

〈研究発表〉

高温消化における蒸発残留物濃度およびアンモニア性窒素濃度の予測

澤原 大道¹⁾, 日高 平²⁾, 津森 ジュン³⁾¹⁾月島機械(株) 水環境事業本部 新事業推進部 創エネ技術グループ
(〒104-0053 東京都中央区晴海3丁目5番1号 E-mail: h_sawahara@tsk-g.co.jp)²⁾独土木研究所 材料資源研究グループ リサイクルチーム
(〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6 E-mail: hidaka@pwri.go.jp)³⁾独土木研究所 材料資源研究グループ リサイクルチーム
(〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6 E-mail: tsumori@pwri.go.jp)

概要

下水汚泥の高温嫌気性消化処理工程において、消化汚泥中の蒸発残留物(TS)濃度とアンモニア性窒素($\text{NH}_4\text{-N}$)濃度の予測によりアンモニア阻害が発生する可能性のある運転条件の把握を目指した。従前は複数条件の連続式消化実験を行わなければならなかったが、今回報告では回分式消化実験から得た「日毎のTS消費度」「基質分解ポテンシャル」「分解TSあたりの $\text{NH}_4\text{-N}$ 生成量」と新規モデルから作成した計算シートを用いて仮想条件下の $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度を推算し、アンモニア阻害発生予測が可能であることを明らかにした。

キーワード：回分式消化実験, 高温消化, 下水汚泥, アンモニア阻害

1. はじめに

近年、下水汚泥消化設備の高効率化を目指し、現状の分離濃縮(初沈汚泥:重力濃縮, 余剰汚泥:機械濃縮)を超える固形物濃度まで高濃度化させた超高濃度消化や広く採用されている中温消化(35℃程度)より反応速度が速い高温消化(約55℃)の採用などが提案されている。超高濃度消化と高温消化の組み合わせは、消化槽に投入される水量が減少するため、消化タンク必要容量および必要加温熱量の削減に伴う大きなコスト削減や省・創エネルギー化が期待されるが、既往の研究でアンモニア阻害が発生する運転条件の存在が確認されている¹⁾。一方、消化工程においてアンモニア阻害が発生する運転条件を把握するためには、複数の連続式消化実験を同時に実施する必要があり、多大な時間と費用を要する状況であった。そこで、今回、回分式消化試験の結果を用いた連続運転状況の予測²⁾に関する状態モデルを考案し、消化汚泥中の蒸発残留物(TS)濃度およびアンモニア性窒素($\text{NH}_4\text{-N}$)濃度を推算することにより、超高濃度高温消化におけるアンモニア阻害を回避可能な運転条件を簡易に把握する手法を検討したので、その結果を報告する。

2. 検討方法

2.1 回分式消化実験

高温消化を採用しているA浄化センターから消化汚泥、混合生汚泥を採取し、研究室で回分式消化実験を実施した。実験装置をPhoto 1およびFig. 1に示す。採取した混合生汚泥は、所定の前処理(後述)



Photo 1 Picture of batch digestion experiments

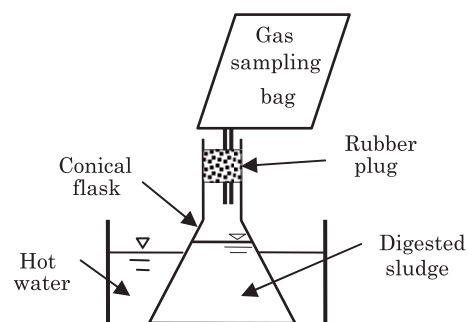


Fig. 1 Experimental apparatus of batch digestion

の実施後に母液（ガス発生を終了した消化汚泥）1 Lが入ったフラスコへ投入し、気相を窒素ガスで置換した後、ゴム栓で密閉した状態でフラスコ内部温度が55~57℃になるように恒温水槽で15日間加温した。採取した消化汚泥は、数回の予備的な同種実験（Table 1の有機物負荷が問題ないことを確認）に使用したものを各フラスコ内で10日間加温して基質を十分に減少させ、全体を混合した後、母液（TS：2.34%，VS/TS：69.55%，ここでVSは強熱減量）として各フラスコへ予め配分した。実験中、一日2回程度のフラスコ振とうにより内部汚泥をかくはんし、ガスバッグでの捕集とシリンジでの吸引により消化ガス発生量を測定した。実験前後の汚泥性状（TS，NH₄-N）分析は下水試験方法に従い、NH₄-Nは0.45 μmろ過後、イオンクロマトグラフィー（サーモサイエンティフィック社製ICS-1500）を用いて定量した。

投入汚泥については、Table 1に示す4条件（フラスコ3本/1条件）を設定し、対照系（No. 1）とテスト系（No. 2~4）の差を各条件の実験結果とした。

Table 1 Feed condition of batch digestion experiments

No.	Feed[L]	TS[%]	VS/TS[%]
1	—	—	—
2	0.341	2.63	88.21
3	0.209	4.16	89.64
4	0.200	4.45	90.94

No. 1は汚泥を投入せず、No. 2は前処理なしの混合生汚泥を投入した。No. 3では、卓上遠心濃縮機を用いて無薬注、2000 G、15 minの条件で遠心濃縮した混合生汚泥を投入した。No. 4では卓上遠心濃縮機を用いて0.65%薬注、2000 G、15 minの条件で遠心脱水した混合生汚泥に加水した汚泥を投入した。

2.2 数値計算

連続式高温消化における消化汚泥 TS 濃度を予測するモデルの概念図を Fig. 2 に示す。0 日目の消化汚泥を母液（生物分解性なし）とし、日毎の投入汚泥を一単位とすると、母液 TS は汚泥投入に伴う押し出しにより日毎に減少する。投入汚泥中の TS は、翌日以降の汚泥投入に伴う押し出しに加え、生物分解により日毎に減少する。生物分解の速度については、回分式消化実験で得られる日毎の消化ガス発生割合（15 日目までの投入汚泥由来消化ガス発生量=100%）を「日毎の TS 消費度」と見なした。投入汚泥 TS のうち投入後 15 日目までに生物分解されるものを「基質分解ポテンシャル」と定義し、生物分解が投入後 15 日まで継続した後は押し出しにより引き続き TS が減少すると想定した。今回検討では汚泥投入開始 150 日後に定常状態に達したと見なし、消化汚泥 TS は母液およびそれまでの投入汚泥に由来する残存 TS の合計とした。消化槽を完全混合槽と想定すると消化汚泥 TS 濃度は次式で表される。

$$C = \frac{1}{H} \left\{ \sum_{n=1}^{15} \left[\frac{C_0 \cdot P \cdot (1 - S_n)}{\left(\frac{H}{1+H}\right)^n} \right] + \sum_{n=1}^{150} \left[\frac{C_0 \cdot (1-P)}{\left(\frac{H}{1+H}\right)^n} \right] \right\}$$

ここで、

- C：消化汚泥 TS 濃度（150 日後）[-]
- C₀：投入汚泥 TS 濃度 [-]
- H：消化日数 [日]
- P：基質分解ポテンシャルの割合 [-]
- S_n：n 日目の TS 消費度 [-]
(S₀=0%, S₁₅=100%)

なお、算出式の右辺大括弧内第一項は基質分解ポテンシャルの減少（押し出し・分解）を、同第二項は生物分解性を有しない TS の減少（押し出し）を意味する。また、実験から得られる「分解 TS あたりの NH₄-N

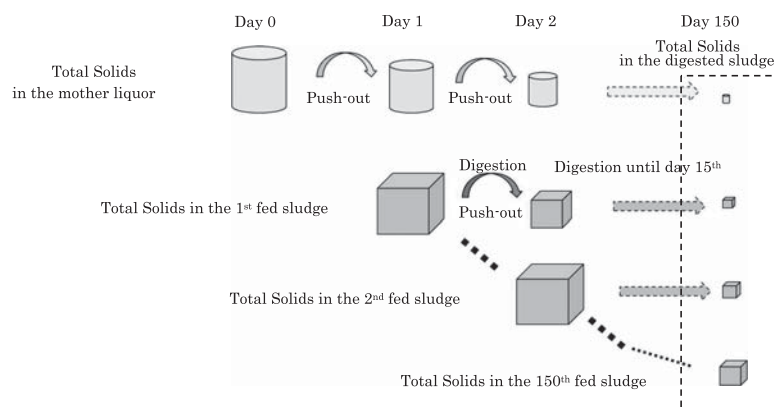


Fig. 2 Total solids balance in the continuous digestion

生成量」と同様のモデルを用いることにより、投入汚泥開始 150 日後の消化汚泥 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度が算出される。この場合は、状態モデルにおいて、TS 分解に伴う $\text{NH}_4\text{-N}$ の生成と汚泥投入に伴う $\text{NH}_4\text{-N}$ の減少（押し出し）を考慮する。

3. 結果および考察

3.1 回分式消化実験

回分式消化実験で得られた日毎の消化ガス発生割合（累積）を Fig. 3 に示す。ここで、No. 2~4 の値は No. 1 で発生した消化ガス量をそれぞれから引いたものである。なお、消化ガス発生量が少ないなどの理由で、数日分のガスを一度に測定した部分についてはガス量を各日に均等配分した。

Fig. 3 に示すように、No. 2~4 には差がないことから、投入汚泥の前処理（遠心濃縮・薬注の有無）は高温消化に影響を与えないといえる。よって、数値計算では No. 2~4 の平均値を TS 消費度とする。

実験開始から 15 日後、消化汚泥中の TS 濃度および $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度を測定し、母液・投入汚泥混合物の TS 濃度および $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度との差から、「基質分解ポテンシャルの割合 68.2%」, 「分解 TS あたりの $\text{NH}_4\text{-N}$ 生成量 69.43 mg- $\text{NH}_4\text{-N/g}$ -分解 TS」の結果が得られた。

3.2 数値計算

上記実験結果より得られた「日毎の TS 消費度」および「基質分解ポテンシャルの割合」を固定値として算出式に代入し、消化日数をパラメータとして、投入汚泥 TS 濃度から消化汚泥 TS 濃度を算出する計算シート（Excel ワークシート）を作成した。

Fig. 4 に、A 浄化センターの運転データと計算結果（運転データの消化日数、投入汚泥 TS 濃度を用いて算出した消化汚泥 TS 濃度）の比較を示す。比較対象の日付は回分式消化実験に用いた混合生汚泥の採取日の前後一ヶ月とし、消化日数は日付当日の汚泥投入量（運転データ）と消化槽容量から算出した。Fig. 4 に示すように消化汚泥 TS 濃度の計算結果は運転データとよく一致しており、唯一、結果が一致しない日付では、特異的、短期的に投入汚泥 TS 濃度が低かったため、計算結果にのみ影響が見られたと考えられる。よって、今回作成の状態モデルは適切であり、回分式消化実験の結果から連続運転状態を予測可能といえる。

次に、同じ計算シートを用いて、消化日数をパラメータとし、仮想条件下の投入汚泥 TS 濃度に対する消化汚泥 TS 濃度を算出した試算結果を Fig. 5 に示す。また、「日毎の TS 消費度」, 「基質分解ポテンシャルの割合」, 「分解 TS あたりの $\text{NH}_4\text{-N}$ 生成量」を固定

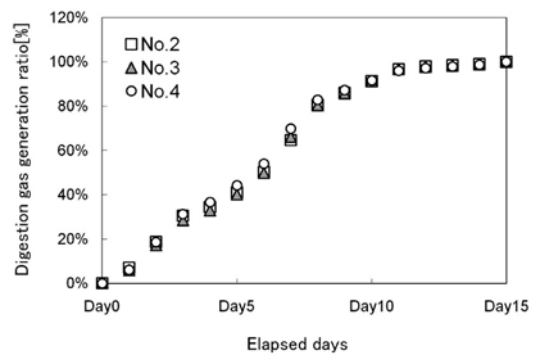


Fig. 3 Result of batch digestion experiments

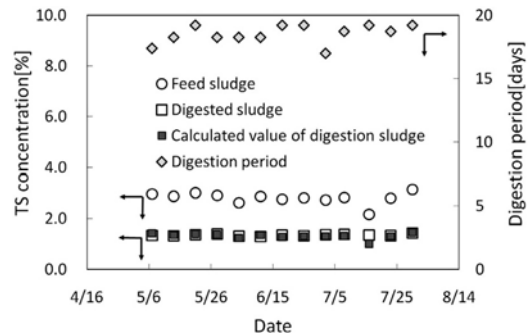


Fig. 4 Comparison of TS Conc. between calculated and operating

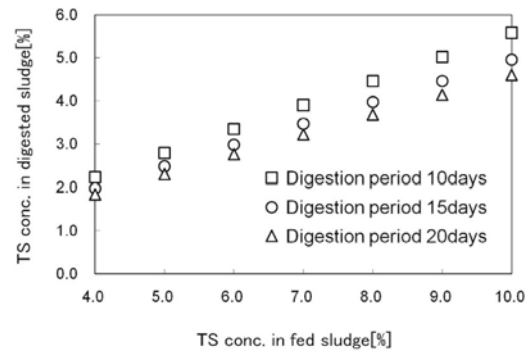


Fig. 5 Calculated TS conc. in continuous-digested sludge

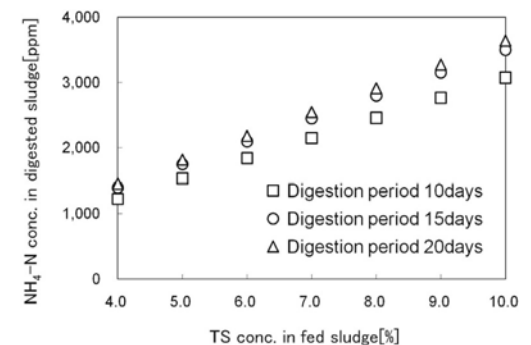


Fig. 6 Calculated $\text{NH}_4\text{-N}$ conc. in continuous-digested sludge

値、消化日数をパラメータとし、投入汚泥 TS 濃度に対する消化汚泥 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度を算出する計算シートを作成した。仮想条件下の投入汚泥 TS 濃度に対する消化汚泥 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度の試算結果を Fig. 6 に示す。

Fig. 5 および Fig. 6 に示すように、消化汚泥 TS 濃

度および消化汚泥 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度は投入汚泥 TS 濃度に比例し、かつ、消化日数の影響を受けることが明らかとなった。高温消化において発酵阻害が発生しない消化汚泥 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度は 2,500 ppm 以下³⁾といわれていることから、**Fig. 6** の結果より、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度 2,500 ppm 以上になる運転条件ではアンモニア阻害発生の可能性があるといえる。具体的には、例えば消化日数 20 日以上かつ投入汚泥 TS 濃度 7% 以上の運転条件が挙げられる。

実際にアンモニア阻害が発生した場合は、消化反応が阻害され、一般には消化汚泥中への有機酸の蓄積や消化率の低下などが見られる。消化率の低下に伴い消化汚泥 TS 濃度が上昇する（実際には TS が減少しない）ため、**Fig. 6** に示す $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度 2,500 ppm 以上となる運転条件でアンモニア阻害が発生した場合、**Fig. 5** に示す消化汚泥 TS 濃度の計算結果と運転データが乖離する（計算結果が運転データを下回る）と推察される。これは、**Fig. 6** に示す消化汚泥 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度についても同様（ $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度の場合は計算結果が運転データを上回る）といえる。よって、今回手法は消化汚泥 TS 濃度の下限値および消化汚泥 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度の上限値を予測するものと認識する必要がある。

4. 結 論

回分式消化実験から「日毎の TS 消費度」「基質分解ポテンシャルの割合」「分解 TS あたりの $\text{NH}_4\text{-N}$ 生成量」が得られた。

連続式消化槽の状態モデルおよび計算シートを作成し、消化汚泥 TS 濃度の計算結果が実設備運転データとよく一致したことから、状態モデルおよび計算シートが適切と確認できた。

計算シートを用いて、仮想条件下の消化汚泥 TS 濃度、消化汚泥 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度を算出し、アンモニア阻害発生が予測される運転条件を簡易に把握できた。

参 考 文 献

- 1) 日高 平, 王 峰, 内田 勉, 戸苅丈仁: 高濃度濃縮下水汚泥と易分解性有機性廃棄物による嫌気性消化の処理特性, 第 50 回下水道研究発表会講演集, pp. 238-240 (2013)
- 2) 高井 充, 怒木 茂: 複合バイオマスメタン発酵に関する研究, 第 43 回下水道研究発表会講演集, pp. 413-415 (2006)
- 3) 野池達也編著: メタン発酵, 技報堂出版, pp. 123-125 (2009)