

公益信託 エスペック地球環境研究・技術基金
平成12年度 助成金研究報告書

循環型社会実現のための
有機性固形廃棄物の可溶化処理システムの開発

平成13年11月

山口大学 工学部 社会建設工学科

助教授 今井 剛

1. はじめに

わが国では廃棄物の処理・処分が量、質ともに重大な環境問題となっている。特に含水率の高い有機性固形廃棄物のリサイクル技術開発は未だ発展途上である。含水率の高い有機性固形廃棄物の再利用技術に関する二つの大きな流れは、RDF、直接ごみ発電等にみられる燃料化技術ならびに減量化・有価物回収を主目的とする生物学的な資源化処理技術である。後者の技術開発については、多くの研究者が取り組みを開始している。この中で最も基本的かつ基幹技術となるものが可溶化技術である。超臨界法、亜臨界法等の高エネルギー分解法や酸・アルカリ・熱処理法、オゾン酸化法等の化学的分解法、高温細菌による生物学的分解法、機械的破碎による物理的分解法等が開発されつつある。しかしながら、高エネルギー分解法や化学的分解法については、いずれの処理法についても相当量のエネルギー消費を伴い、当然処理コストも高くなる。また、生物学的処理法は概して維持管理に高度な熟練を要する。一方、物理的処理法は、シンプルであるがゆえに維持管理が容易で、処理コストも比較的安価である。

以上の背景から、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した。高速回転ディスクは、構造が簡単でメンテナンスが容易かつ低コスト化が期待できる。本法は、高速で回転するディスクの間隙に排水処理にともなって発生する余剰汚泥等の含水率の高い有機性固形廃棄物を通過させ、その時に生じる剪断力による破碎（剪断破碎） すり潰しによる破碎（磨碎） 及びそれに伴って生じる微生物細胞内から溶出した加水分解酵素による低分子化の促進、を組み合わせることで有機性固形廃棄物を高効率に可溶化させることを目的とする。本研究では下水処理場から発生する余剰汚泥及びし尿処理場から発生する余剰汚泥を対象とした。さらにディスク処理の後処理として加温による可溶化促進についても検討した。

2. 実験装置および方法

2.1 実験装置

本研究で用いる実験装置の構造は、図1及び写真1に示すように非常にシンプルで上部から注入された試料（下水処理場から発生する余剰汚泥及びし尿処理場から発生する余剰汚泥）が2枚のディスク間を通過し、円周部から吐出するようになっている。また、必要に応じて循環処理が可能ないように設計されている。ディスクは直径20cmで、注入口は中央上部に直径10cmの口径で設置してあり、外側5cmが通過部分である。材質はセラミッ

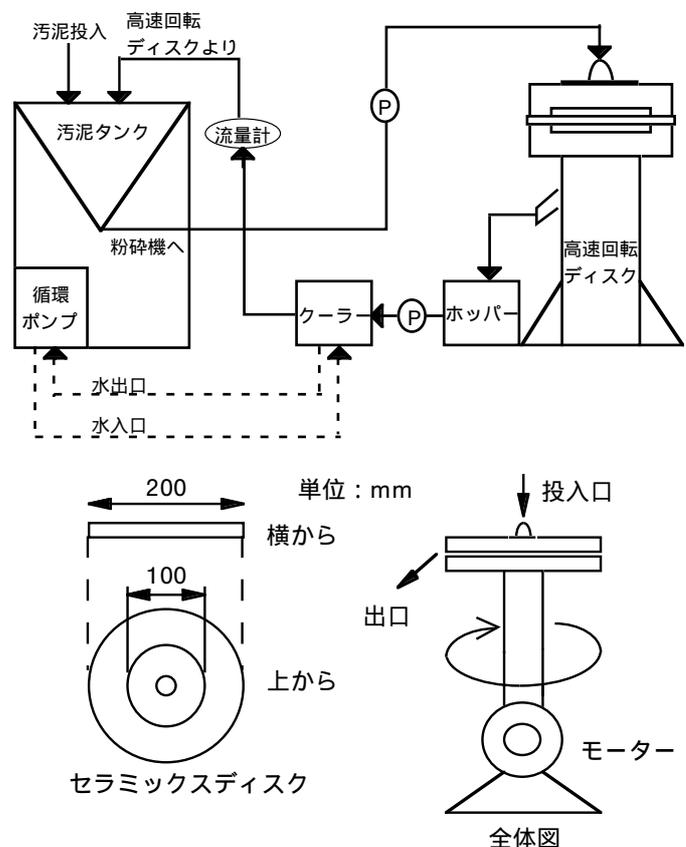


図1 実験装置の概略図



写真1 左：装置全体図、右：高速回転ディスク

ク、ステンレス、ジルコニア製の3種類で、セラミック製のディスクはディスク表面は中央部が粗面で外周方向に向けて次第に滑面となっており、ステンレス及びジルコニア製のディスク面は一様な滑面である。山口県A市の下水処理場及び島根県B市のし尿処理場から採取した余剰汚泥約10gを試料とし、必要に応じて濃縮した。また、ディスク間を通過させると温度が上昇するため必要に応じて冷却できるように設計した。本実験装置のディスク間距離は約200、500 μmの2通りに設定できる。ただしこの装置ではディスク間隔を直接に測定できないので粒度分布の最大粒子径から推定した。また、ディスク回転数は3500rpmである。ディスクの中心に投入された試料は、遠心力によりディスク間を通過し破碎される。ディスク処理時間はごく短時間であるから、投入時間が処理時間を決定する。本実験では一回(10g)につき1分程度であった。

表1 下水処理場からの余剰汚泥を用いた可溶化実験条件

	ディスク材質	MLSS(mg/L)	MLVSS(mg/L)	TOC濃度(mg/L)
Run1	セラミック	4600	3380	1880
Run2	ステンレス	4600	3380	1880
Run3	ステンレス	6620	4720	2420
Run4	ステンレス	6890	4910	2690
Run5	セラミック	7380	5690	-
Run6	ジルコニア	7890	5310	-

表2 し尿処理場からの余剰汚泥を用いた可溶化実験条件

	ディスク材質	MLSS(mg/L)	MLVSS(mg/L)	TOC濃度(mg/L)
Run7	セラミック	8890	8420	3400
Run8	ジルコニア	10440	9290	3500
Run9	セラミック	10000	7870	3630
Run10	ステンレス	8760	8220	3260
Run11	ジルコニア	9760	8280	3720

2.2 実験方法

本研究では、前述のように余剰汚泥は下水処理場及びし尿処理場から発生したものを対象とした。下水処理場からの余剰汚泥には原生動物などの高次生物(細菌に比べて)が含まれており、可溶化しやすい、あるいは可溶化率が高いと予測される。一方、し尿処理場からの余剰汚泥はその構成がほぼ細菌のみであることから、可溶化率は低いと考えられる。下水処理場汚泥の可溶化実験条件を表1に、し尿処理場汚泥の可溶化実験条件を表2に示す。用いた回転ディスクの材質は3種類でセラミック、ステンレス、及びジルコニアである。さらに高速回転ディスクで処理した汚泥を一定時間(ここでは30分)加温することにより、その可溶化に対する影響を把握するための実験を行った。具体的には処理温度を40, 50, 60,

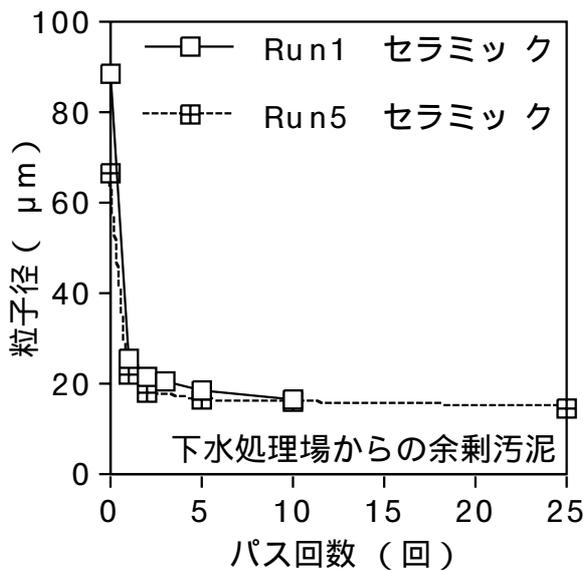


図2 セラミックディスクの場合の粒子径とパス回数の関係

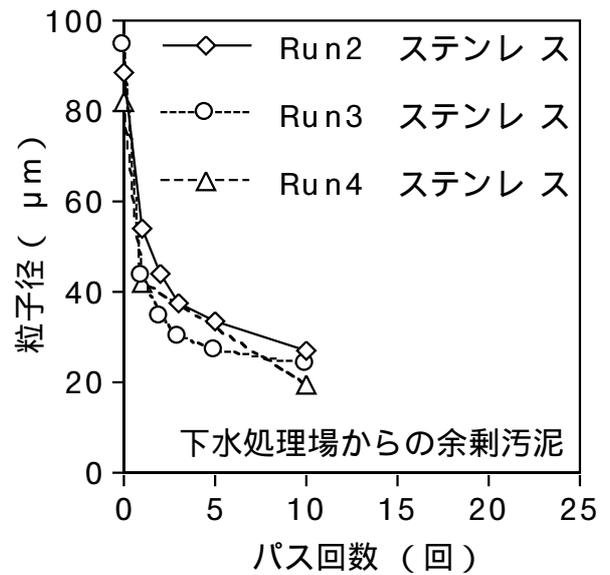


図3 ステンレスディスクの場合の粒子径とパス回数の関係

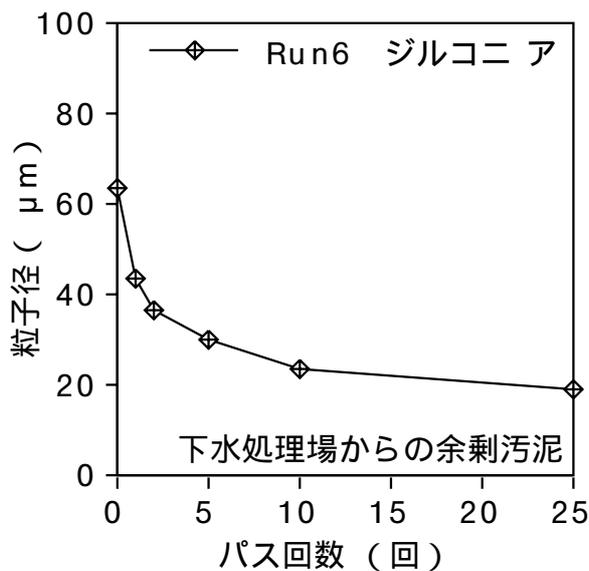


図4 ジルコニアディスクの場合の粒子径とパス回数の関係

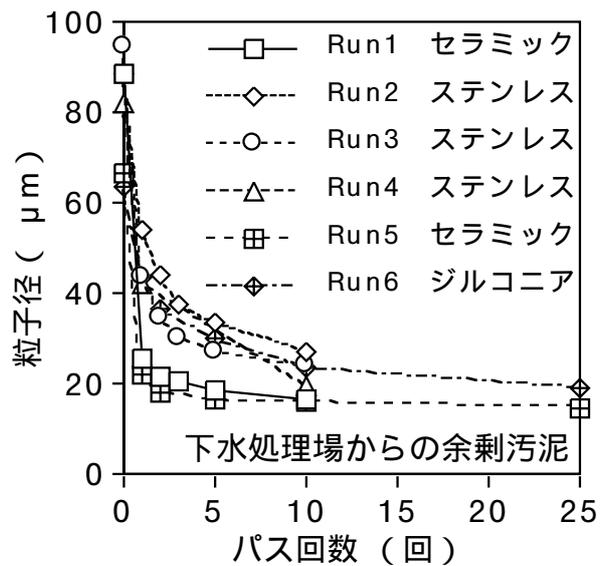


図5 各種ディスクを用いた場合の粒子径とパス回数の関係

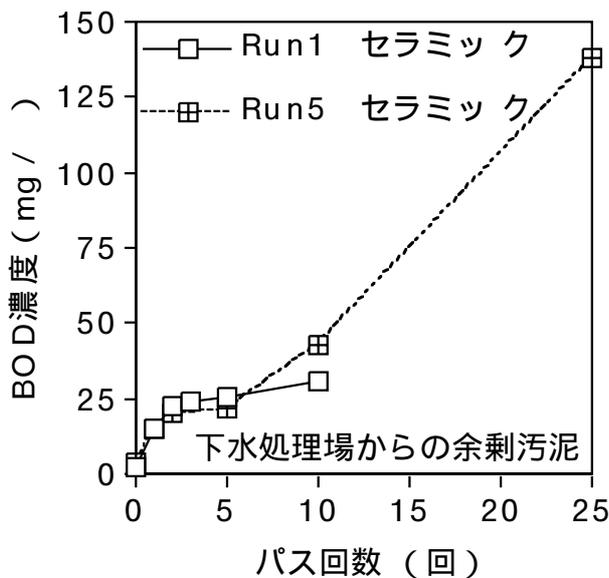


図6 セラミックディスクの場合の BOD₅ 濃度とパス回数の関係

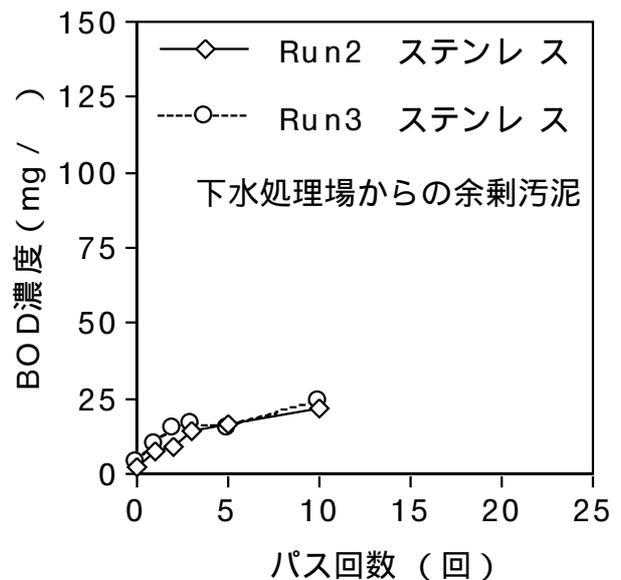


図7 ステンレスディスクの場合の BOD₅ 濃度とパス回数の関係

70, 80 と段階的に変化させた実験(し尿処理汚泥については50, 60, 70, 80)をそれぞれ別個に行った。

分析項目は浮遊物質濃度(MLSS)、揮発性浮遊物質濃度(MLVSS)、生化学的酸素要求量(BOD₅)、全有機炭素量(TOC)、溶解性全有機炭素量(DOC)、粒度分布である。MLSS、MLVSS、BOD₅についてはStandard Methodsにしたがい測定を行った。また、TOC、DOCについては島津製作所製全有機炭素計 TOC-5000により分析を行った。粒度分布は堀場製作所製レーザ回折/散乱式粒度分布測定装置 LA-920にて測定を行った。

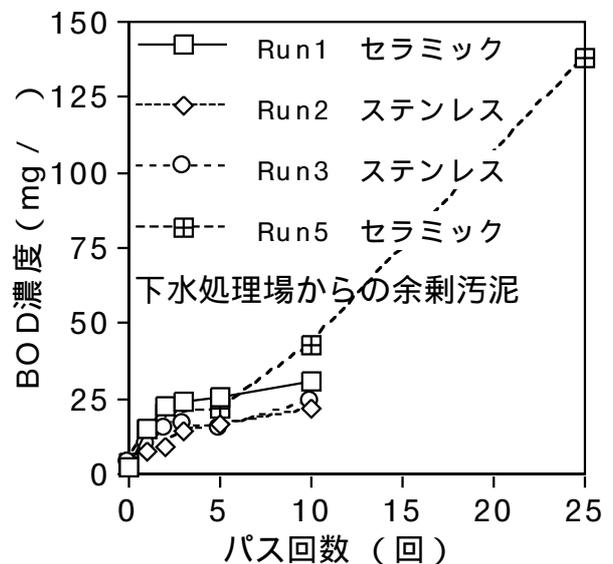


図8 各種ディスクを用いた場合の BOD₅ 濃度とパス回数の関係

3. 実験結果及び考察

3.1 下水処理場から発生する余剰汚泥を対象とした可溶化実験

下水処理場から発生する余剰汚泥を対象とした可溶化実験時(ディスクの材質:セラミック(図2)、ステンレス(図3)、ジルコニア(図4)及びそれらをまとめたもの(図5))のディスクパス回数と粒子径(メジアン径)の関係を示す。図2からディスクの材質がセラミックである場合は、MLSSの濃度が低くても(Run1:4600mg/L)、高くても(Run5:7380mg/L)同様にすりつぶされていたことがわかる。また、すり潰しの効果は初期(第1回目のパス)において顕著であることがわかる。一方、ディスクの材質がステンレス(図3)及びジルコニア(図4)の場合は、図からMLSS濃度にはほとんど影響を受けず(ステンレスの場

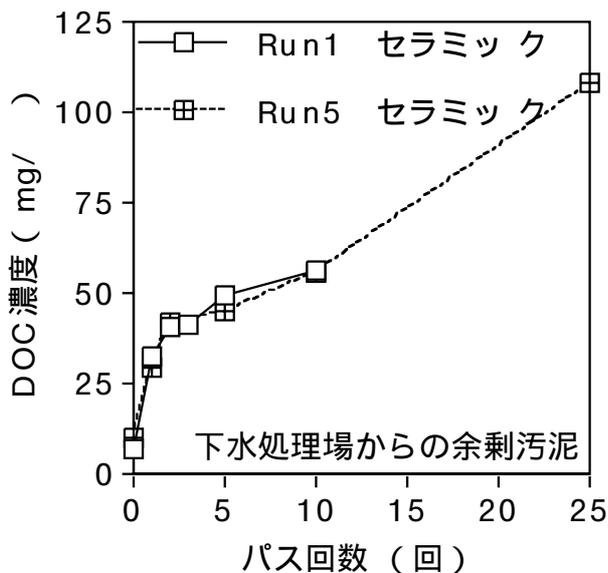


図9 セラミックディスクの場合のDOC濃度とパス回数の関係

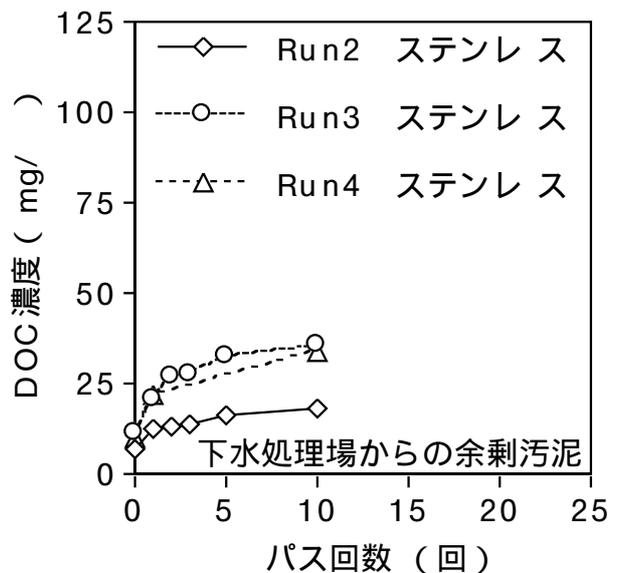


図10 ステンレスディスクの場合のDOC濃度とパス回数の関係

合) 初期におけるすり潰しの効果がセラミックの場合に比べて大幅に小さいことがわかる。しかしながら、ジルコニアについては25回パス後におけるすり潰し効果は、セラミックの場合とほとんど同じであることが結果からわかる。なお、ステンレスの場合はデータが10回パスまでしかないが、ステンレスについてもそのグラフの傾向及びジルコニアと同様な表面形状をしていたことから、25回後のすり潰し効果はジルコニアの結果と同様であると推測される。

同様の汚泥を対象にした可溶化実験時の溶解性BOD₅とディスクパス回数の関係(ディスクの材質:セラミック(図6)、ステンレス(図7)、各材質についてまとめたもの(図8))を示す。

これらの図から、可溶化に関しては、MLSSの濃度が高い方がその割合が高くなることがわかる(図6)。しかしながら、ステンレスのように表面に凸凹が少ない場合は濃度の影響はほとんどなく、可溶化も進行しないことがわかる。したがって、可溶化に関してはMLSS濃度が高く、ディスクの表面形状がある程度粗い方が適していることがわかる。セラミックによる破碎の場合、初期のディスクパスにより原生動物のほとんどが破碎され、一挙にその粒子径(メジアン径)が低下する(図2参照)と考えられる。しかしながら、可溶化が顕著に生じるのはディスクパスが10回~25回の間である(図6)。したがって、破碎された細胞内物質が流出するのに時間を要する、あるいは死滅した原生動物内に存在する自己分解酵素が細胞内物質を可溶化するのに時間を要する、等の理由が考えられる。なお、可

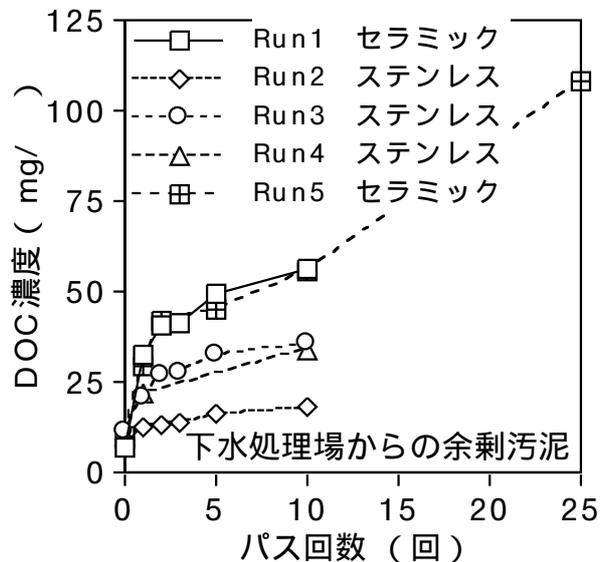


図11 各種ディスクを用いた場合のDOC濃度とパス回数の関係

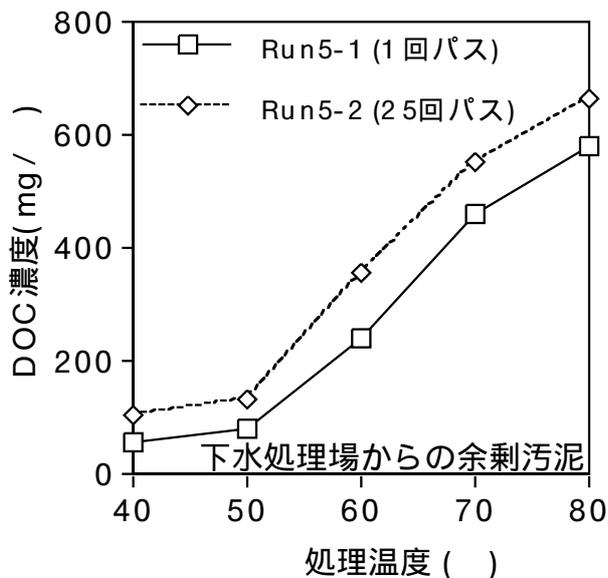


図 1 2 セラミックディスクの場合の処理温度とDOC濃度の関係

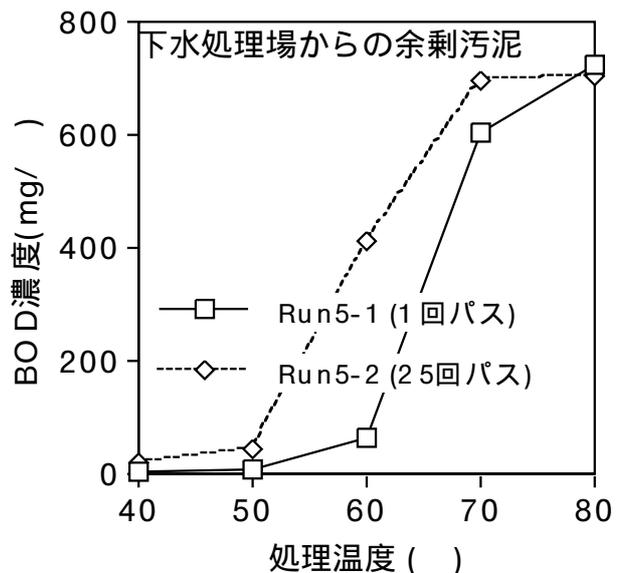


図 1 3 セラミックディスクの場合の処理温度と溶解性BOD₅濃度の関係

溶化した濃度に関してはそのMLSSに対して1桁以上も小さく、さらに可溶化を促進するための手段が必要と考えられる。

同様の汚泥を対象にした可溶化実験時のDOCとディスクパス回数の関係(ディスクの材質:セラミック(図9)、ステンレス(図10)、各材質についてまとめたもの(図11))を示す。図からDOCの濃度はほぼ溶解性BOD₅の濃度と同様な推移を示していることがわかる。ただし、MLSSの濃度には余り影響を受けない(図9)と考えられるが、データが10回パスまでのものしかないため、あくまでも推測である。しかしながら、溶解性BOD₅の結果とほぼ類似していることからおよそ傾向は同じであると考えられる。また、ディスクの材質がステンレスの場合はMLSS濃度が比較的高いとき(Run3:6620mg/L、Run4:6890mg/L)に比べて、低いとき(Run2:4600mg/L)にそのDOC化率が少ないことがわかる。

以上の結果から、ディスク材質がセラミックで(あるいはある程度の粗度を有して)、汚泥のMLSS濃度が高い場合に可溶化が促進されると考えられる。

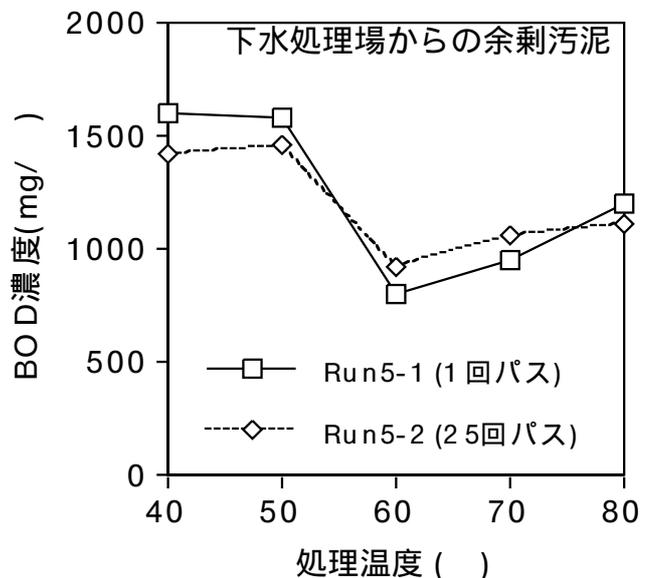


図 1 4 セラミックディスクの場合の処理温度とSS込みのBOD₅濃度の関係

3.2 下水処理場から発生する余剰汚泥を対象としたディスク処理+熱処理

高速回転ディスクで処理した汚泥(Run5:MLSS=7380mg/L、MLVSS=5690mg/L、1回パス:Run5-1、25回パス:Run5-2とする)を一定時間(ここでは30分)加温することに

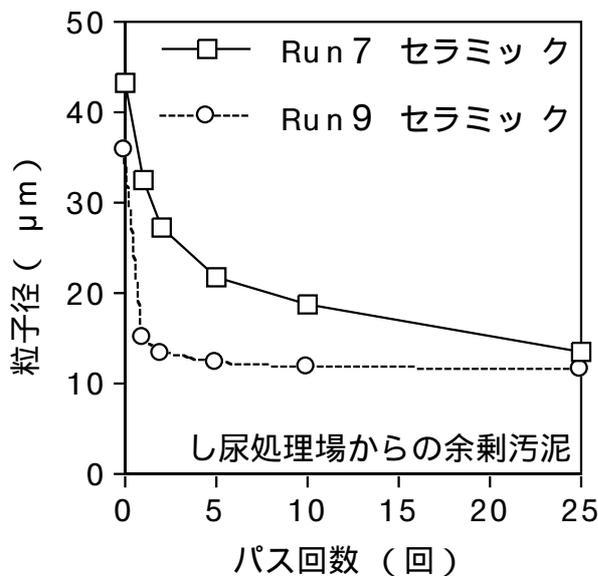


図 15 セラミックディスクの場合の粒子径とパス回数の関係

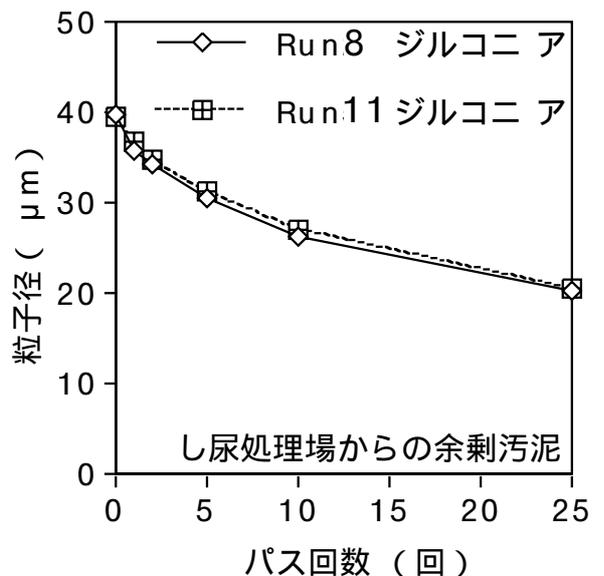


図 16 ジルコニアディスクの場合の粒子径とパス回数の関係

より、その可溶化に対する影響を把握するための実験を行った。具体的には処理温度を 40, 50, 60, 70, 80 と段階的に変化させた場合のそれぞれの溶解性BOD₅、DOC、及びSSを含むTotal-BOD₅を測定した。実験結果を図 1 2 (溶解性BOD₅)、図 1 3(DOC)、及び図 1 4(SSを含むTotal-BOD₅)に示す。図 1 2 から、溶解性BOD₅濃度は 60 以上に加温した場合においてその濃度が顕著に増加していることがわかる。この傾向は図 1 3のDOCについても同様であった。このことから、60 以上で熱による可溶化の促進効果が発現するものと考えられる。一方、図 1 4にSS込みのTotal-BOD₅の結果について示す。この結果から、図 1 2 及び図 1 3の結果とは違い、60 に極小値を持つ曲線になっていることがわかる。MLSSを含む場合にBOD₅を測定する場合には、当然ながら生菌が含まれているため過大にそのBOD₅が評価される恐れがある。また、加温することにより熱分解が進みBOD₅が増加する。すなわち、この結果は50 以下の加温の場合は菌が死滅せずそのBOD₅は過大に評価され、70 以上の場合は熱分解によりそのBOD₅は過大に評価されたものと考えられる。したがって、約60 の場合にMLSS込みのBOD₅を適正に測定できると考えられる。また、この結果から最低60 で30分の加温処理を行うことで生菌を死滅させることができ、さらなる可溶化が達成できる可能性が示されたと考えられる。

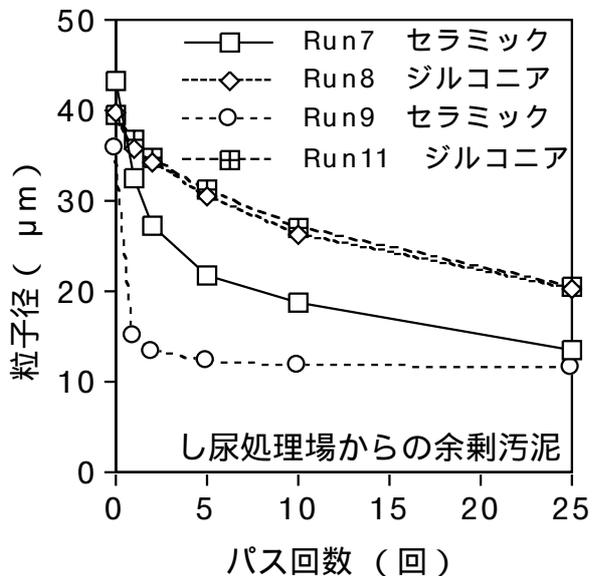


図 17 各種ディスクを用いた場合の粒子径とパス回数の関係

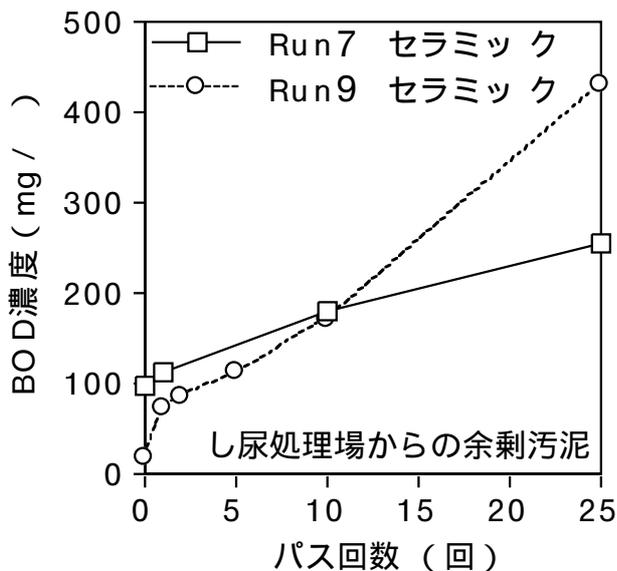


図 18 セラミックディスクの場合の BOD₅ 濃度とパス回数の関係

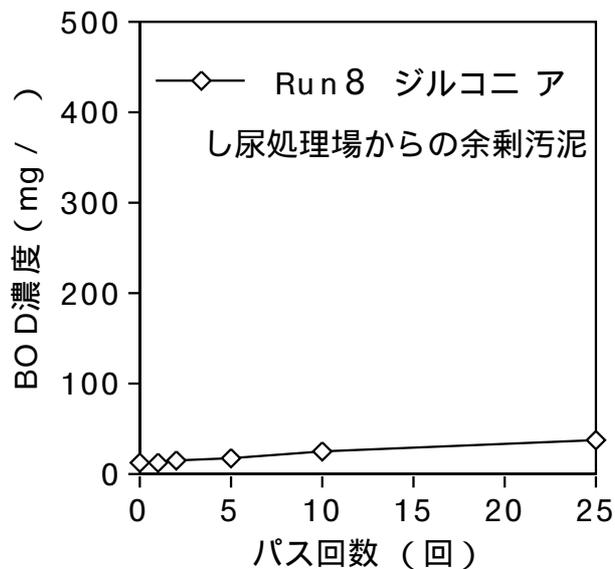


図 19 ジルコニアディスクの場合の BOD₅ 濃度とパス回数の関係

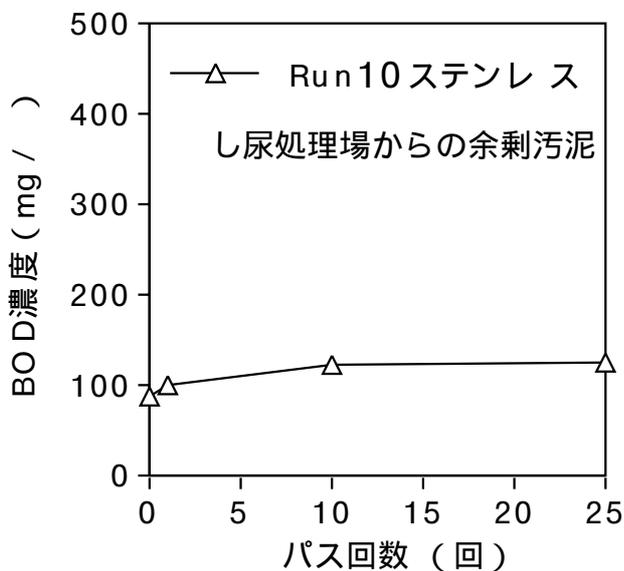


図 20 ステンレスディスクの場合の BOD₅ 濃度とパス回数の関係

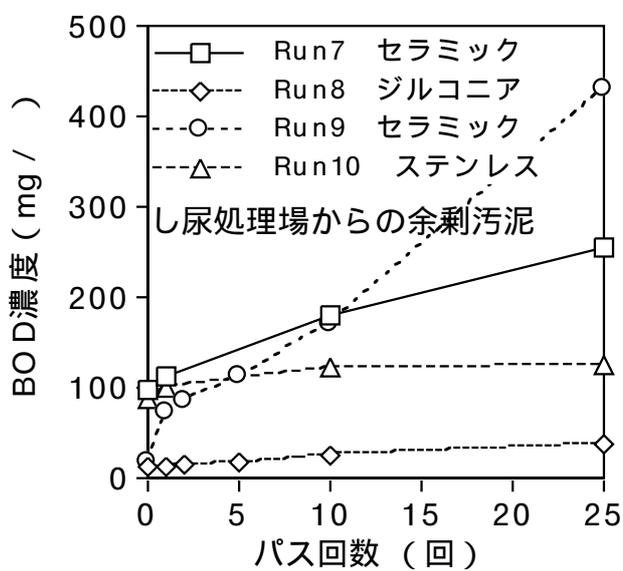


図 21 各種ディスクを用いた場合の BOD₅ 濃度とパス回数の関係

3.3 し尿処理場から発生する余剰汚泥を対象とした可溶化実験

し尿処理場から発生する余剰汚泥を対象とした可溶化実験時(ディスクの材質:セラミック(図15)、ジルコニア(図16)及びそれらをまとめたもの(図17))のディスクパス回数と粒子径(メジアン径)の関係を示す。処理前のし尿汚泥の粒子径は40 μm程度であった。Run7のセラミックディスクでは1回パスで32 μm、25回パスで13 μm程度まで粒子径が減少した。Run9のセラミックディスクは1回パスで15 μmと大幅に減少し、25回パスで11 μm程度まで粒子径が減少した。Run7とRun9の違いはディスク間隔によるものである(Run7:500 μm、Run9:200 μm)。Run8、Run11のジルコニアディスクでは、25回パス後に20 μmまでしか減少しておらず、下水汚泥と同様にし尿汚泥においてもセラミックディスクの方が効果が高いことがわかった。

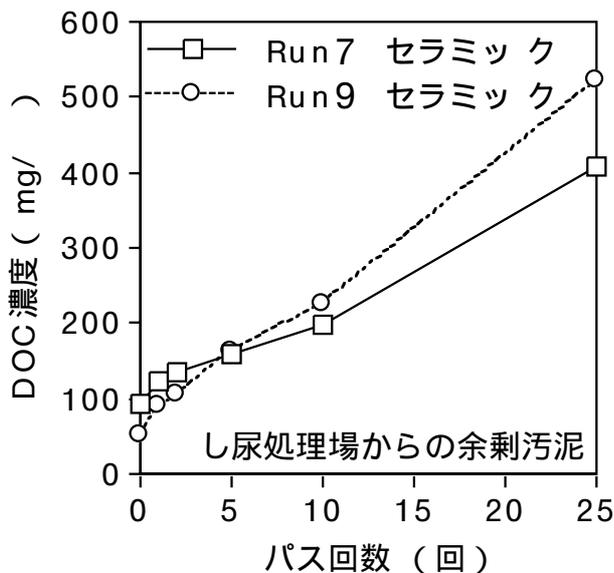


図 2.2 セラミックディスクの場合の DOC 濃度とパス回数の関係

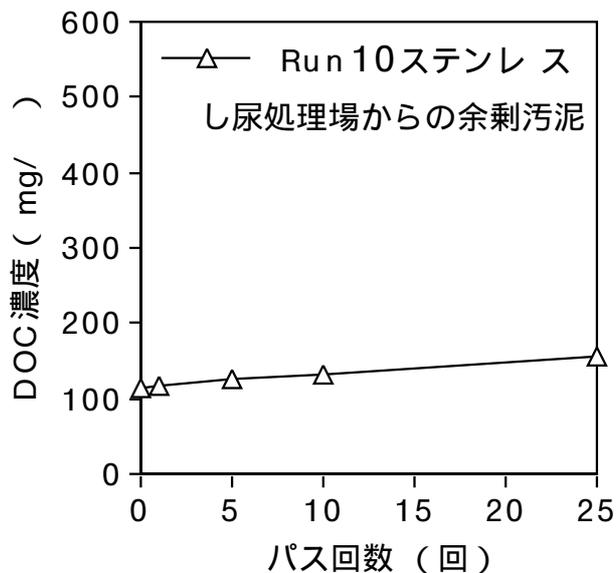


図 2.3 ステンレスディスクの場合の DOC 濃度とパス回数の関係

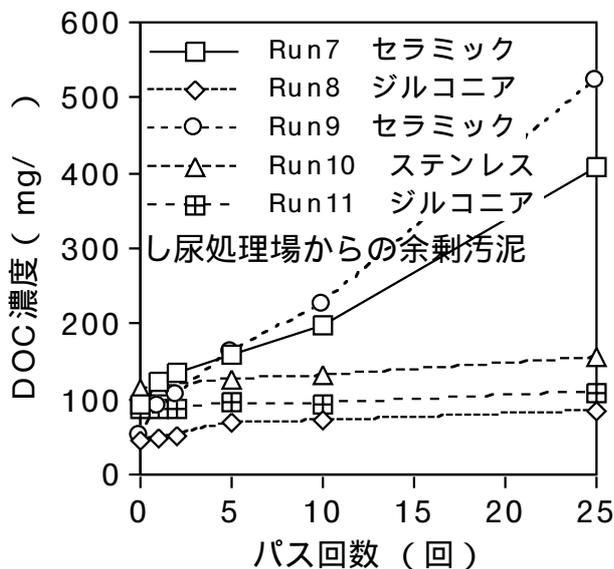


図 2.4 各種ディスクを用いた場合の DOC 濃度とパス回数の関係

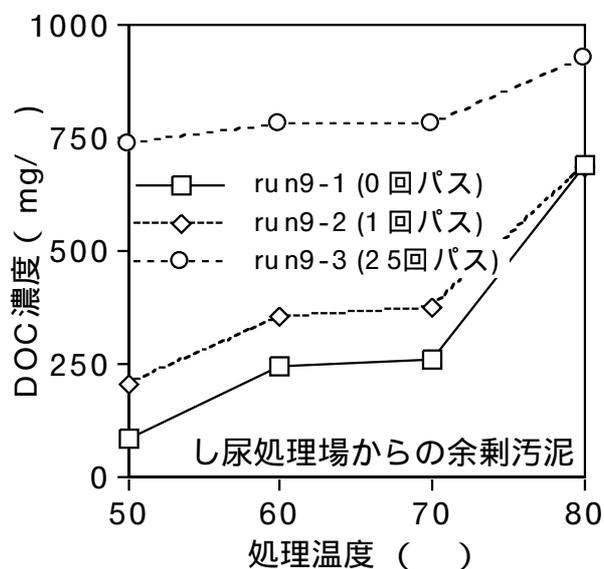


図 2.5 セラミックディスクの場合の 処理温度と溶解性BOD₅濃度の関係

同様の汚泥を対象にした可溶化実験時の溶解性BOD₅とディスクパス回数の関係(ディスクの材質:セラミック(図18)、ジルコニア(図19)、ステンレス(図20)、各材質についてまとめたもの(図21))を示す。これらの図から、溶解性BBOD₅濃度においても同様に、処理前の溶解性BOD₅濃度が高かったRun10を除けば、セラミックディスクによる可溶化の効果の高さが明らかである。また、当初の予想に反して、し尿処理汚泥についても下水処理汚泥と同様に可溶化が進行する結果となった。したがって、本研究で開発した高速回転ディスク装置により細菌が主な構成物であるし尿処理汚泥の可溶化も可能であり、本高速回転ディスク装置は極めて有用性に富むことが明らかとなった。

同様の汚泥を対象にした可溶化実験時の溶解性DOCとディスクパス回数の関係(ディスクの材質:セラミック(図22)、ステンレス(図23)、各材質についてまとめたもの(図

24))を示す。DOC濃度についても、セラミックディスクの効果の高さが顕著であり、他のディスクによる処理ではDOC濃度がほとんど変化していないのに対し、セラミックディスクでは増加し続けている。特にRun9は、ディスク間隔を狭くしたことによる、ディスク間での摩擦熱による温度上昇のため、5回パス以降も、DOC濃度が増加し続けている。Run9では、処理前の汚泥温度、10 から25回パス後には50 程度まで上昇した。

また、以上の結果を比較するとDOC濃度と溶解性BOD₅濃度の変化が同様であることから、日数と手間のかかるBOD₅測定を行わず、DOC濃度を測定することにより、可溶化の程度を簡便に把握することができると考えられる。

3.4 し尿処理場から発生する余剰汚泥を対象としたディスク処理 + 熱処理

高速回転ディスクで処理した汚泥 (Run9:MLSS=10000mg/L, MLVSS=7870mg/L、処理前:Run9-1、1回パス後:Run9-2、25回パス後:Run9-3とする)を一定時間(ここでは30分)加温することにより、その可溶化に対する影響を把握するための実験を行った。具体的には処理温度を50,60,70,80 と段階的に変化させた場合のそれぞれのDOCを測定した。結果を図25(DOC)に示す。図からどのサンプルにおいても加温の設定温度が上昇するにつれてDOC濃度も増加していることがわかる。しかしながら、25回パス後については設定温度の違いによる差が小さく、加温に要するコストを考慮すると、50~60程度で十分であると考えられる。

また、Run9-3の50 での熱処理の結果は、加熱することなく、保温により500mg/ (図22)であったDOC濃度が750mg/ (図25)と大きく上昇していることを示しており良好な結果が得られたといえる。

4. まとめ

本研究では、下水処理場及びし尿処理場から発生する余剰汚泥を対象に、高速で回転するディスクの間隙に汚泥を通過させ、その時に生じる 剪断力による破砕(剪断破砕) すり潰しによる破砕(磨砕) 及びそれにともなって生じる 微生物細胞内から溶出した加水分解酵素による低分子化の促進、を組み合わせることで汚泥を高効率に可溶化させる可能性について実験的に検討した。さらにディスク処理の後処理として加温による可溶化促進についても検討した。

以下に本研究によって得られた結果をまとめる。

- (1) 初期のディスクパスによって破砕されるのは主に原生動物であると考えられる。
- (2) ディスク材質がセラミックで(あるいはある程度の粗度を有して) 汚泥のMLSS濃度が高い場合に可溶化が促進されることが考えられる。
- (3) 約60 で加温する場合にMLSS込みのBOD₅を適正に測定できると考えられる。また、この結果から最低60 で30分の加温処理を行うことで生菌を死滅させることができ、さらなる可溶化が達成できる可能性が示されたと考えられる。
- (4) し尿処理汚泥についても下水処理汚泥と同様に可溶化が進行する結果が得られた。したがって、本研究で開発した高速回転ディスク装置により細菌が主な構成物であるし尿

処理汚泥の可溶化も可能であり、本高速回転ディスク装置は極めて有用性に富むことが明らかとなった。

- (5) 加温処理による可溶化の進行が確認され、その有効性が示された。設定温度は50～60 付近に最適値があるものと推定された。特に生菌を確実に殺菌する必要がある場合は60 に設定する必要があることが示された。

5 . 今後の展開

今後は、さらに高速回転域における可溶化、あるいはディスク間隔を変化させた場合の可溶化について検討を進め、どこに最適な運転条件があるかを設定する必要がある。そのためにはより高速な回転数の設定が可能で数十マイクロン～数センチまでディスク間隔を設定できる新たな装置を設計・制作する必要がある。また、同様に汚泥濃度を変化させた場合についての可溶化に対する検討が必要である。さらに、実用化に当たってはコストと可溶化率を考慮した“最適”設計を行う必要があり、そのために消費電力測定も行う必要がある。