

フラクタル性を利用した活性汚泥における評価方法の提案

Proposal of Evaluation Method by Fractal in Activated Sludge

○赤木祐子¹⁾, 尾崎功一²⁾, 山本純雄³⁾

宇都宮大学大学院 工学研究科 情報制御システム科学専攻

○Yuko Akagi¹⁾, Koichi Ozaki²⁾, Sumio Yamamoto³⁾

Utsunomiya University, Graduate School of Engineering,
Department of Information and Control Systems Science

Abstract

Wastewater treatment by activated sludge method is widely used in sewage treatment plants. In the plants, although valuation of coagulation state is necessary for efficient process of sewage treatment, it is difficult to automatically evaluate the state. Therefore, the evaluation is achieved by experience and sense of human operators. In order to evaluate the coagulation state, the fractal-based indexes, AI and SI are applied to measure coagulation aspects. In this study, it is considered that self-similarity such as fractal on the coagulation aspects in activated sludge occurs. This report describes feasibility of both indexes AI and SI for evaluation coagulation aspect in the activated sludge. In the experiment, it is shown that the AI and SI are possible to measure the coagulation aspects in both of macro-view and micro-view, quantitatively.

Key Words : fractal , activated sludge , coagulation aspect , image processing , evaluation

1 はじめに

一般的に公共の下水処理場では活性汚泥法と呼ばれる微生物フロックの凝集特性を利用した方法が広く用いられている。これらのプラントの管理・運転にあたっては、微生物の緩やかな結合体である活性汚泥の凝集・沈降状態を把握することが重要となる。そこで従来、凝集状態の判断は、プラント運営者の経験および感覚により評価が行われてきた。しかし、このような人間による評価は、個人差、疲労、かつ信頼性に欠けるという問題がある。また、増大する処理水量への対応、処理施設の増加に伴い、維持管理の効率化などが必要となっている。そのため、凝集状態の評価の自動化が重要な課題となっている。そこで、本研究では、活性汚泥が凝集する際に生じる、いくつもの因子が絡み合う複雑な凝集様相に着目し、一般的に複雑さを表現するといわれているフラクタル次元を用いて凝集様相の定量的な評価法を研究してきた¹⁾²⁾。本報告では、フラクタルに基づいた密集指標 AI²⁾ と形状指標 SI²⁾ による評価方法を提案し、実験によって、その内容を検証する。

2 フラクタル性を利用した凝集様相の定量化

2.1 フラクタルと自己相似性

フラクタル³⁾とは、大義的には特徴的な長さを持たない複雑な図形、構造、現象などと考えられており、そこには、なんらかの「自己相似性」が存在する。図形の例では、ある一部を拡大するとそれが全体と同じ図形となるような図形（たとえば、コッホ曲線）はフラクタル幾何と呼ばれている。

フラクタルにおける自己相似性の程度は、「フラクタル次元（一般的な空間表現とは異なり、小数点でも表される）³⁾」と呼ばれる値で表現されている。一般的には、自己相似性が存在する図形は複雑な形状であると考えられており、これまで、複雑さを表す計測量として、フラクタル次元が広く用いられていた。

しかし、自然に存在する物の構造や自然現象などにおいては、必ずしも自己相似性を有するとは限らない。自己相似性は無限に繰り返される概念であるが、現実存在する対象物の多くは物理量が有限の範囲に限定される。このため、現実的に利用されるフラクタル次元では、近似的に求められる方法が適用されている。フラクタル次元を近似的に求める方法はいくつか提案されており、どの方法でフラクタル次元を求めたとしても、いずれも同様の値を表すとされている。このため、どの近似的な求め方が適切であるかの議論は十分なされていない。

2.2 フラクタルと活性汚泥

活性汚泥の凝集・沈降モデルをFig.1に示す。活性汚泥中における微生物の生態系は塊状菌 (zoogloal microorganisms) および糸状菌 (filamentous microorganisms) に大別される。両者は、凝集作用によって互いに結合しブロックを形成する。そしてブロックどうしがさらに結合し合うことにより、より大きなブロックを形成する。すなわち、この現象においては、自己相似性 (フラクタル性) が成立していると考えられる。このことから我々は、粗視化によって求められるフラクタル次元と呼ばれる近似的なフラクタル次元を適用して、活性汚泥の凝集状態を観察し、その定量化を試みた。その結果、フラクタル次元によって凝集様相の状態を間接的に表現できることを確認した¹⁾。

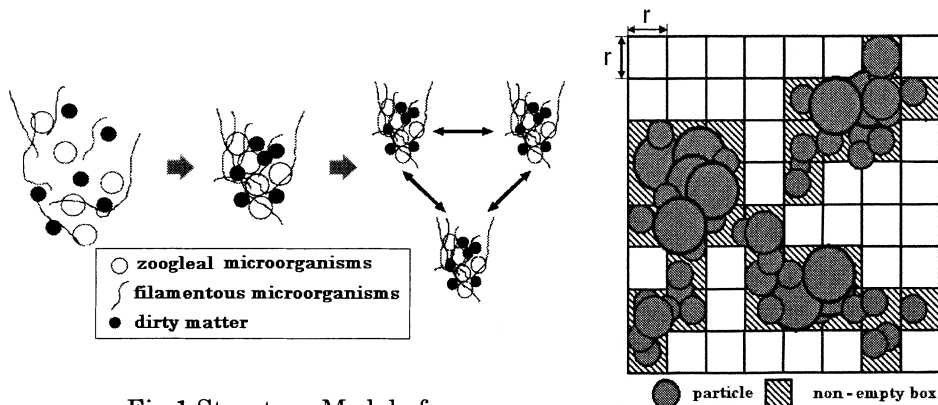


Fig.1 Structure Model of Activated Sludge

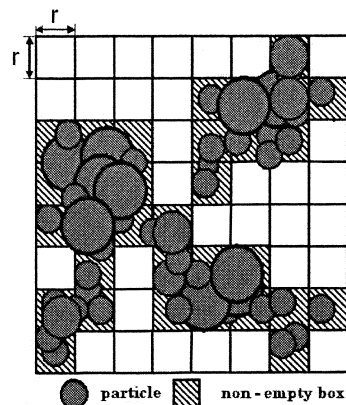


Fig.2 Conceptual Figure of Aggregation Index

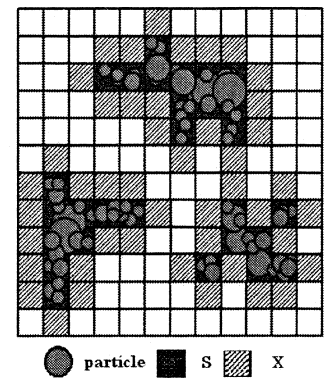


Fig.3 Conceptual Figure of Shape Index

2.3 フラクタル次元に基づいた密集指標AIと形状指標SI

本研究では、呉らが提案するフラクタル次元に基づいた計測指標 AI および SI を適用する²⁾。AI (密集指標 Aggregation Index) とは粗視化によって求められるフラクタル次元であり、Fig.2のように画像を一辺の長さ r の正方形に分割し、その平面上に粒子を含む正方形数を $N(r)$ とし、 r の値を連続的に変化させた時、式 (1) の関係を満たす指数によって求められる。

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

SI (形状指標 Shape Index) は Fig.3 のように画像をできるだけ細かい正方形に分割し、その平面上で、粒子を含む正方形の数を面積 S 、その正方形と接する正方形の数を周囲長 X とし、個々の粒子群において計測をしたとき、式(2)の関係を満たす指数によって求められる。

$$S^{1/2} \propto X^{1/SI} \dots (2)$$

3 フラクタル次元に基づく凝集様相の定量化

本研究では活性汚泥が凝集する際に生じる複雑な凝集様相に着目し、画像処理およびフラクタル次元を用いることにより凝集様相を定量的に評価する。この方法は、活性汚泥のフラクタル性 (自己相似性) を考慮し、凝集様相をマクロかつミクロに評価する方法である。これにより、従来、経験者が感覚的に捉えていた活性汚泥の凝集様相を定量的に評価することができる。

3.1 画像撮影システム構成

本実験では、時間の経過による凝集沈降状態と活性汚泥の内部状態を観測するため、Fig.4に示す画像撮影システムを構築した。本システムは、容量80ℓの観測用実験水槽 (寸法: 高さ0.2m×幅0.2m×奥行0.2m)、デジタルカメラ、カメラコントロールユニット、実体顕微鏡、パーソナルコンピュータから構成される。

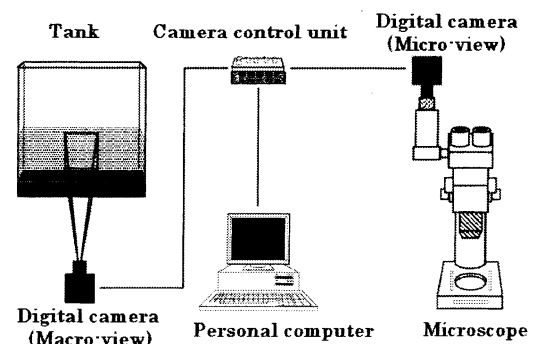


Fig.4 Experimental System

3.2 活性汚泥における凝集様相の撮影

本実験では、活性汚泥が十分に沈降する60分を観測時間とした。実験時の水温は24°C、MLSS1.4g/lであった。まず、十分に曝気した活性汚泥試料を実験用水槽と10メスシリンダーに移し、攪拌した。十分に攪拌した後、凝集沈降実験を行った。顕微鏡画像、水槽画像の凝集様相を実験開始後3分毎に撮影し、それと同時にSVを測定した。①顕微鏡画像(マイクロ画像)においては、実験水槽の沈降部からスポイトで凝集体を採取し、プレパラートに滴下したものをを用いた。顕微鏡倍率は、活性汚泥における凝集様相をよく観察できる32倍とした。②水槽画像(マクロ画像)は凝集する部分に着目し、十分に沈殿させたときに一様となる沈降した部分のみをマクロ画像として抽出した。

3.3 ミクロ画像とマクロ画像における凝集様相

AI、SIの算出には、粒子のみを算出する必要がある。そのため、撮影した画像に対して判別分析法⁴⁾により二値化処理をおこなった。顕微鏡画像(マイクロ画像)の処理例をFig.5に、水槽画像(マクロ画像)の処理例をFig.6に示す。

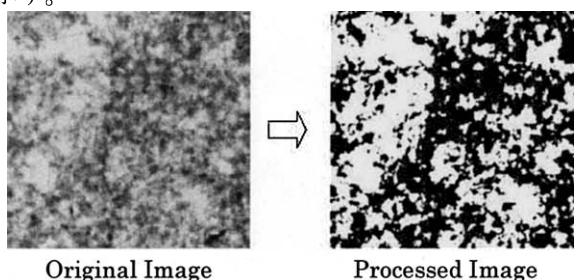


Fig.5 Micro-view (Microscope)

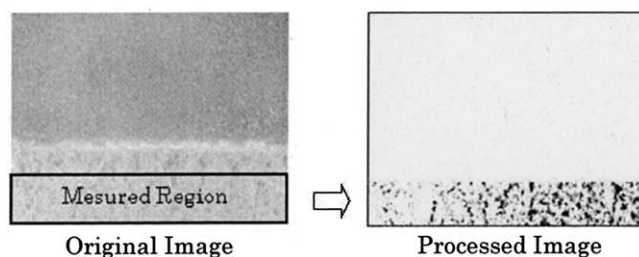


Fig.6 Macro-view (Tank)

3.4 フラクタル構造の確認

計測対象物がフラクタル性を有するには、AIについて式(1)、SIについて式(2)の関係が成立していなくてはならない。そこでAIにおいては、 $\log r$ および $-\log N(r)$ を、SIにおいては、 $\log X_n$ および $2\log S_n$ をそれぞれ求め両者の関係を調べた。その結果をFig.7、Fig.8に示す。両者の相関係数はいずれも0.98以上であった。このことから両者の画像上の構造はフラクタル構造であり、AI、SIを適切に求められることを確認した。

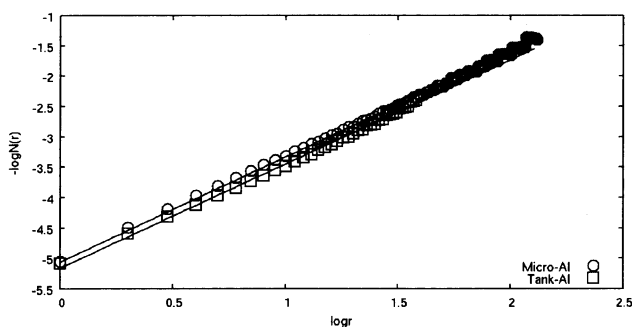


Fig.7 Relationship between $\log r$ and $-\log N(r)$

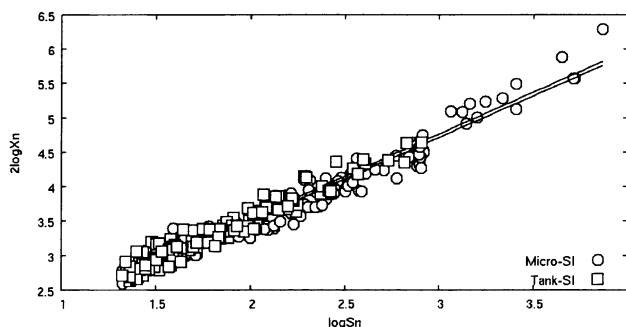


Fig.8 Relationship between $\log S_n$ and $-2 \log X_n$

4 実験結果

一般的な凝集傾向の指標であるSVの時間的変化をFig.9に、水槽画像および顕微鏡画像におけるAI、SIの時間的変化をFig.10に、それぞれ示す。試料とした活性汚泥は、比較的狀態のよいものであり、短時間で凝集沈降した。これを肉眼で観察したところ、10分あたりまでは急激に沈降し、その後は圧密過程を繰り返しながら凝集が緩やかに進んだ。この凝集の様子はFig.9より界面が低下していくことから把握することができる。AIおよびSIはともに0~2の範囲となり、値が高いほど、AIは密集していることを表し、SIではブロックの形状が複雑なことを表している。

AIは開始10分までの間に急激に上昇し、その後、増減を繰り返しながら1.8前後に収束した。一方SIは、ほぼ一定の値となった。AI(黒のプロット)とSI(白のプロット)は、値にやや差があるものの、同様の傾向を示した。このことから、マクロ(顕微鏡画像)とミクロ(水槽画像)の視点にとらわれずに計測できることを意味し、本研究の狙いどおり、活性汚泥にフラクタル性があると考えられることができる。

AIおよびSIはフラクタル次元の値として考えるならば、ともに同様の値になると考えられる。しかしながら、実際には、ともに異なる値となった。これは呉らの提案どおり、求める方法によって表される指標に違いが生じていたためと考えられる。すなわち、AIは画像中に分散する粒子群の密集程度、SIは各粒子群の複雑さの程度を表しているといえる。このことから、活性汚泥の凝集把握についてはAIの方が適切であるといえる。

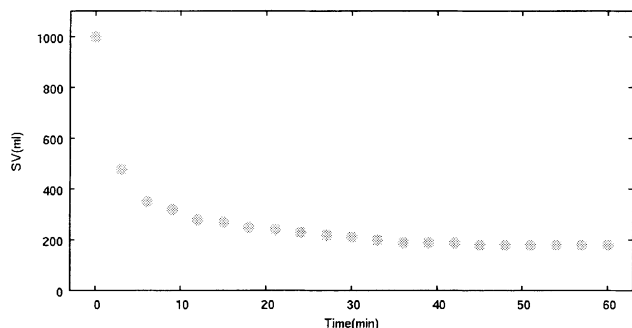


Fig.9 Relationship between Time and SV

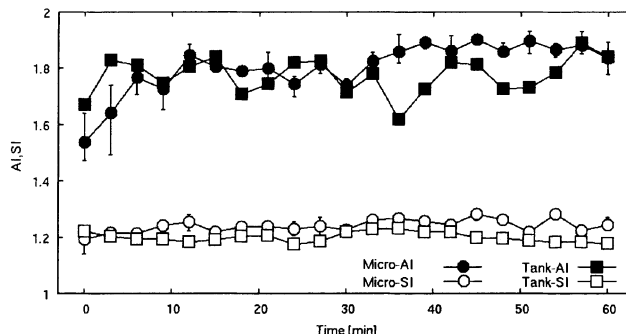


Fig.10 Relationship between Time and AI or SI by Micro-view and Macro-view

5 考察

水槽画像（●と○のプロット）と顕微鏡画像（■と□のプロット）の値の差異については、計測条件の違いによるものと考えられる。具体的には、水槽画像は活性汚泥が三次元空間にあり、粒子どうしの結合も自然のままに計測することが可能である。これに対し顕微鏡画像では、活性汚泥が二次元平面に閉じ込められ、採取する際に結合の構造が壊されてしまう。しかしながら、フラクタル性を考慮するならば、先に述べた計測条件より、水槽画像の方が活性汚泥の状態を比較的正しく表しているといえる。

AIおよびSIの値が明らかに異なる。このことは、フラクタルの計測方法を考慮しなければならないことを意味する。これまで荒谷らは、凝集体の評価にSIに相当する計測方法を適用し、凝集能の評価を試みている⁵⁾。また、一般的にもSIに相当するフラクタル次元が広く用いられている。しかしながら、本実験の結果より、活性汚泥に関しては、SIよりもAIの方が凝集様相の評価については有用であることがわかった。すなわち、計測対象によって、AIおよびSIの使い分けが必要であると考えられる。

なお本実験では、比較的状态のよい活性汚泥を試料とした。本来、活性汚泥の状態を評価することの意義は、バルキングの予測など、内部の状態の悪化を検知することにある。その場合、従来のようにAIに相当する尺度、あるいはSIによる尺度のいずれかでなく、両方を総合的に評価することが有用であると考えられる。

6 まとめ

本研究では、活性汚泥が凝集する際に生じる複雑な凝集様相に着目し、画像処理およびフラクタル次元を用いて、活性汚泥における凝集様相の定量的な評価を行った。本実験では、活性汚泥のフラクタル性を利用し、凝集様相をAIおよびSIで計測した結果、同じフラクタル次元でも、それぞれ異なる指標を表現していることが確認できた。このことから、計測目的に合わせて、AIおよびSIを用いることにより、適切な密集と形状との評価が可能であるといえる。さらに、活性汚泥のフラクタル性に着目することにより、顕微鏡画像と水槽画像における凝集様相がほぼ同じであった。このことから、本実験によって計測の視点に関わらない定量的な評価が可能であることを示した。

今後は、AIおよびSIの指標を用いて、活性汚泥のバルキング予測など、より実用的な状態評価法に着手する。

参考文献

- 1) 尾崎功一・宮嶋寿夫・呉 勇周・山本純雄：フラクタルに基づいた活性汚泥における凝集様相の定量化とその応用、環境システム計測制御学会誌、9(1)、39-45(2004)。
- 2) 呉 勇周・尾崎功一・山本純雄：粒子群の密集パターンの評価、精密工学会誌、70(1)、81-85(2004)。
- 3) 高安秀樹：フラクタル、朝倉書店(1986)。
- 4) 谷内田正彦：コンピュータビジョン、丸善(1990)。
- 5) 荒谷敏郎・藤井達也・森川俊哉・宮南 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、14(3)、395-400(1998)。