

フラクタル次元に基づく凝集様相の定量化

尾崎功一*, 呉 勇周**, 横田和隆*, 山本純雄*

* 宇都宮大学工学部機械システム工学科
栃木県宇都宮市陽東 7-1-2

** 宇都宮大学サテライト・ベンチャー・ビジネス・ラボラトリー
栃木県宇都宮市陽東 7-1-2

概要

活性汚泥プロセスでは、汚泥容量指標 (SVI) が定められている。さらにそれに加え、人間の目視による活性汚泥の観察が重視されている。このとき熟練者は微生物フロックが織りなす様相の状態から活性汚泥プロセスのパラメータを決定している。このことから本研究では、顕微鏡を使った微視的な観察を行わなくとも巨視的な観察から凝集の状態を把握できると考えた。

本研究では、凝集フロックによる凝集様相の生成過程から、凝集沈降過程にはフラクタル構造が成り立っていることに注目し、フラクタル次元による凝集様相の定量化を提案する。本稿では、本研究で提案するフラクタル次元の定義を示し、実際に水槽および顕微鏡から観察される凝集様相のフラクタル次元を求めた。その結果、両者には相関があることがわかった。

キーワード

フラクタル次元、活性汚泥、凝集様相、画像処理

1 はじめに

公共下水処理施設あるいは工場有機性排水処理施設では、活性汚泥法が主流となっている。しかしながら活性汚泥法は、開放系、混合微生物系であることから、生物反応などの状態が極めて複雑であり、理論的解析が困難である。さらに、生物反応における状態変数を直接検出できるセンサが少なく、たとえ検出可能であっても信頼性に乏しいなどの問題がある。このため活性汚泥法による処理施設の運転は人手に頼らざるを得ない。このような問題に対して、さまざまな手法を適用し、限られた状態変数をパラメータとするモデルの提案が種々なされているが、活性汚泥プロセスの自動化を達成するような研究成果にまでは至っていないようである。

活性汚泥プロセスでは人間による活性汚泥の観察が重視されており、このとき熟練者は凝集様相からその内部状態をおおよそ把握することができる。そこで本研究では、活性汚泥中の微生物フロックが凝集沈降する過程に生じる凝集様相を観測し、これを定量化することによって、活性汚泥プロセスの自動化を実現するアプローチを取ってきた。これまで本研究の成果として、活性汚泥の凝集様相を撮像した画像のフラクタル次元を求めることによって、凝集様相の定量化を実現した¹⁾²⁾³⁾。

このような状況において鈴木は、水中浸漬型微生物モニタを開発し、それによる微生物フロックの微視的な視覚から糸状菌と塊状菌の量を検出し、活性汚泥プロセスの自動化を試みた⁴⁾。この研究に対して本提案の手法では、肉眼でも観察できる活性汚泥の凝集様相から、微視的な状態を把握することが一つの特徴として挙げられる。その点本手法は、鈴木が提案する手法とは異なる。また本研究のもう一つの特徴として、フラクタル次元を適用した点が挙げられる。これについては、荒谷らもフラクタル次元による凝集フロックの計測法を提案している⁵⁾。しかし、ここでは凝集剤を対象としており、凝集フロックの面積と周囲長からフラクタル次元を求めている。この場合、凝集フロックの凝集様相を定量化しているというよりも、結合した凝集フロックの形状(複雑さ)を定量化していると言わざるを得ない。本研究で対象とするのは、活性汚泥の微生物フロックが「密であるか疎であるか」あるいは「どの程度凝集(結合)・分散しているか」である。このためには可能な限り広く観察するべきであり、対象を巨視的に観察するように画像全体を対象とする方法でなければならない。そこで本研究では、画像全体を粗視化して求めるフラクタル次元を適用することを提案する。

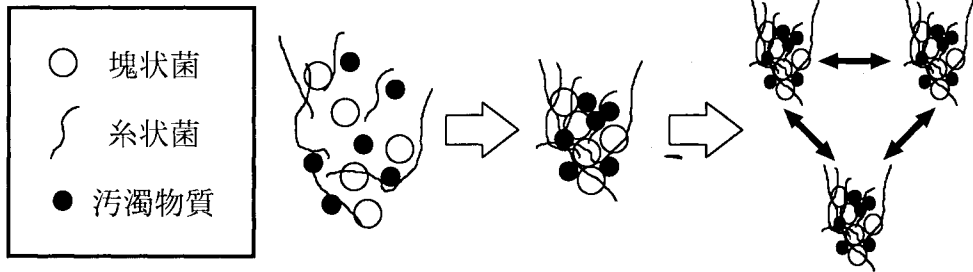


図1 活性汚泥における粒子群の凝集のモデル

2 フラクタル次元を適用した凝集様相の定量化

2.1 フラクタルと凝集様相

画像認識を実現するためには、さまざまなフィルタリング処理を適用して画像を二値化し、この二値化画像から形状的な特徴を抽出するという手順で2つの手法を適用するのが一般的である。すなわち画像処理では、(1)フィルタリング処理、(2)抽出対象のモデル化、の2つの手法が重視されている。しかし、これらの手法、特に(2)抽出対象のモデル化に関する手法の多くには、人工物を対象としていることが前提に含まれており、これらの手法を適用して人間の感覚に基づいた画像認識あるいは自然の対象物の画像認識の実現には限界がある。そこで本研究では、「フラクタル」に注目することにした。

フラクタルとは、幾何モデルを定義するための特徴的な長さがなく、形状的に相似性を有する構造や図形、あるいは現象などを指す。フラクタル理論では、このような図形に対してその相似性（フラクタル次元）を定義（定式化）することによって、その図形の複雑さを定量的に表すことができる。フラクタルの応用は古くからさまざまな分野で試みられており、その例として海岸線、河川や山の起伏などの複雑さをフラクタル次元で示しているものが紹介されている。

以上のことから活性汚泥に注目すると、図1に示すように汚泥が凝集沈降する過程では、微生物フロックである粒子が他の粒子と絡み合うように塊をなし、さらに塊どうしが互いに凝集してより大きな塊となる。このことから凝集様相では、大きな微生物フロックの塊には小さな微生物フロックの塊が包含している点で、相似性が成り立つ。すなわち、活性汚泥に生じる凝集様相はフラクタル構造をなしていると言える。

2.2 粗視化から求めるフラクタル次元

フラクタル次元の定義には数学的には極限的な量までも考慮しているため、その点で現実的に求めることはできない。なぜなら、我々が実際に求めたいのは有限の測定しかない物を対象としているためである。このため、現実的なフラクタルの定義はいくつかの方法が提案されている。本研究では、画像から凝集様相のフラクタル次元を求めることを考慮し、粗視化から求めるフラクタル次元⁶⁾を適用することを提案する。この方法による次元の求め方は、一般に形状の複雑を近似的に求める方法とされているが、本研究と関連したいくつかの実験的検証から、形状の複雑さよりも粒子の密集の度合の方を表すことがわかっている⁷⁾。このことから、凝集様相の定量化には粗視化によるフラクタル次元が適切である。

図2のように対象とする画像を一辺の長さ r の正方形に分割する。そして分割領域に1点以上の点が存在する領域の数を数え、これを $N(r)$ とする。 r を1から順に変えて同様に $N(r)$ を数えたとき、 r と $N(r)$ において、次式の関係が成り立てば対象画像の点の分布の程度をフラクタル次元 D_b で表されることになる。

$$N(r) \propto r^{-D_b} \quad (r = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

すなわち、 $r = 1, 2, \dots, n$ より、 $\log(r)$ および $\log N(r)$ の関係が直線とみなせるとき、その直線が傾きはその画像のフラクタル次元 D_b となる。

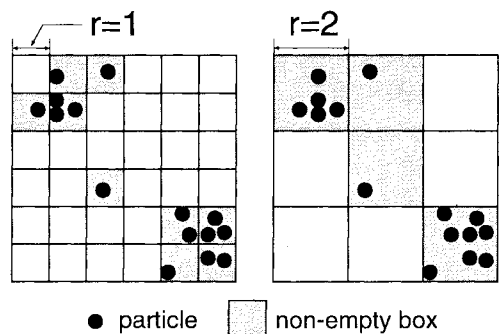


図2 粗視化から求めるフラクタル次元

3 実験環境および実験方法

3.1 実験環境

本研究では、図3に示す実験装置を構築し、これを用いた。本システムは、観測用実験水槽（ $200 \times 200 \times 200 \text{ mm}^3$ ）、実体顕微鏡（オリンパス光学製、SZX-ILLD100、倍率 10.5~135 倍）、CCD カメラ（ソニー製、DXC-9000、有効画素 33 万画素、解像度 512×432 画素）、パーソナルコンピュータ（CPU: Pentium II 400MHz、RAM: 256 MB、OS: Linux-2.0）から構成される。CCD カメラからの画像は、R（赤）、G（緑）、B（青）の輝度を 8bit に量子化した値（0~255）で表現される。なお、この実験装置は、照明条件が一定の部屋に設置されている。

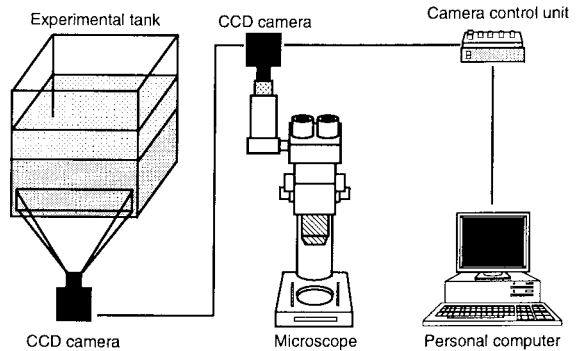


図3 実験装置

3.2 実験方法

3.2.1 実験条件と試料

本実験では、公共下水処理場のばっ気槽より採取した活性汚泥を試料とした。そして、あらかじめ活性汚泥の沈降状態を観察し、汚泥が十分に沈降するまでの時間から実験の時間を 60 分とした。実験時の室温は $22 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 、試料の水温は $12 \text{ }^{\circ}\text{C}$ であった。採取した試料の活性汚泥濃度（MLSS）は 1.835 g/l であった。

3.2.2 撮像条件の決定

本実験では、水槽および顕微鏡から観察される活性汚泥の画像から活性汚泥のフラクタル次元 D_b を求めるため、撮像条件をあらかじめ求めることが必要である。以下に、撮像条件である画像領域の特定および二値化の閾値の決定手順を示す。

- (1) 十分に沈殿した活性汚泥は上澄み液と沈殿した汚泥とが分離するため、活性汚泥の凝集様相を一様に評価できるように沈殿する汚泥の領域のみをあらかじめ特定する必要がある（常に凝集様相を撮像できる領域を特定する）。そこで試料を実験水槽に入れ、十分に攪拌してから 60 分ほど静置した後、沈殿した汚泥の領域を調べた。その結果、画像最下部の 280×40 の領域であることがわかった。
- (2) この状態で水槽の活性汚泥を撮像した。(1) で特定した領域について濃度ヒストグラムを作成した。本実験では、R、G、B 画像中から B 画像の濃度ヒストグラムより、145 から 155 の領域を抽出して二値化画像を作成した。
- (3) さらにこの水槽から試料をスポイトにより採取し、凹部付きプレパラートに数滴落とし、カバーガラスをかぶせて、実体顕微鏡で観察できるようにした。実体顕微鏡の倍率を 30 倍にした。実体顕微鏡からの画像を撮像し、(2) の手順と同様に濃度ヒストグラムを求めた。その結果、B 画像の 84 以下を抽出して二値化画像を作成した。なお、顕微鏡からの画像は 512×432 画像とした。

ここで、実験水槽から撮像した画像を「水槽画像」、実体顕微鏡から撮像した画像を「顕微鏡画像」と呼ぶことにする。これらの画像から水槽画像は「巨視的な観察」に相当し、顕微鏡画像は「微視的な観察」に相当する。

3.2.3 凝集沈降過程における凝集様相の撮影

本研究では、凝集沈降過程における凝集様相の変化に注目しているため、連続的に水槽画像および顕微鏡画像からフラクタル次元 D_b を求めた。まず、活性汚泥を含む汚水を十分に攪拌し、攪拌終了直後から 3 分間隔で水槽画像を撮像する。また同時に、3 分間隔で水槽から試料をスポイトで採取し、3.2.2 節 (3) と同様の手順で実体顕微鏡画像を撮像した。

4 実験結果および考察

4.1 フラクタル構造の確認

凝集様相がフラクタル構造を有するには、(1) 式の関係が成立していなければならない。そこで (1) 式より、 r および $N(r)$ の関係を確認した。図 4 に、攪拌後 60 分の水槽画像および顕微鏡画像から求めた r および $N(r)$ の関係を示す。ただし、 $r = 2 \sim 11$ 画素である。その結果、 r および $N(r)$ に直線的な関係があることを確認した。したがって、この直線の勾配からフラクタル次元 D_b を求めることには問題がない。本研究では、最小二乗法によって直線の勾配、すなわちフラクタル次元 D_b を算出した。なお本実験では、水槽画像および顕微鏡画像の 42 枚いずれも r と $N(r)$ の相関係数が 0.99 以上であった。

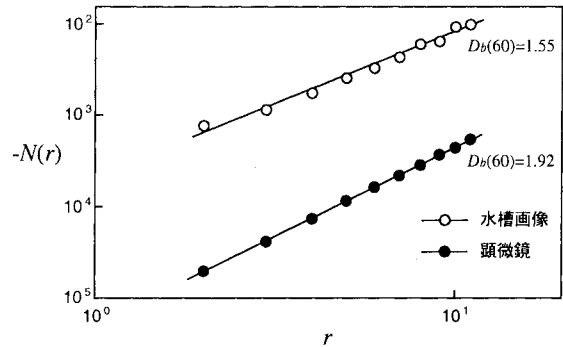


図 4 r と $N(r)$ の関係

4.2 凝集様相におけるフラクタル次元の変化

主な時間における水槽画像および顕微鏡画像を二値化した結果を図 5 に示す。この図において、黒い部分は抽出された微生物フロックである。時間の経過とともに微生物フロックが凝集している様子がみられる。これらの画像からフラクタル次元 D_b を求めた。微生物フロックが多いほどフラクタル次元 D_b が高くなっている。特に、水槽画像では、凝集様相に差はほとんどないようにみえて取れるが、このような微小な変化であってもフラクタル次元 D_b の値には差となって表現された。このことから、フラクタル次元 D_b が凝集様相を定量的に表現していることを確認した。

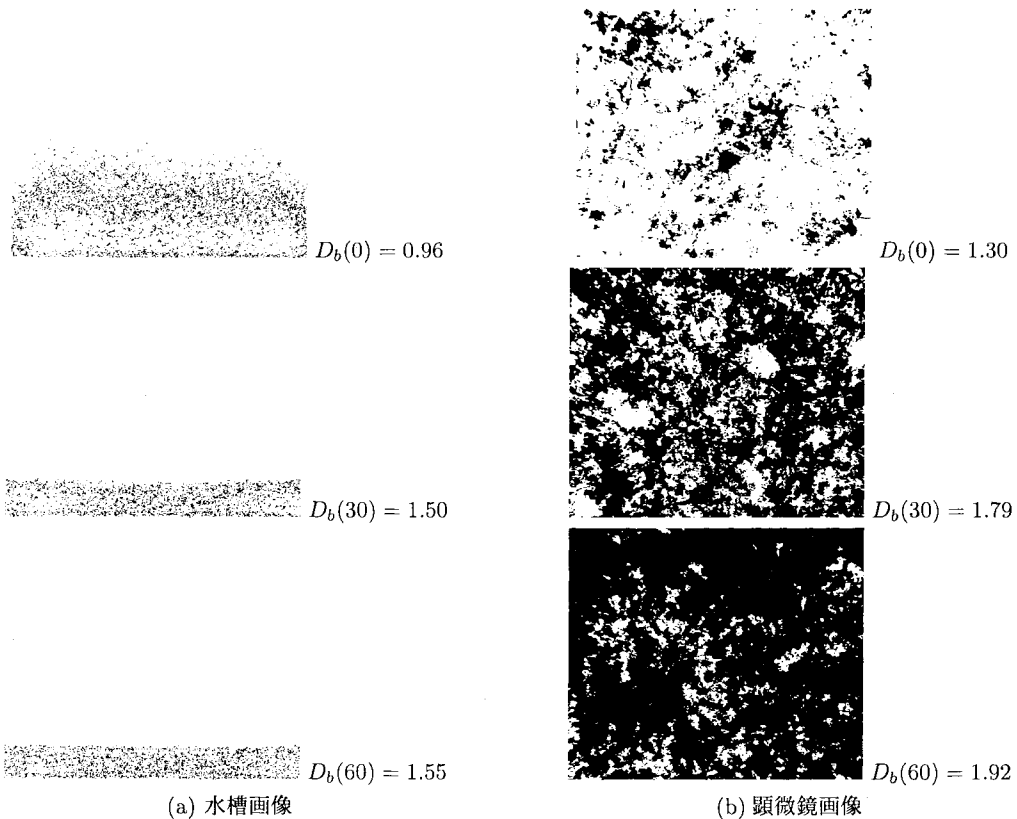


図 5 水槽画像と顕微鏡画像の二値化画像

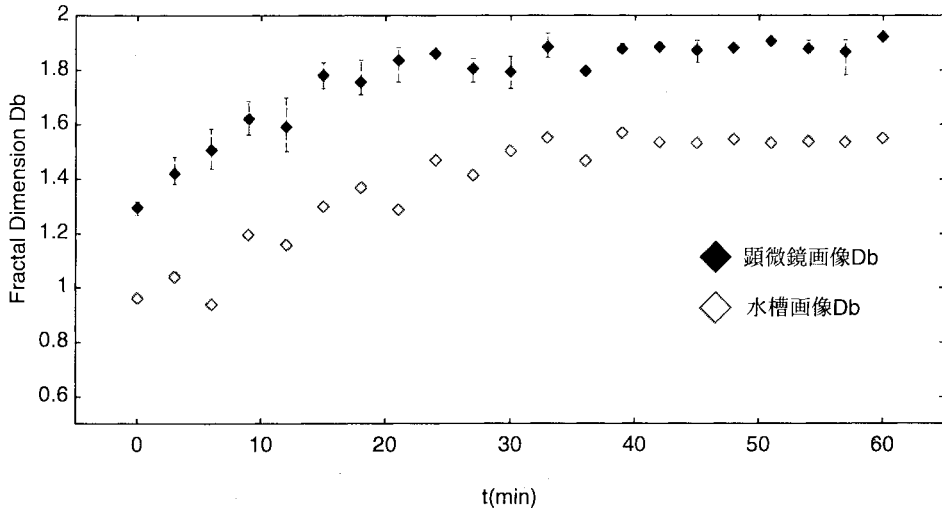


図6 水槽画像と顕微鏡画像のフラクタル次元の変化

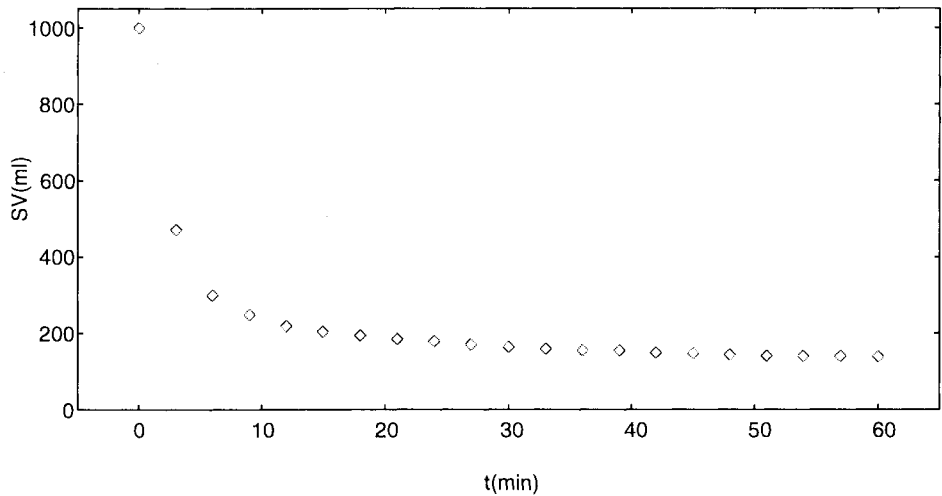


図7 汚泥沈澱量(SV)の変化

水槽および顕微鏡からの凝集様相の変化を観察した。まず水槽の観察では、凝集沈降が進むにつれ、凝集様相の変化が鈍くなり、次第に様相が変化しなくなる。一方顕微鏡の観察では、微生物フロックが密の状態になり、すき間がなくなる。したがって、凝集が進むにつれフラクタル次元の変化はなくなり、ある一定した値を示すことになる。図6にフラクタル次元 D_b と時間 t との関係を示す。さらにその比較として、図7に汚泥沈澱量(SV)の変化も併せて示す。図6から、時間の経過にともない水槽画像と顕微鏡画像におけるフラクタル次元 D_b がともに増加し、40分を経過するとその変動のばらつきが少なくなることがわかった。これまで本研究では、水槽画像のフラクタル次元 D_b は凝集沈降開始後おおよそ15分まで大きく増加し、30分ごろまでに飽和する傾向であることを確認している²⁾。しかし本実験では、30分が経過してもフラクタル次元 D_b は変動しており、安定した状態に入るのは40分付近からとなった。この理由は、実験を行った時期が冬であり、活性汚泥の水温が低かったために菌の活性が低下し、凝集が十分に促進されなかったためと考えられる。

汚泥容量指標(SVI)では沈降性を評価する時間の基準は30分とされているが、SVの変化(図7)における30分の時点では一見凝集沈降が終了しているようにみられる。しかし水槽画像および凝集画像ともに、図5より微生物フロック間に間隙が残されていること、図6よりフラクタル次元 D_b が不安定であることから、凝集沈降が不十分であることがわかる。これに対して、フラクタル次元 D_b は画像(図5)と照らし合わせてみても凝集様相を把握するのに適していることがわかった。

4.3 フラクタル次元における水槽画像と顕微鏡画像との関係

水槽画像および顕微鏡画像におけるフラクタル次元 D_b が凝集沈降開始後 25 分までは多少のばらつきがあるもののほぼ同様の傾向を示していることを確認した。顕微鏡画像ではばらつきが目立つのは、活性汚泥を採取するときのばらつきによるものである。このため、実験の前の攪拌により微生物フロックが流動的に分散している状態から、時間の経過とともに微生物フロックが凝集沈降し一様に分布する状態に至るほど、計測のばらつきは小さくなった。

また、水槽画像および顕微鏡画像のフラクタル次元 D_b が一致しないのは次の 3 つの理由のためである。(1) 二値化の閾値により抽出される微生物フロックの量は変わり、それがフラクタル次元 D_b にも影響される。しかし、水槽と顕微鏡では測定環境が異なるので、その差異がなくなるような閾値の設定が難しい。(2) 水槽では奥行きのある空間、顕微鏡では奥行きのない空間であり、そのため測定対象の環境条件が異なる。(3) 先に述べたように顕微鏡画像では試料を採取する場所によるばらつきは避けられない。さらに、試料をプレパラートに移した瞬間に凝集フロックが壊れるなどの問題がある。

(1) の閾値の問題は画像を扱う上では避けられない共通の問題である。ただし、フラクタル次元 D_b の変化から凝集様相を評価するという立場を取れば、フラクタル次元 D_b を絶対量ではなく相対量として扱うことでその問題を回避できる。(2)(3) の問題については、実験装置の改良によってある程度問題を解決できると考えられる。ただし、ばらつきの問題は、活性汚泥のような不均一な系を対象とする場合、センサの最適配置問題を避けることができず、根本的には解決が困難であると考えられる。これは微視的な観察から全体を把握することには限界があるのと同じ問題であり、不均一な系の全体を掴みたいならば巨視的な観察の方が適している。その点、本研究で提案するフラクタルの適用は、理論的には観察の視点に差異はなく、これが本研究の重要なポイントであると考えている。

以上のことから、下水処理施設の運転熟練者が活性汚泥の凝集様相を観察することによって運転パラメータを決定できるように、水槽画像の凝集様相を計測（巨視的に観察）することによって汚泥の内部状態を把握できる可能性が示唆された。

5 おわりに

本稿では、活性汚泥の凝集様相にフラクタルの概念を適用し、凝集様相をフラクタル次元で定量化することを提案し、実験によりその有用性を示した。さらに、水槽から観察される凝集様相（巨視的な凝集様相）と顕微鏡から観察される凝集様相（微視的な凝集様相）とに相関があることを示した。

現在、糸状菌および塊状菌の比率からバルキングの予測を目的に、基質投与による活性汚泥の状態変化に対して、どのような傾向になるかを実験している。このような状態であってもフラクタル次元はなんらかの傾向を示していることがわかった。今後、このような活性汚泥の内部状態とフラクタル次元との関係を明らかにする。

謝 辞

本実験は、伊藤大介氏（宇都宮大学大学院博士前期課程修了、現、東芝テック）に手伝っていただいた。また、試料の活性汚泥は宇都宮市川田下水処理場より提供いただいた。ここに謝意を表する。

参考文献

- 1) 呉 勇周・尾崎功一・横田和隆・佐藤啓仁・山本純雄：フラクタル次元による微生物フロックの凝集過程の評価，日本機械学会論文集（C 編），Vol. 64, No. 618, pp. 173-177 (1998).
- 2) 伊藤大介・尾崎功一・呉 勇周・横田和隆・山本純雄：フラクタル次元による活性汚泥の凝集計測，1999 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集，p. 569 (1999).
- 3) 伊藤大介・尾崎功一・呉 勇周・横田和隆・山本純雄：フラクタル次元による活性汚泥の凝集様相の計測，日本機械学会関東支部ブロック合同講演会'99 宇都宮-講演論文集，pp. 51-52 (1999).
- 4) 鈴木一如：活性汚泥微生物の画像認識による下水処理の制御，環境システム計測制御学会誌，Vol. 4, No. 2, pp. 27-40 (1999).
- 5) 荒谷敏朗・藤井達也・森川利哉・南宮 啓：フラクタル次元による凝集フロックの形状評価，化学工学論文集，Vol. 14, No. 3, pp. 395-400 (1988).
- 6) 高安秀樹：フラクタル，朝倉書店 (1986).
- 7) 呉 勇周・尾崎功一・横田和隆・山本純雄・佐藤啓仁：フラクタル次元による複雑なパターンの計測，1998 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集，p. 665 (1998).