特集2・有機性廃棄物の可溶化技術とその応用

高速回転ディスクによる余剰汚泥の可溶化

深川 勝之*・今井 剛**・高野 剛彦***

1. はじめに

有機性汚泥の代表的なものに、各種排水処理場から発生する余剰汚泥がある。従来余剰汚泥は、海洋投棄や焼却・埋め立てによって処分されてきたが、当然のことながらこれには多大な費用が必要である。また、海洋投棄の禁止や最終処分場の絶対的不足等により、余剰汚泥の減容化が緊急の課題となっている。したがって、余剰汚泥の新規可溶化処理技術の開発が急がれている。汚泥の可溶化処理法に関しては様々な方法が考案・研究されているが、本研究では物理的分解法の1つである高速回転ディスクによる可溶化について検討を行った。本法は、高速で回転するディスクの間に汚泥を通過させ、その時に生じる①流体の剪断力による破碎、②ディスク同士のすりつぶしによる破碎、及び前処理としての加温を組み合わせることで汚泥を高効率に可溶化させるものである。本研究では主に下水処理場から排出される余剰汚泥及びし尿処理場から排出される余剰汚泥を対象とした。

2. 実験装置および方法

2.1 実験装置

本実験で用いる実験装置の概略を図-1（左図：一過式、右図：回分式）に示す。図-1左の一過式装置については、構造は非常にシンプルで、上部の投入口からサンプルを注入すると2枚のディスク間を遠心力によって通過し、モーターによる高速回転によって汚泥をすりつぶす回転ディスク型の装置である。ディスクの材質はセラミックで、その直径は約200mmである。ディスク上部には汚泥注入のための直径約100mmの開口部があり、外側50mmが通過部分である。ディスク表面は、内側が粗面で外側に向けて次第になめらかになる構造である。回転数は3500rpmに固定されている。ディスク間隔はダイヤルにより自由に設定できるようになっている。本研究では200 μ mに固定して実験を行った。

また、図-1右は本研究で新しく開発した回分式の装置で、ディスクの材質はステンレスである。その直径は約200mm、ディスク上部は汚泥注入のため

図-1 実験装置（一過式：左図、回分式：右図）の概略図

*宇部工業高等専門学校 Masayuki FUKAGAWA

山口大学工学部 Tsuyoshi IMAI *浅野工事（株）Takehiko TAKANO

の直径約30mmの穴があり、外側85mmが通過部分である。なお、ディスク表面は滑面である。ディスク間隔は調節ネジで調整でき、ゲージにより測定が可能である。回分式装置は接触回数を増やすために考案された、一過式の発展型である。その特徴としては、ディスク間隔を数十 μm まで小さくでき、また接触時間が自由に設定可能なことである。

2.2 実験方法

宇部市東部浄化センターより余剰汚泥を採取し、必要に応じて濃縮した（布によるろ過）。一過式の実験装置を用いる場合は、濃縮した汚泥を図-1左の実験装置に繰り返し投入し（以後、ディスクパスと略す）、設定ディスクパス回数ごとにサンプリングを行った。各サンプルについて温度、MLSS、MLVSS、BOD、DOC、TOC、粒度分布を測定した。また図-1右の回分式の装置の場合は、濃縮した汚泥を実験装置に投入して運転し、設定時間ごとにサンプリングを行った。各サンプルについての測定項目は一過式と同様である。

両装置において、様々な実験条件下で実験を行い、余剰汚泥の可溶性に関する効果について検討した。また前処理としての加温による可溶化の促進についても検討した。さらに、回分式高速回転ディスク装置の最適運転条件を把握するために、様々な実験条件を変化させながら実験を行い、その結果から消費エネルギーを考慮しつつ装置の最適運転条件を推定した。

2.3 前加温の方法

採取し濃縮した汚泥を恒温槽内で加温し、設定温度に達してから30分間設定温度で保持した。設定温度は50、70、80 $^{\circ}\text{C}$ の3段階で行った。なお、温度維持の間、槽内の温度を均一に保つために汚泥をマ

グネチックポンプにより循環させたが、その影響を確認するために加温を行わずポンプによる循環のみで30分運転し、粒度分布及びDOCを測定した。その結果、メジアン径は56 μm から49 μm に変化したものの、同時に測定したDOCは41.0 mg/ℓ から43.5 mg/ℓ とほとんど増加しなかったことから、ポンプによる循環により汚泥のフロックが分散させられたものの、可溶化には至らなかったものと考えられる。

3. 実験結果及び考察

3.1 汚泥の種類の違いによる可溶化率の比較

3.1.1 下水汚泥とし尿汚泥を用いたときの回分式と一過式の比較

回分式処理装置で汚泥を処理した場合のDOC濃度の変化を図-2に、一過式処理装置で汚泥を処理した場合のDOC濃度の変化を図-3に示す。

回分式装置の実験条件は、ディスクの回転数が3500rpm、ディスク間隔が100 μm であった。下水汚泥のMLSSは3500 mg/ℓ であり、し尿汚泥のMLSSは14700 mg/ℓ であった。

また、一過式装置の実験条件は、ディスクの回転数が3500rpm、ディスク間隔が200 μm であった。下水汚泥のMLSSは4200 mg/ℓ であり、し尿汚泥のMLSSは14700 mg/ℓ であった。

図から明らかなように、下水汚泥は一過式で50回パスを行っても、回分式のその5分の1程度であった。また、し尿汚泥は一過式で50回パスを行っても、回分式のその半分程度であった。したがって、回分式の方が、より高い効率で擦り潰すことが可能であると考えられる。この理由としては、接触時間が長いことがあげられ、この点では、汚泥の種類によ

図-2 下水汚泥及びし尿汚泥を用いた回分式装置処理結果 (DOC濃度)

図-3 下水汚泥及びし尿汚泥を用いた一過式装置処理結果 (DOC濃度)

る違いはみられない。

下水汚泥とし尿汚泥のDOC濃度の大きさの違いは、MLSSの違いによるものと考えられる。実験条件は同じであったがMLSSが違うため直接比較はできないが、MLSSが大きくなるとDOC濃度は高くなったことから、そのことがいえると考えられる。

回転数の違いを比較するものとしてではなく、MLSSの違いがDOC濃度に及ぼす影響について考察する。この時の実験条件は、ディスクの回転数が5000rpm、ディスク間隔が100 μ mであった。MLSSが9900mg/ ℓ の下水汚泥の場合でDOCの濃度は、20分で910mg/ ℓ 、30分で1300mg/ ℓ であり、し尿汚泥（MLSS：14700mg/ ℓ ）のDOC濃度と比べても2倍ほどの差がみられた。また、図-4の比較からも、同じMLSSにおける最終測定点でのし尿汚泥のDOC濃度は下水汚泥の場合の1/3程度であることがわかる。したがって、下水汚泥の方がし尿汚泥よりも可溶化されやすいことがわかる。

3.1.2 前加温+回分式処理による可溶化（汚泥の種類の違いの影響）

し尿汚泥を処理した場合の実験条件は、ディスクの回転数が5000rpm、ディスク間隔が100 μ mであった。し尿汚泥のMLSSは10000mg/ ℓ であった。前加温の温度が高いほど、初期のDOC濃度が高くなっ

図-4 下水汚泥及びし尿汚泥の前加温後の処理結果（DOC濃度）

たが、20分処理後のDOC濃度にはほとんど差がなかった。すなわち、加温に要するコストを考えると、前加温としては50℃で十分な効果が得られると考えられる。なお粒度分布に関しては、し尿汚泥の場合に実験中に発泡が生じデータにばらつきがみられた。

下水汚泥を処理した場合の実験条件は、し尿汚泥の場合と同様で、下水汚泥のMLSSは10900mg/ ℓ であった。図-4の比較から、し尿汚泥のDOC濃度は下水汚泥のその1/3程度であった。このとき、MLSSはほぼ同じであったことから、下水汚泥の方がし尿汚泥よりも可溶化されやすいことがわかる。また、この理由としては、菌相の違いがあげられる。下水汚泥には原生動物から細菌まで幅広く存在しているのに対し、し尿汚泥には細菌だけが存在していることが知られている。このことは、原生動物の径と細菌の径の違いが、粒度分布の初期のメジアン径の差からもみられることより明らかである。一般に、原生動物の方が可溶化されやすいと考えられるため、DOC濃度は大きくなると考えられる。

3.2 高速回転ディスク装置の最適運転条件の把握

本高速回転ディスク装置の最適運転条件を把握するために、表1に示すように様々な条件を変化させながら実験を行った。実験結果より、消費エネルギーを考慮しつつ本装置の最適運転条件を推定した。

なお、対象とした下水汚泥は宇部市東部浄化センターより採取した余剰汚泥を濃縮した（布によるろ過）ものである。

3.2.1 ディスクの回転数、ディスク間隔及びMLSS濃度が粒度分布に及ぼす影響

処理時間にもなう粒度分布の変化を図-5に示した。図より、粒度分布はディスクの回転数、ディスク間隔及びMLSS濃度によらず、ほぼ同様な変化を示していることがわかる。また、各条件に関わらず初期（1分後）のディスク処理におけるメジアン径の低下が顕著であり、以後は緩やかに減少し20 μ m前後まで低下したことがわかる。したがって、粒径に関しては初期（1分後）のディスク処理の効果が大きいことがわかる。

表1 回分式装置運転条件

	濃度 (mg/ℓ)	処理時間 (min)	ディスク間隔 (μ m)	回転数 (rpm)
変化したパラメータ	2000～20000	20～120	100, 200, 400, 1000, 2000, 3000 5000, 10000, 20000	3500, 4000, 4500, 5000

図-5 粒度分布の一例

図-7 様々な回転数における可溶化率

図-6 前加温と無加温汚泥の可溶化率の比較

図-8 処理時間にもなう可溶化率の変化

3.2.2 前処理としての加温と無加温の比較

図-6に前加温を行った場合の汚泥と無加温の汚泥との可溶化率の比較について示す。この図から前加温の効果による差がみられるのは20分までで、それ以降はほとんど同じ結果となった。そのため前加温は必要ないと考えられる。ただし、前加温を行うことで初期のDOC濃度を高くできるため、処理時間の短縮は可能であるといえる。よって、コストを考慮してどちらを選択するかを決定すべきであると考えられる。

3.2.3 回転数が可溶化率に及ぼす影響

図-7の回転数による可溶化率の違いから、回転数が高いほど可溶化率が高くなることがわかる。5000rpmでは次第に可溶化率は定常に達する傾向がみられ、他の回転数ではさらに処理時間が長くなれば5000rpmの可溶化率に到達するようにみられる。

3.2.4 装置の運転時間が可溶化率に及ぼす影響

図-8の処理時間にもなう可溶化率の変化に關

する結果(5000rpm)からディスク処理45分以降の可溶化率にはほとんど変化がなかったことから、処理時間は回転数が5000rpmについては45分で十分と考えられる。

3.2.5 ディスクの間隔が可溶化率に及ぼす影響

図-9において、間隔の違いによる可溶化率に差はほとんどみられなかった。汚泥に含まれる砂などを考慮するとディスク間隔は大きく設定できる方が好ましい。間隔を大きく設定できれば装置製作時の精度、実際の使用やメンテナンスを行う場合に非常に有利である。そのため、その限界(どの間隔まで可溶化の効果があるのか)を把握するための実験を行い、ディスク間隔が2 cmにおいてはほぼ同じ結果が得られることが確認できた。

3.2.6 MLSS濃度が可溶化率に及ぼす影響

図-10から、実験条件が同じならば濃度が高い方が可溶化率が高いことがわかる。特にディスク間隔が広がった場合にその傾向が顕著となった。

図-9 間隔の違いによる可溶化率の比較

図-10 濃度の違いによる可溶化率の比較

3.2.7 粒度分布と可溶化率の関係

図-5の粒度分布と図-7～10の可溶化率を比較すると、粒度分布については初期のディスク処理が大きな効果を示しているのに対し、可溶化率は時間とともに緩やかに増加している。したがって両者に比例関係があるとはいえない。このことは、初期においてメジアン径が小さくなくても微生物自体の細胞が破碎されているわけではなく、凝集していた微生物同士が分散しただけであると考えられる。

3.2.8 可溶化した汚泥の嫌氣的消化特性に関する検討

可溶化処理後の汚泥を基質として、バイアルを用いた回分実験により嫌気性処理によるメタンガスへの転換率を求め（実験時間約24時間）、その生分解性について検討した。実験結果より溶解性成分のメタンガスへの転換率は約60%、SS込みの（トータル）転換率は約40%であった。この結果より、

すりつぶした後の汚泥のSS分には難分解性の物質が多く含まれていることが示唆された。

3.2.9 可溶化した汚泥の好氣的消化特性に関する検討

標準脱窒素処理施設より採取した硝化槽汚泥に、それぞれディスク未処理（0分）、10分処理後の下水汚泥を加え、好気性消化試験を行い、生物分解による汚泥の減量化を調べた。図-11にTSの経時変化を示す。

結果より、未処理の下水汚泥を加えた場合TS減少が少なかったことがわかる（余剰汚泥TS減量率5.3%）。それに対して、10分ディスク処理後の汚泥を加えたものは未処理汚泥に比べTS減少効果が大きくなった（下水汚泥TS減量率41.4%）。これらのことから、ディスク処理により汚泥が可溶化されたことで、好氣的生分解性が増したと判断できる。

3.2.10 脱窒素速度試験による可溶化汚泥の水素供与体としての効果

回転ディスクによって可溶化した下水汚泥の内、15分処理汚泥について脱窒素速度を測定し、水素供与体としての効果を調べた。実験結果を図-12に示す。

実験結果である脱窒素処理速度恒数より、回転ディスク処理したものをメタノールと比較すると、メタノール1.61 (mg NO₃-N/g-SS・h) に対して、未処理0.23、15分処理したものは1.13となり、15分処理したものはメタノールに比べて70%程度の効果がみられた。また、15分処理したものは1hまでにかなり脱窒していることから、可溶化された溶解性の有機性成分が先に使われたと考えられる。

図-11 好気性消化試験によるTSの変化

図-12 脱窒素速度総計試験結果

3.2.11 消費エネルギーを考慮した最適運転条件の推定

図-13左より、1回の処理(45分)に要する消費エネルギーは、回転数が高いほど安価であることがわかる。ただし、ここで述べる消費エネルギーは生成する可溶化量(DOC) 1 kgあたりに対してである。また、図-13右よりディスクの間隔にはそれほど影響を受けないことがわかる。図-13右の方が処理に要する消費エネルギーが少ないのはMLSS濃度の違いによるものと考えられる。以上のことから、本装置に関する最適運転条件はディスク間隔は任意で(ただし間隔は広い方がメンテナンスを行う際や装置の工作精度等に関して圧倒的に有利である)、回転数は5000rpmであると推定される。

4. ま と め

本研究では、2つの高速回転ディスク装置(一過式及び新しく開発した回分式高速回転ディスク装置)を用いて余剰汚泥(下水汚泥、し尿汚泥)の可溶化に関して実験的な検討を行った。また、その前処理としての加温による可溶化の促進効果について検討した。さらに、新しく開発した回分式高速回転ディスク装置の最適運転条件を把握するために、様々な実験条件を変化させながら実験を行い、それらの結果から消費エネルギーを考慮しつつ本装置の最適運転条件を推定した。

本研究で得られた知見をまとめると以下の通りである。

- (1) 本高速回転ディスク装置を用いて余剰汚泥の可溶化が十分に可能である。
- (2) 新規に開発した回分式高速回転ディスク装置は一過式に比べて極めて高効率に可溶化が行えること

図-13 可溶化に要する消費電力の比較

が確認された。また、ディスク間隔を広く設定でき、メンテナンスを行う際や装置の工作精度等に関して圧倒的に有利であることが明らかとなった。

(3) 下水汚泥とし尿汚泥の可溶化実験の結果から、下水汚泥の方が可溶化が容易であり、それは菌相の違いによるものであると考察された。

(4) 前処理としての加温は特に必要ないと考えられる。ただし、前加温を行うことで初期の可溶化率を高くできるため、処理時間の短縮は可能である。したがって、コストを考慮してどちらを選択するかを決定すべきである。

(5) 可溶化処理後の汚泥の嫌氣的生分解性に関する実験結果から、溶解性成分のメタンガスへの転換率は約60%、SS込みの(トータルの)転換率は約40%であった。したがって、擦り潰し後の汚泥のSS分には難分解性の物質が多く含まれていることが示唆された。

(6) 可溶化処理後の汚泥の好氣的生分解性に関する実験結果から、汚泥が可溶化されたことにより、好氣的生分解性が増したと判断された。

(7) 脱窒素速度試験の結果から可溶化汚泥が水素供与体として十分に有用であることが示された。

(8) 本装置の最適運転条件は推定ディスク間隔は任意で(ただし間隔は広い方がメンテナンスを行う際や装置の工作精度等に関して圧倒的に有利である)、回転数は5000rpmであると推定された。