

氏名	やすい ひでなり 安井 英 斉
授与学位	博士 (工学)
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第2項
学位授与年月日	平成10年2月12日
最終学歴	昭和60年3月 東北大学理学部生物学科卒業
学位論文題目	活性汚泥法におけるオゾンを用いた余剰汚泥の減量化に関する研究
論文審査委員	主査 東北大学教授 野池 達也 東北大学教授 須藤 隆一 東北大学教授 大村 達夫

論 文 内 容 要 旨

本研究の背景

活性汚泥法は、水環境の改善に最も貢献した生物学的排水処理技術の一つである。今世紀初頭にイギリスで開発された活性汚泥法は、以後、下水、し尿あるいは有機性汚濁物質を含む産業排水等の処理方法として広く世界に普及した。現在の排水処理設備の多くは活性汚泥法もしくはその変法が採用されている。その効率と経済性の高さは80年を越える歴史と水環境改善の実績が何よりも証明している。

活性汚泥法は卓越した能力を持つ反面、実ほどの処理対象においても共通した弱点を持っている。それは余剰汚泥の生成である。活性汚泥法では、汚水基質の分解代謝に伴って同化した菌体が増殖し、これが余剰汚泥として発生してしまう。そのため、皮肉なことに、活性汚泥法による排水処理設備の普及とともに余剰汚泥の処分という新たな問題点が生み出されるようになった。

本研究の目的

ほとんどの汚泥は最終的に埋め立て処分されており、緑農地還元などのように汚泥が有効利用されている割合はわずかである。しかし、埋め立て処分地の確保は次第に困難になっているため、汚泥の減量化は国内のみならず多くの国で焦眉の課題となっている。

ここで汚泥発生量そのものを低減できる汚水処理技術が開発されれば、汚泥処理に関わる問題点の多くは解決すると考えられる。このような視点から、筆者は余剰汚泥発生量を低減させる活性汚泥法の開発が急務であると考え、1992年から研究をおこなってきた。その目標は実用的な運転レベルで、活性汚泥法の余剰汚泥発生量を極限まで低減できるプロセスを開発することであった。

本研究の結果、活性汚泥法において汚泥のオゾン処理と生物処理を繰り返すことにより、余剰汚泥が全く発生しないプロセスを開発することができた。本論文では、この余剰汚泥が発生しない活性汚泥処理プロセスの実用化に関する開発成果を述べるのものである。

本論文の構成と各章の要旨

本論文は次の7章より構成されている。

第1章「総論」

第1章では本研究の背景と目的について述べた。近年における活性汚泥処理の急速な普及に伴って汚泥発生量が増加し、汚泥処分地確保の困難さが顕在化していることなどから、汚泥減量化技術を開発する必要性を記述した。

第2章「汚泥発生量の低減化技術」

第2章では、従来の汚泥減量化技術について、それらの性能に関する文献を元に評価と検討を加えた。その結果、多種類の汚泥減量化技術があるにも関わらず、完全に余剰汚泥を消滅させる方法は無く、実用化されている汚泥減量化にもさまざまな課題が残されていることを明らかにした。

第3章「余剰汚泥の発生しない活性汚泥処理プロセス」

第3章では、合成排水を用いた連続実験により、余剰汚泥が発生しない活性汚泥処理プロセスを示し、本プロセスの考え方とその最適化について述べた。

本プロセスの基本フローを図1に示す。本プロセスでは、活性汚泥プロセス内の汚泥を一定量引き抜いてオゾン処理をおこない、再び曝気槽へ循環返送しながら汚泥を減量化する。オゾン処理によって汚泥は生物分解可能な有機物に変化し、曝気槽内で生物的に分解される。

オゾン処理汚泥の一部は生物学的に無機化され、同時に同化反応によって新たな菌体が生成する。このため、オゾン処理の段階で完全な汚泥の減量化は達成されない。しかし、オゾン処理部と生物処理部の循環量を多くすれば、オゾン処理汚泥の無機化量が循環量に比例して増え、全体の無機化量を上げることが可能になる。

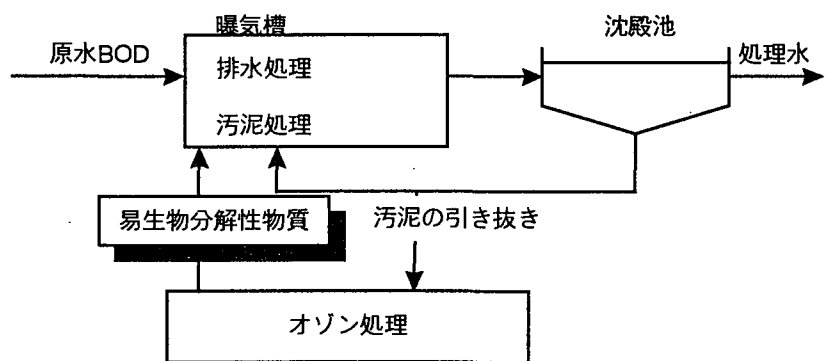


図1 本プロセスの基本フロー

図2のように、曝気槽へ原水BODが負荷されて、原水から汚泥が100 kg/dayの速度で発生する系を例にとると、ここでは次のような処理をおこなうことによって、余剰汚泥の発生を抑えることができる。

- ① 本プロセスでは、オゾン処理汚泥の1/3が曝気槽内で生物学的に無機化され、残りの2/3は活性汚泥に再生成される。
- ② 原水BODから生成する汚泥の3倍に相当する300 kg/dayの汚泥をオゾン処理する。ここでは曝気槽内で処理汚泥が100 kg/dayの速度で生物学的に無機化される。
- ③ この結果、原水BODから生成する汚泥量(100 kg/day)と、オゾン処理汚泥の無機化量(100 kg/day)は曝気槽内で相殺される。このことで曝気槽の汚泥濃度は増加しないため、余剰汚泥の引き抜きが不

要となる。

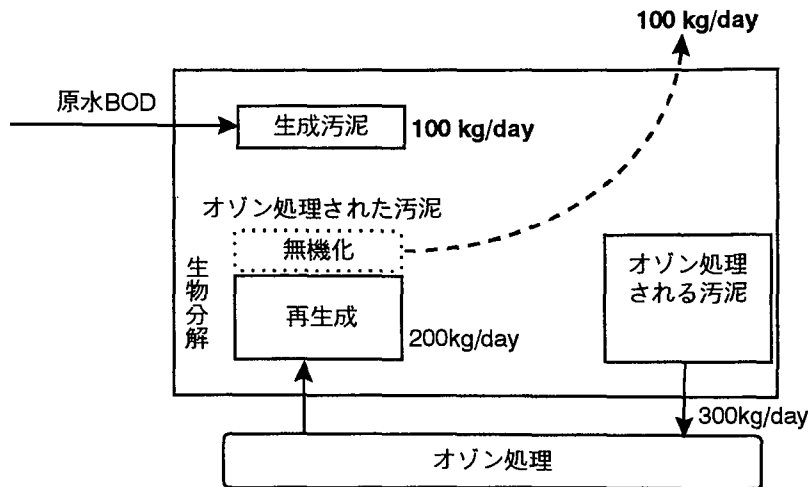


図 2 余剰汚泥が発生しない運転の一例

本プロセスの主要な操作因子は、(1)オゾン処理汚泥の循環量、(2)オゾン処理条件の二つであり、本研究の結果、以下のような知見が得られた。

オゾン処理汚泥の循環量

汚泥の循環量に比例して余剰汚泥は減量化され、減量汚泥量はオゾン処理汚泥の循環量によって調整することが可能であった。

図 3 に対照の活性汚泥処理と本プロセスによる処理をおこなった場合の汚泥発生率を示す。本プロセスの汚泥発生率は循環汚泥量に応じて減少し、循環汚泥量が対照の余剰汚泥発生量の 3 倍であった場合には、汚泥発生率はゼロとなった。

一方、循環量はオゾン処理部への汚泥流量と汚泥濃度との積で与えられることから、時間の逆数の次元を持つ

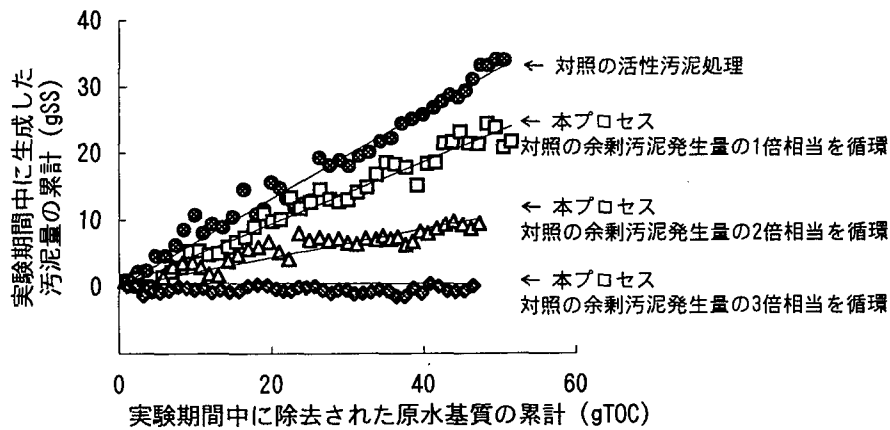


図3 循環汚泥量と汚泥発生率の関係

循環比(曝気槽保有汚泥量に対する一日に処理されるオゾン処理汚泥量の比)が、本プロセスのパラメータとして挙げられた。余剰汚泥を引き抜かない運転では、SRT がみかけは無大となるが、オゾン処理の段階で汚泥中の細菌はほぼ不活性化されるため、細菌の比増殖速度は、実際には循環比により一義的に定まる。すなわち、循環比は従来の汚泥引き抜き率に相当する意味を持つことになる。本プロセスでは減量する汚泥の約 3 倍相当がオゾン処理されるため、細菌の比増殖速度は従来法の約 3 倍に増加することになる。

オゾン処理条件

処理汚泥重量あたりに反応したオゾンの量をオゾン反応率と定義し、オゾン反応率が処理汚泥の生物分解性に与える影響を検討したところ、オゾン処理汚泥が曝気槽内で無機化される割合はオゾン反応率に応じて図4のような挙動を示した。

ここでは、オゾン反応率が低い範囲ではオゾン反応率に比例してオゾン処理汚泥が無機化される割合が向上し、0.05 gO₃/gSS 以上のオゾン反応率では、この値は0.4程度に漸近する結果が得られた。

このことから、本プロセスの効率を考慮した場合には、汚泥の生物分解性がほぼ一定値に達する 0.05 gO₃/gSS のオゾン反応率が最適なオゾン処理条件と考えられた。

一方、オゾン処理時の pH 条件を検討したところ、この最適なオゾン反応率は pH によって異なることがわかった。最適オゾン反応率は pH が低いほど少なくて済み、pH3 の酸性域の処理では pH7 の中性域での場合に対して約 1/3 の値であった。

第4章「オゾンと汚泥の反応」

第4章では、オゾン処理により汚泥の生分解性が向上する原因について検討した。オゾン処理前後の汚泥の形態観察と糖成分の分析により、細菌の構造を保っている細胞壁や粘質物中の糖成分の一部がオゾンにより分解されていることがわかった。またオゾン処理汚泥では菌体の強度が低下し、非生物的な雰囲気でも徐々に汚泥の可溶化が進んだ。一方、汚泥内部の成分である蛋白はオゾンによってあまり変化しておらず、通常のオゾン処理条件ではオゾンは汚泥表面の成分に対して主に反応すると考えられた。

これらの結果から、本プロセスによって汚泥が減量するのは、まずオゾンによって汚泥の糖成分が選択的に分解され、これらの成分が生分解されやすい物質に転換し、次に生物反応によって、オゾン処理汚泥が可溶化することで汚泥の構成成分が生物的に分解される二つの段階を経るものと考えられた。

第5章「汚泥減量効果の持続性」

第5章では、汚泥減量効果に影響を及ぼす因子として、無機 SS 成分と菌体 VSS 成分の蓄積および分解の度合いについて調べるとともに、蓄積成分を求めるための試験方法を検討した。ここでは医薬製造排水の処理を例として取り上げ、現場パイロット試験および汚泥を好氣的消化処理して蓄積性 SS 成分を濃縮した試験の結果についてそれぞれ述べた。

これらの試験によって、菌体由来する VSS 成分は完全に分解され曝気槽に蓄積しないことが確認された。従って、本プロセスを適用する際に生物分解性が問題とされる VSS 成分は、菌体以外の原水中に含まれる物

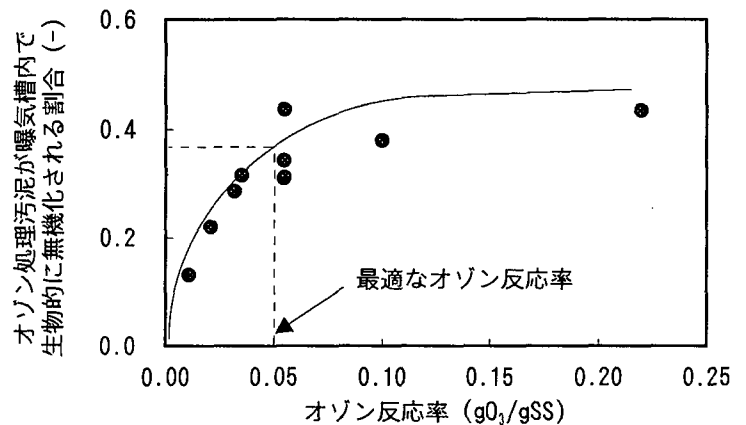


図4 オゾン反応率が処理汚泥の生物分解性に与える影響

質が対象となることが明らかにされた。

無機 SS 成分に関しては、汚泥に最も蓄積されていた物質は土砂分に由来するような酸不溶物であった。しかし、無機 SS 成分の収支を求めたところ、酸不溶物をはじめとする無機 SS 成分は、一度汚泥に取り込まれても約70%が溶解性として再び処理水へ流出することがわかった。従って原水の無機SS成分の組成を分析しても、汚泥への蓄積性を一概に判断できないことがわかった。

第6章 「各種産業排水処理への適用」

第6章では、各種産業排水を用いた連続実験結果を述べ、実排水への適用結果をまとめた。ここでは、試験した全ての排水で余剰汚泥の発生しない運転が可能であることを示すとともに、汚泥の減量効果が長期的に渡ることを実規模の装置によって明らかにした。

本プロセスの運転費用は、従来の汚泥脱水処理-場外廃棄の方法に対して 50%以下であり、本プロセスは運転費用の面でも充分実用的であることが確かめられた。

一方、本プロセスを適用した際の処理水質は、SSやBODは対照の活性汚泥処理法と大きな差はないものの、ほとんどの場合で溶解性の TOC 濃度は若干高くなる結果が得られた。この TOC 成分が生成する因子として、(1) 比増殖速度が高い運転によって原水中の難分解性成分が除去されにくくなっていること、(2)汚泥の生物分解により難分解性成分が生成すること、の二点が考えられた。

第7章 「総括および結論」

第7章では、本研究を通して得られた成果について総括し、将来の研究方向を示した。

審査結果の要旨

活性汚泥処理プロセスから発生する余剰汚泥の減量化は、最終処分地確保の困難さが国の内外で顕在化している今日において焦眉の課題であり、汚泥発生量の少ない生物学的排水処理装置の開発が急務とされている。本論文は、活性汚泥処理プロセスにオゾン処理を導入することにより、余剰汚泥の全く発生しない排水処理プロセスの技術開発を行ったもので、全編7章からなる。

第1章は総論であり、本研究の背景および目的について述べている。

第2章では、従来の汚泥減量化技術の性能に関して文献に基づく評価を行い、多くの減量化技術が検討されてきているにも関わらず、完全に余剰汚泥を低減させる方法はまだ開発されておらず、また、すでに実用化されている汚泥減量化技術にも様々な課題が残されていることを明かにしている。

第3章では、活性汚泥処理プロセス内の汚泥を一定量引き抜いてオゾン処理を行い、再び曝気槽へ循環返送しながら汚泥を減量化する余剰汚泥の発生しない活性汚泥処理プロセスを、合成排水を用いた連続実験により新たに開発した。減量汚泥量はオゾン処理汚泥の循環量によって調整が可能であり、循環汚泥量が対照の余剰汚泥発生量の3倍であった場合には汚泥発生率はゼロとなった。さらに、本プロセスの主要な操作因子としての循環比（曝気槽保有汚泥量に対する1日に処理されるオゾン処理汚泥量の比）およびオゾン反応率（処理汚泥単位重量当りに反応するオゾンの重量）を用いて最適処理条件を提示している。これらは独創的な研究成果である。

第4章では、オゾン処理による汚泥の生分解性向上の機構に関する回分実験を行い、オゾン処理前後の汚泥成分の変化について検討し、オゾンは汚泥の生分解における律速段階である菌体表面に存在する糖成分を選択的に分解し、その結果菌体の可溶化が促進され、オゾン処理汚泥は最終的に活性汚泥微生物によって分解されるという新しい知見を得ている。

第5章では、汚泥減量効果に影響を及ぼす因子として、無機性浮遊物質（無機性SS）成分および菌体強熱減量（VSS）成分の蓄積および分解の度合いについて検討すると共に、蓄積成分を測定するための試験方法を提示し、菌体由来のVSS成分は完全に分解され曝気槽に蓄積しないこと、また、無機性SS成分としては汚泥に最も多く蓄積される物質は土砂に由来する酸不溶性物質であるが、一度汚泥に取り込まれても約70%がオゾン処理によって可溶化して再び処理中に流出することを明かにしている。

第6章では、実規模装置を用いて各種産業排水への適用について検討し、試験した全ての産業排水に対して余剰汚泥の発生しない活性汚泥処理プロセスの運転が可能であることを示すと共に、汚泥の減量効果が長期にわたることを明かにした。また、本プロセスの運転費用は、従来の汚泥脱水処理、場外搬出による活性汚泥処理プロセスに対して50%以下であり、処理水質はSSやBODについては対照の活性汚泥法と殆ど変わらない有用な結果を得ている。

第7章は結論である。

以上要するに本論文は、活性汚泥処理プロセスにオゾン処理を導入し余剰汚泥の発生しない新しい排水処理法の技術開発を行うと共に運転条件を確立したもので、環境工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって本論文は、博士（工学）の学位論文として合格と認める。