

浄化槽から発生した汚泥を、細菌法を用いて ゼロに削減する活動

●Fukunobu Ohsaka

(原稿受理 2005 年 1 月 6 日)

本論文では、浄化槽から発生した汚泥をゼロに削減する活動について述べる。汚泥排出をゼロに削減する可能性のあるいくつかの方法を調査し、機能強化細菌を用いた方法が費用対効果の観点から最善と判断した。次いでこの方法を、富士通の那須工場にある浄化槽に暫定的に適用した。この試験において、汚泥排出は合理的な費用でゼロに削減された。試験後、この方法は富士通グループの 15 の工場で定期的に使用されており、合計約 $1,500 \text{ m}^3$ の汚泥がこれらの細菌によって分解された。その結果、環境負荷は大幅に減少し、この活動がグループ内のゼロエミッションの達成に大きく貢献した。

1. 緒言

不用化学品、プラスチックおよび紙などの事業系廃棄物に加え、浄化槽から発生した汚泥などの生体起源廃棄物も大きな環境負荷をかけている。この事実に基づき、富士通は事業系廃棄物だけでなく、生体起源廃棄物も、2001 年に開始された富士通環境プログラム（ステージ III）のゼロエミッションの目的廃棄物にすることを決めている。このプログラムでは、「ゼロエミッション」は社外への廃棄物処分がゼロであることと定義されている。

2000 年に、富士通グループから発生した約 $2,400 \text{ m}^3$ の汚泥が処分されたが、その汚泥に効果的な対策は講じられなかった。したがって、ゼロエミッションを実現するにはこの問題に取り組む必要がある。

しかし、当時汚泥をゼロに削減するための実用的な方法はほとんどなく、汚泥ゼロエミッションを達成するのに使用可能な、費用対効果の高い有望な方法を見出すことが重要な課題となつた。

本論文では、我々が汚泥ゼロエミッションを達成するのに最も費用対効果が高いと判断した細菌法について述べ、その方法を富士通グループの工場に適用することによってその実用性をどのように実証したのかを述べる。

本論文の構成は、以下の通りである。第 2 節では、なぜ汚泥を必ず浄化槽の外に排出しなけ

ればならないかを述べる。第3節では、費用対効果の観点から最善と判断された細菌法を含め、余剰汚泥をゼロに削減できるさまざまな方法を比較する。第4節では、富士通の那須工場にある浄化槽で、この方法を初めて成功裏に適用したことについて述べる。第5節では、この方法を適用した結果および今後の課題についてまとめる。

2. なぜ浄化槽は余剰汚泥を発生させるのか

2.1 浄化槽の機能

図1は、一般的な浄化槽での有機性排水処理の概略フロー図を示している。

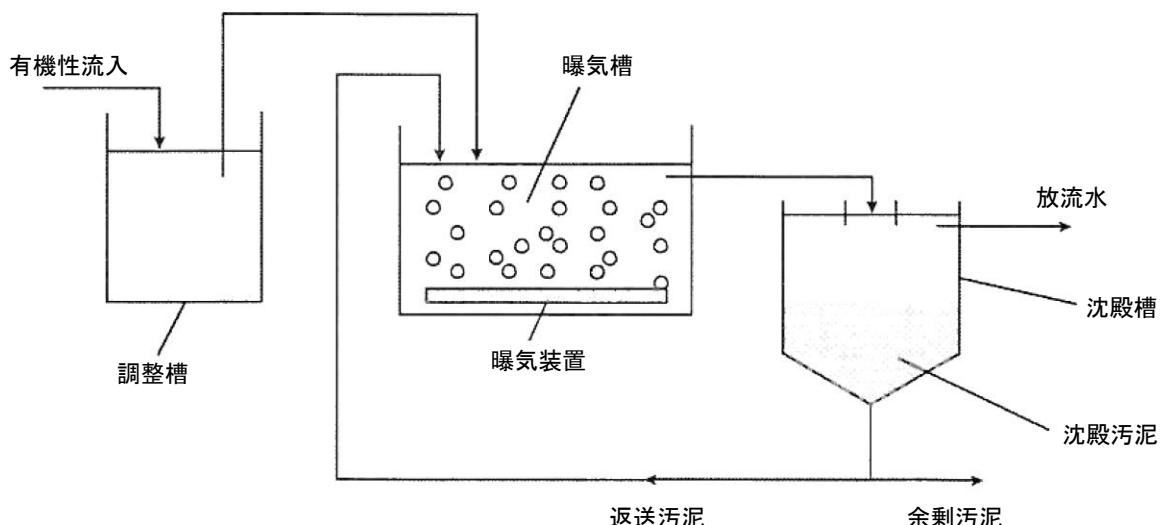


図1
一般的な浄化槽での有機性排水処理フロー。

フローは以下の段階に分割されている。

- 1) 有機性排水は調整槽を経由して曝気槽へ流れ、外気が曝気槽内の排水に継続的に供給される。浄化槽付近の土壌中に生息しているさまざまな種類の好気性細菌（以後、土着細菌と呼ぶ）が排水に生息し、分泌酵素によって有機物を消化する。土着細菌の数が増えるにつれて、細菌を食べる原虫の数も増える。このため、食物連鎖が形成され、フロックと呼ばれる構造に生息する生物学的集団が曝気槽内で成長する。
図2および図3は、それぞれフロックの顕微鏡画像およびフロックの概略構造を示している。懸濁有機固体がフロックの表面に付着している。フロックの集合は活性汚泥と呼ばれ、一度形成されると、有機性流入量に応じた度合いで常に曝気槽内に存在する。

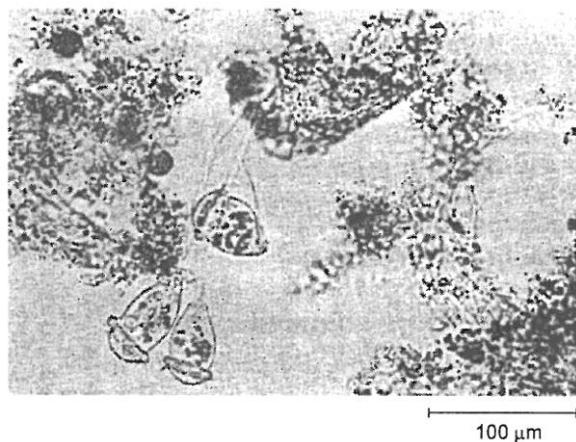


図 2
曝気槽内のフロックの顕微鏡画像。

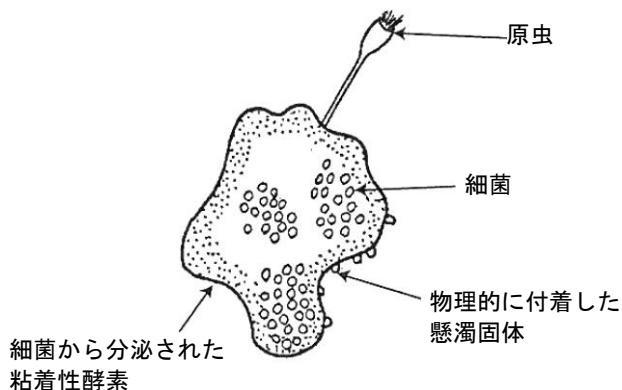


図 3
フロックの構造。

- 2) 活性汚泥を含有する排水は、曝気槽内に数時間から数十時間滞留した後、沈殿槽に流れる。沈殿槽に 2~3 時間滞留した後、活性汚泥は沈殿槽の下部に沈む。このプロセスで、沈殿槽内の沈殿汚泥の量が増加し、槽の上部に浄水が残る。浄水はその後河川に排水される。
- 3) 新たに沈殿した汚泥の一部は曝気槽に戻り、残りは浄化槽から排出され処分される。手短に言うと、3 つの主要な運転は、排水中の有機物を食べる土着細菌を用いて有機性排水を浄化し、浄化水を河川に排水し、余剰汚泥を処分することである。

2.2 なぜ余剰汚泥が発生するのか

新たに沈殿した汚泥の全量が曝気槽に戻った場合、余剰汚泥は発生しない。これは、曝気槽内で成長しているすべての土着細菌が有機物の消化に用いられることを意味する。しかし、新たに沈殿した汚泥の 100%が曝気槽に戻ると、活性汚泥浮遊物（MLSS）と呼ばれる排水の単位容積当たりの活性汚泥の質量が、下記の理由のために曝気槽内で必然的に増加する。

図 4 は、活性汚泥中に生息する細菌の細胞構造を示している。最外部の細胞壁は、固い構造を有する層を含んでおり、細胞を外部からの機械的な力から保護し、敵からの攻撃を防いでいる。細胞壁の内部には、細胞膜と細胞質がある。新たに沈殿した汚泥の 100%が曝気槽に戻ると、槽を流れる有機物の量に対して土着細菌が多過ぎることになり、一部の細菌が餓死する。細胞壁は、生息する土着細菌によってほとんど消化されない固い層を含んでいるため、死んだ細菌が曝気槽内に蓄積し、MLSS の増加を引き起こす。

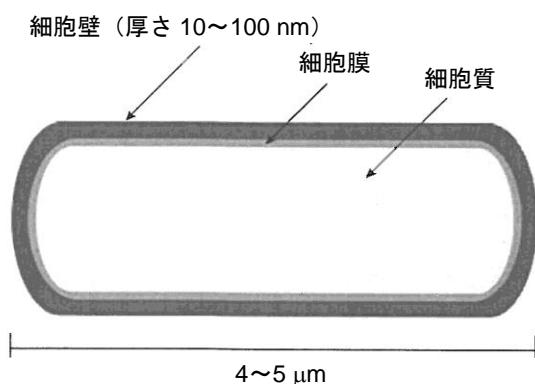


図 4
活性汚泥中に生息する細菌の細胞構造。

この状況が続くと、以下のことが起こる。第 1 に、沈殿槽内の沈殿汚泥の量が、汚泥の一部が放流に持ち越されるまで徐々に増加し、処理水の純度の低下を引き起こす。第 2 に、曝気槽内の微生物の数が過剰になるため、槽内で酸素欠乏が起こり、有機物が効果的に消化されなくなる。この問題を避けるには、沈殿汚泥の一部を浄化槽の外に排出し、曝気槽内の MLSS の増加を抑制しなければならない。これが、槽内の余剰汚泥を必ず排出しなければならない理由である。

3. 潜在的汚泥ゼロ法の比較

余剰汚泥の発生を防ぐには、土着細菌によってほとんど分解されない細胞壁を、分解可能な物質に変える必要がある。我々は、このような能力があると考えられるさまざまな方法を調査し、比較した（表1）。

表1
余剰汚泥をゼロに削減する技術の比較。

技術の名称	組織名	技術の概要	評価
オゾン酸化法	栗田工業株式会社	オゾン酸化を用いて土着細菌の細胞壁を破壊し、汚泥を生分解可能にする。	余剰汚泥をゼロに削減するが、処理水の品質が低下する。 装置が高価である。
好熱性細菌法	(株)神鋼環境ソリューション	好熱性細菌を用いて土着細菌の細胞壁を分解可能にする。	余剰汚泥をゼロに削減するが、分解が困難な物質が生成される。
高温・高圧水法	宇部工業高等学校	亜臨界条件下で水を用いて土着細菌の細胞壁を加水分解し、それらを生分解可能な物質に変える。	余剰汚泥をゼロに削減する。 装置が高価である。 運転費用の増加を抑制するには、いくつかの技術的問題がある。
機能強化細菌法	大和商事株式会社	強化された分解機能を持つある種の細菌を用いて、土着細菌の細胞壁を分解可能にする。	余剰汚泥をゼロに削減する。 施設の改造は必要ない。 運転費用が合理的である。

この表の最初の3つの方法は、図5に示す汚泥処理装置を利用する。

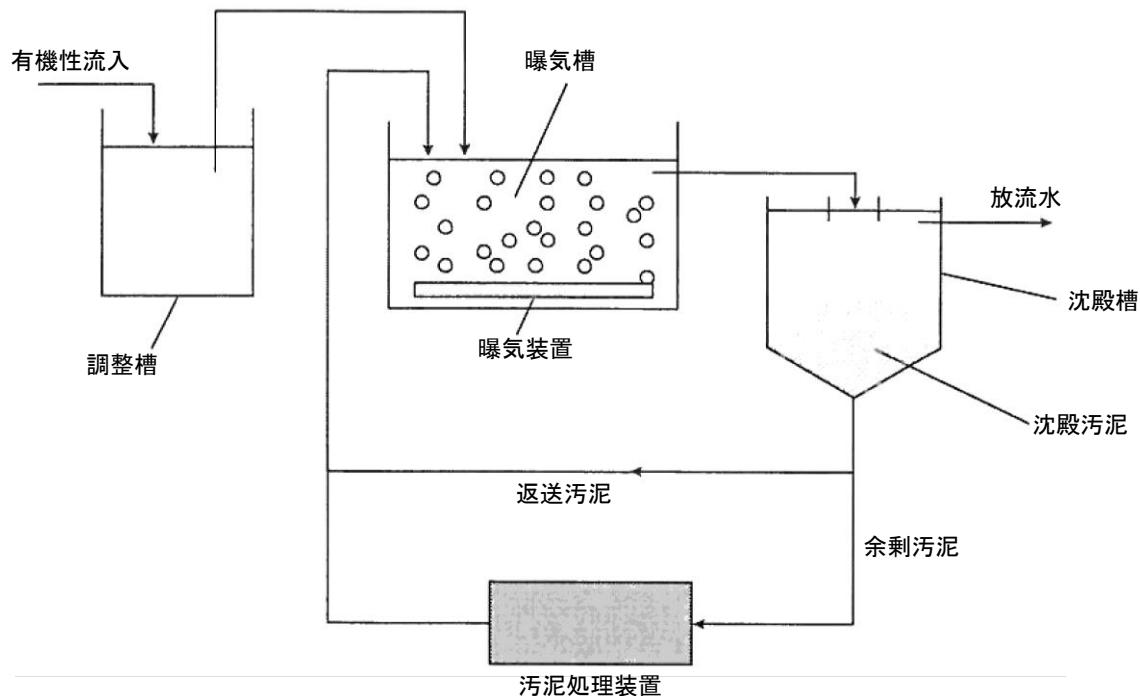


図5
表1に記載されている最初の3つの方法で使用されるフロー。

1つ目の方法では^{1),2)}、装置内で発生したオゾン分子が細胞壁を酸化により破壊する。この方法は、余剰汚泥をゼロに削減することが分かっているが、残留オゾンが化学的酸素要求量(COD)の増加および処理水の透明度の低下の両方を引き起す。さらに、オゾン発生装置は非常に高価である。

2つ目の方法では³⁾、装置内部の温度が約65°Cに保たれ、汚泥は高生分解能力を持つ好熱性細菌によって分解される。しかし、この方法によって生成される不溶性物質が処理水の純度を低下させることが分かっている。

3つ目の方法では⁴⁾、装置に374°Cおよび22 MPa(165,000 mmHg)の亜臨界条件下で水を満たし、この水が汚泥を生溶解性物質に加水分解する。しかし、装置が非常に高価であり、また運転費用を抑えるためには解決すべきいくつかの技術的問題がある。

4つ目の方法では⁵⁾、細胞壁を分解する優れた能力を持つ機能強化細菌を、曝気槽または既存の曝気槽の汚泥貯蔵槽に定期的に添加する。最適条件下では、この方法で余剰汚泥の量をゼロに削減できることが実証されている。その上、既存の施設を改造する必要がなく、電気、熱エネルギー、または化学物質が必要ないため運転費用が他の方法より安い。

これらの方法を比較した後、4つ目の方法が、費用対効果の観点から最善であることを見出した。ここで、これらの機能強化細菌の説明を付け加える。これらの細菌は、以下の手順によつて繁殖されている。自然界に生息するさまざまな細菌を汚泥中で培養し、一連の細胞分裂後、細胞壁を分解する優れた能力を獲得した特定の細菌を抽出した。培養された細菌は、生存競争において土着細菌に容易に敗れる傾向がある。したがって、それらの能力を十分に発揮するには、それらを定期的(月2回以上)に添加して土着細菌に対する優位性を維持する必要がある。それらは汚泥の外では急速に死ぬため、環境を汚染する危険はない。

4. 那須工場の浄化槽への機能強化細菌法の適用

この方法は、汚泥ゼロエミッションの実現に最も有望であると判断されたため、最初の実施例として約半年間、那須工場の浄化槽に暫定的に適用された。この工場から排出される汚泥はリサイクルされず、市営の施設で処分された。

1) 那須工場の浄化槽システムの概要

2種類(システム1およびシステム2)の槽システムがある(表2)。システム1には1つの曝気-沈殿槽シリーズがあり、システム2には3つの曝気-沈殿槽シリーズがあり、そのうち1つはこれまで使用されていない。

表 2
那須工場の浄化槽の概要。

項目	システム 1	システム 2
人数	450	1,500
設備能力	60 m ³ /日	200 m ³ /日
排水の平均流入量	50 m ³ /日	100 m ³ /日
余剰汚泥の排出量	70 m ³ /年	140 m ³ /年
処理形式	長期滞留時間曝気式	
曝気-沈殿槽シリーズの数	1	3 1シリーズは不使用

2) システム 1 から発生した余剰汚泥のゼロへの削減

図 6 は、処理フローを示している。細菌を月 1 回曝気槽に添加し、余剰汚泥をゼロに削減する試みを行った。

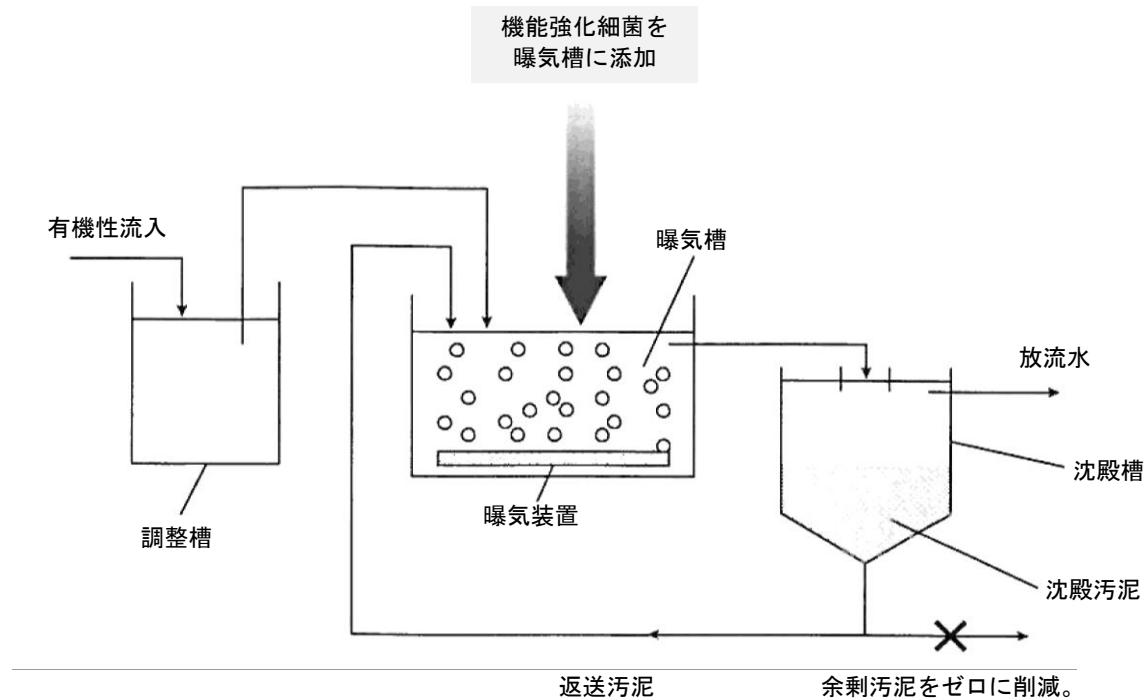


図 6
那須工場のシステム 1 浄化槽での機能強化細菌法を用いた処理フロー。

添加した細菌の量は、以下のように決定した。入力有機物の量 A を、有機性流入の生化学的酸素要求量 (BOD) に流入量を掛けることによって決定した。単位質量の有機物 B に必要な細菌の量は予備実験から推定し、細菌の添加量は A/B で計算した。ただし、この値は定常状態にのみ適用できる。したがって、最初の 3 ヶ月間は、細菌が曝気槽内で可能な限り早く優占種になるようにするため、この値より 40% 多い量に設定した。

細菌の効果は、曝気槽内の MLSS の変化を調査することによって確認できる。この変化を図 7 に示す。

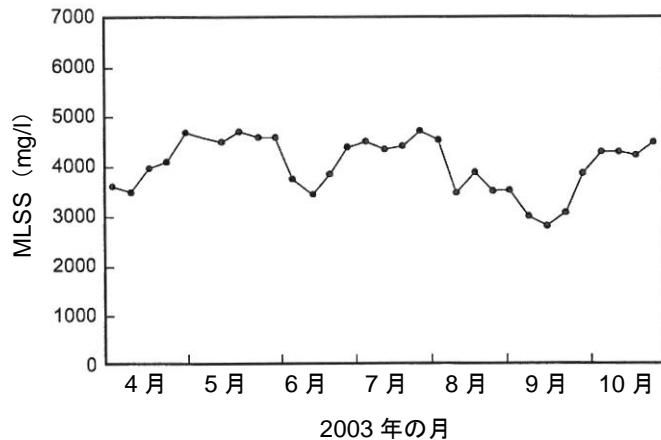


図 7
那須工場のシステム 1 濾過槽の曝気槽での MLSS の変化。

MLSS が増加していないことは、細菌が汚泥を完全に分解したことを意味する。MLSS は、8~9 月は減少さえしている。この減少は、分解能力が汚泥の量と比べて過剰に強かつたことを意味する。これは、この期間の有機性流入量が予想より少なかったためである。このような場合、活性汚泥を形成するフロックの大きさは微小になることが多く、沈殿汚泥が拡大する。図 8 は、システム 1 の沈殿槽内の浄水と沈殿汚泥の界面である、汚泥界面の深さの変化を示している。図 7 および図 8 から、MLSS の減少および沈殿汚泥の拡大は、ほぼ同時期に起きたことが分かる。細菌の分解能力を弱めるため、8~10 月の細菌添加量を A/B の半分に減少させた。これらの図は、MLSS および汚泥界面の深さが 10 月に改善したことを示している。

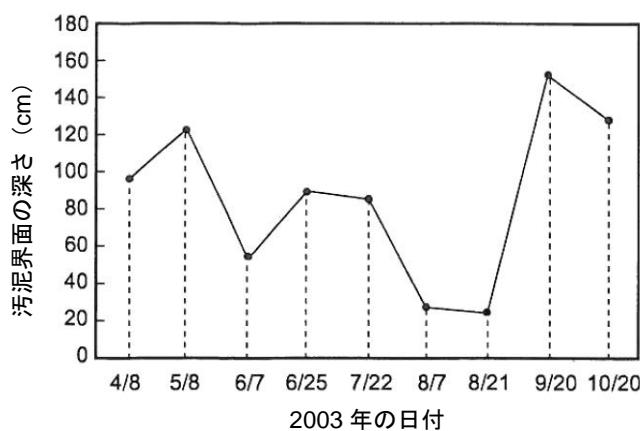


図 8
那須工場のシステム 1 沈殿槽での汚泥界面の深さの変化。

3) システム 2 から発生した余剰汚泥のゼロへの削減

図9は、システム2の処理フローを示している。表2に示すように、システム2にはこれまで使用されていない1つの曝気-浄化槽シリーズがある。したがって、この不使用シリーズを余剰汚泥の分解に用いた。

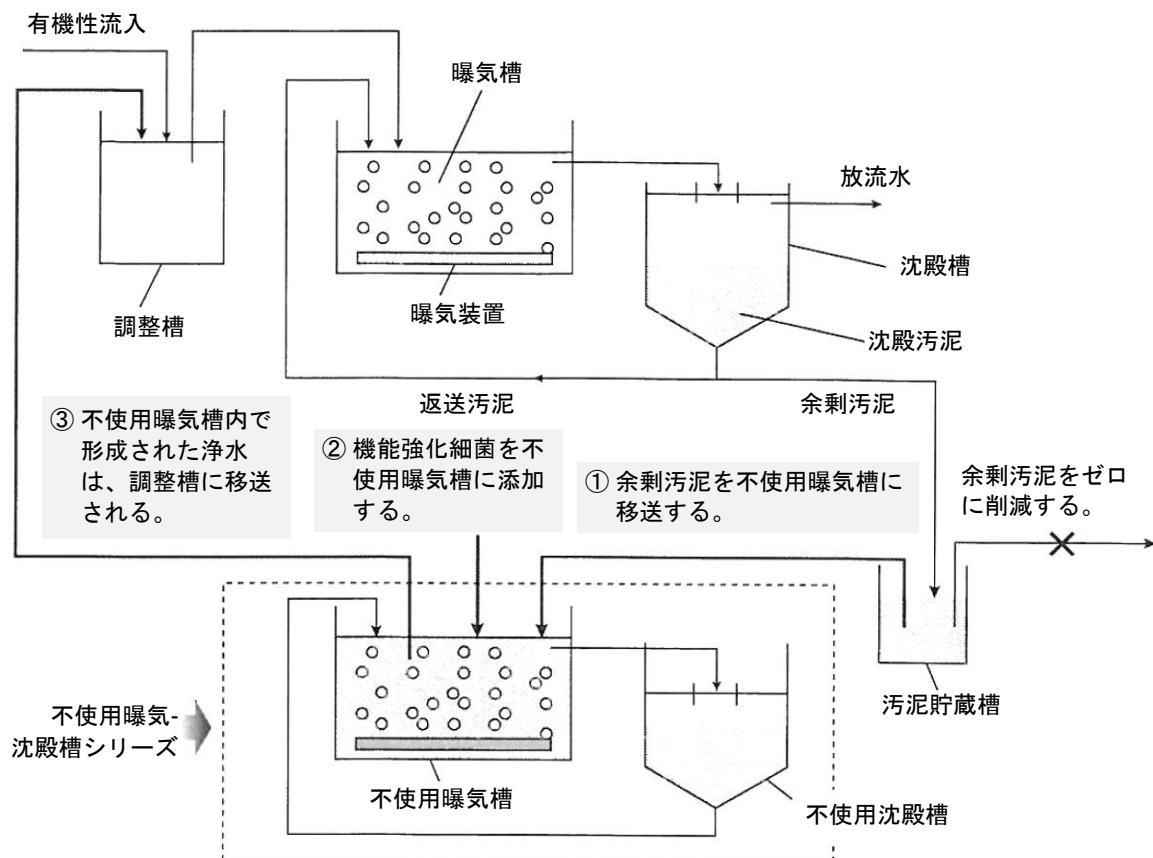


図9
那須工場のシステム2浄化槽での機能強化細菌法を用いた処理フロー。

以下の順序をシステム2に用いた。

- 汚泥貯蔵槽に貯蔵された余剰汚泥を、 59 m^3 の汚泥を移送した最初の月を除き、毎月 $10\sim20\text{ m}^3$ の割合で不使用曝気槽に移送した。
- 次いで、細菌を不使用曝気槽に添加し、曝気を開始した。
- 曝気を約25日間継続し、その間に汚泥を細菌で分解した。
- 曝気を停止し、汚泥を数日間放置した。
- 槽の上部に形成された約 $10\sim20\text{ m}^3$ の浄水を、調整槽に移送した。この槽の空いた空間を用いて、移送する汚泥を収容した。

表2に示すように、排出された余剰汚泥の量は、 $140\text{ m}^3/\text{年}$ すなわち $11.7\text{ m}^3/\text{月}$ であつ

た。一方、移送された汚泥の量は、半年で 127 m^3 すなわち約 $21\text{ m}^3/\text{月}$ であった。これら 2 つの月次の数値の相違は、槽の外への余剰汚泥の排出がなかったことを意味している。

添加した細菌の量は、システム 1 と同じ方法で決定した。

汚泥の分解に不使用シリーズを用いることには、汚泥をゼロに削減するために使用しているシリーズを運転とは独立に制御できるという点で、システム 1 で用いた方法に勝る利点がある。

図 10 は、不使用曝気槽内での MLSS の変化を示している。MLSS の急激な増加は、余剰汚泥が移送された時点に対応している。MLSS の漸減は、細菌による汚泥の分解の結果として生じている。MLSS が毎回約 $6,000\text{ mg/l}$ に減少している事実は、移送によって増加した汚泥の量が、完全に分解されたことを意味している。

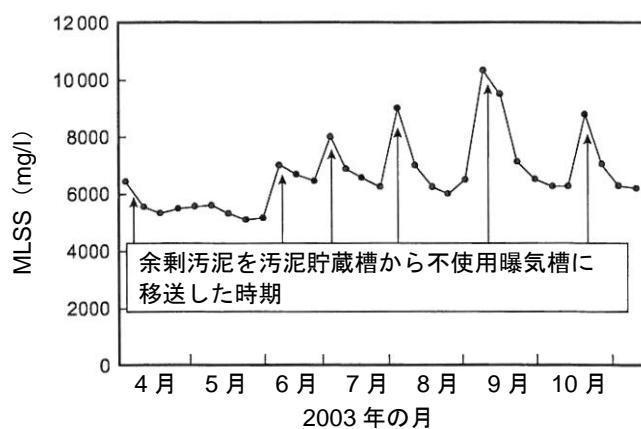


図 10
那須工場のシステム 2 濾過槽の不使用曝気槽での MLSS の変化。

図 11 は、使用している沈殿槽内の汚泥界面の深さの変化を示している。深さの安定的な移行は、この方法が活性汚泥の凝固品質を低下させなかつたことを意味している。

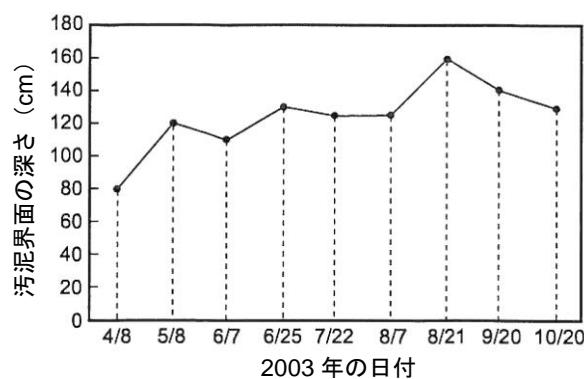


図 11
那須工場のシステム 2 沈殿槽での汚泥界面の深さの変化。

4) 処理水の品質に対するこの方法の影響

処理水の品質は、方法を適用する前と後での pH、透明度、COD、BOD、大腸菌ファージの数、および n ヘキサン、窒素およびリン酸の濃度を槽の出口で測定することによって監視した。これらの量に際立った変化は観測されなかった。この結果から、処理水の品質はこの適用による影響を受けなかったと考えられる。

5) この方法を適用する前と後での余剰汚泥処理費用の比較

我々は、この方法を適用する前と後での、汚泥 1 m³ の処理単価を比較した。この方法の適用により、単位費用が 4~6 月は 63% 増加し、7~9 月は 4% 減少した。

適用の初期段階での高い費用は、細菌を優占種にするため、より多く添加する必要があったからである。システムが定常状態に達すると、費用は適用前とほぼ同じになった。

6) 富士通グループ全体へのこの方法の拡大

那須工場の槽への半年間の暫定的適用に基づき、この方法は汚泥ゼロエミッションの達成に実用的な方法であると判断された。その後、この方法は那須工場で定期的に用いられている。これまで、那須工場ではこの方法で約 350 m³ の汚泥が分解されており、工場から汚泥は全く排出されていない。

2003 年 10 月以前は、富士通グループの他の 14 の工場から排出された汚泥は処分されていた。その後、この方法がこれら 14 の工場に逐次拡大され、これまで合計約 1,500 m³ の汚泥が排出されずに分解された。この結果に基づき、グループ内の汚泥ゼロエミッションの目標は達成されている。

5. 結論

2001 年に開始された富士通環境プログラム（ステージ III）の目標の 1 つは、廃棄物のゼロエミッションであり、それは社外への廃棄物処分がゼロであることと定義されている。この目標の達成を助けるため、我々は浄化槽から排出された汚泥の処分をゼロに削減する問題を取り組んだ。このため、我々は汚泥を他の方法より高い費用対効果でゼロに削減できる、機能強化細菌を使用する方法を調査した。次いでこの方法を、以前は排出された汚泥を処分していた富士通の那須工場で半年間暫定的に適用した。

我々は、この方法が汚泥ゼロエミッションを達成し、活性汚泥の品質を良好な条件に保ち、以前使用されたシステムと比べて処理水の品質に相違がないことを実証した。実用的と判断されたこの方法を、以前は排出汚泥を処分していた富士通グループの他の 14 の工場に拡大した。

この方法を適用して以降、これらの工場から汚泥は排出されていない。我々はこの方法を用いて、合計約 1,500 m³ の汚泥を分解した。その結果、富士通グループからの汚泥の処分はゼロになった。

グループ全体で 1 つの方法を用いて環境負荷を大幅に削減したのは、浄化槽から発生した汚泥の処理分野においては日本初と考えられる。この活動は、富士通グループのゼロエミッションの達成にも大きく貢献している。

この方法をより幅広く使用する前に、以下のことを行う必要がある。

- 1) 余剰汚泥を安定的にゼロに削減するための運転方法を確立する必要がある。浄化槽内の流入水負荷を変化させる要因には、例えば、従業員数の変化、有機性流入の品質の変化、および水温の季節変化といったさまざまな要因がある。これらの変化は、活性汚泥の量および密度に必然的に影響を与える。したがって、流入水負荷の変化に関係なく有機性排水の効果的な処理を可能にするためには、浄化槽の状態を安定的に制御する必要がある。さらに、この方法を用いて汚泥ゼロエミッションを一貫して達成するには、添加細菌の最適制御が必要である。したがって、活性汚泥の安定した形成を保証し、かつ余剰汚泥をゼロに削減するには、浄化槽の運転をより厳密に制御する方法が必要である。浄化槽の安定した運転を保証するため、我々は、さまざまな条件での添加細菌の最適量、処理汚泥が正常であるかどうかを判断する基準、運転上の問題を克服する対策、およびその他の情報を記載するマニュアルを作成する予定である。
- 2) 機能強化細菌の費用を削減しなければならない。細菌法を適用する前は、特に農村地域において、余剰汚泥を公共施設でかなりの低費用で処分していた。一方、細菌は大量生産が非常に難しいため、細菌の費用を容易に削減できない。費用削減を達成するため、我々は各浄化槽の添加細菌の量を最適化する予定である。すなわち、汚泥ゼロエミッションを保証する最小限の量を見出す予定である。