS について、すべてのサンプルで加温温度と VTS の溶出割合に正の相関がみられたが、“混合後加温”と比較すると、“初沈濃縮汚泥のみ加温”は平均で 4.37%，“余剰濃縮汚泥のみ加温”は平均で 1.76% 溶出が制限され、脱水性との関連が VTS 溶出割合からも裏付けられた。

4. 結 論

本研究では、加温脱水における繊維状物の影響および加温対象の制限による影響を調査した。繊維状物混合実験では、初沈濃縮汚泥由来の回収繊維やトイレットペーパー（再生紙 100%）を余剰濃縮汚泥に投入し加温脱水を行った場合、加温温度の上昇に伴い脱水ケーキの含水率の低下が確認できた。この結果に繊維状物の脱水助剤としての有効性や水の粘度の温度依存性を考慮すると、下水汚泥の加温による脱水促進のメカニズムとして、初沈濃縮汚泥に含まれる繊維状物が骨格の役割を果たし水の流路を確保し、加温によって粘度が低下した水が通過していると推測された。一方、トイレットペーパー（パルプ 100%）を余剰濃縮汚泥に投入し加温脱水を行った場合、加温温度の上昇に伴う脱水ケーキの含水率の低下は確認できなかったことから、繊維状物による脱水促進には、繊維長が短いこ

とが重要であると考えられた。また、加温対象制限実験では、初沈濃縮汚泥・余剰濃縮汚泥の一方のみを加温後、もう一方と混合し脱水操作を行うと、混合後加温したものと比較して、脱水ケーキの含水率低下が最大で +2.46% に抑制され、VTS のろ液への溶出も抑制され、水の粘性を低下させるため脱水時の温度が重要であると考えられた。

参 考 文 献

- 1) 国土交通省水管理・国土保全局下水道部：脱炭素化/資源・エネルギー利用
https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewage/crd_sewera_ge_tk_000124.html (2024/06/07 閲覧)
- 2) 小林信介, 野村真平, 藤村幸弘, 坪井博和, 木本孝司, 板谷義紀：水熱反応条件が下水汚泥処理残渣性状へ与える影響, 化学工学論文集, Vol. 37, No. 5, pp. 460-467 (2011)
- 3) 諸橋由昭, 山根亮輔, 波岡知昭, 吉川邦夫：水蒸気加熱処理による下水汚泥の脱水性向上に関する研究, 日本機械学会論文集 B 編, Vol. 74, No. 744, pp. 1814-1820 (2008)
- 4) 倭常郎：焼却灰熱を有効利用した加温濃縮脱水システムの開発, TSK 技報, No. 23, pp. 6-13 (2020)
- 5) 荻野果那：汚泥焼却低温廃熱を用いた加温処理による下水汚泥の脱水促進に関する研究, 京都大学大学院工学研究科都市環境工学専攻修士論文 (2020)
- 6) 青葉隆仁：下水汚泥の 80°C 以下での加温による脱水促進に関する研究, 京都大学大学院工学研究科都市環境工学専攻修士論文 (2022)
- 7) 堀之内慎吾：下水汚泥の加温脱水に与える最初沈殿池汚泥の混合比の影響, 京都大学工学部地球工学科環境工学コース卒業論文 (2023)
- 8) 公益社団法人日本下水道協会：下水道試験方法上巻 2012 年度版, pp. 715-739
- 9) 地方共同法人日本下水道事業団：下水汚泥由来繊維利活用システムの技術評価に関する報告書, p. 5 (2016)
- 10) 岡山隆之：リサイクルによる古紙パルプの物性変化について, 紙パ技協誌, Vol. 56, No. 7, pp. 986-992 (2002)
- 11) 栃岡英司：下水由来の繊維状物の脱水助剤利用に関する研究, 東京農工大学大学院工学府応用科学専攻博士学位論文 (2019)