

## &lt; 論文 &gt;

# 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

Fractal-based Quantification of Coagulation Aspects on Activated Sludge and Its Application

尾崎功一<sup>1</sup>, 宮嶋寿夫<sup>1</sup>, 呉 勇周<sup>2</sup>, 山本純雄<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 宇都宮大学大学院 工学研究科 / 栃木県宇都宮市陽東 7-1-2

<sup>2</sup> 山形大学ベンチャー・ビジネス・ラボラトリー / 山形県米沢市城南 4-3-16

Koichi OZAKI<sup>1</sup>, Hisao MIYAJIMA<sup>1</sup>, Yong-Joo OH<sup>2</sup>, Sumio YAMAMOTO<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Graduate School of Engineering, Utsunomiya University

/ Yoto 7-1-2, Utsunomiya, Tochigi, Japan

<sup>2</sup> Venture Business Laboratory, Graduate School, Yamagata University

/ Jonan 4-3-16, Yonezawa, Yamagata, Japan

## Abstract

This paper describes a method of quantification of coagulation aspect based on fractal dimension for activated sludge. Microorganisms are widely applied in sewage treatment plants and wastewater treatment facilities. It is important for water cycle in an environment. In the plants, a state of coagulation of activated sludge have been evaluated by human operators. However, it is difficult to recognize and evaluate the coagulation quantitatively.

Fractal is generally independent of scale, and the concept of self-similar. In this paper, it is considered that coagulation aspects in activated sludge are also self-similar. The aspects can be quantified by fractal dimensions. As experiment, two kinds of fractal dimensions were measured from two series of images by a microscope and a macro-camera. The trends of those fractal dimensions are almost similar. It means that the measurement by fractal dimensions is not depend on scale size.

Therefore, the fractal dimension is very effective to measure or quantify the aspects of the activated sludge for sewage disposal plants.

**Key Words** : fractal, fractal dimension, quantification, activated sludge, coagulation aspects, image processing, SV, sewage treatment plants

## 1 はじめに

水資源は人間の生活環境には欠かすことができない。そのため、上水処理だけでなく下水処理の効率的な運用が必要である。一般的には、公共下水処理場あるいは工業廃水処理場では、活性汚泥法による汚水処理法が広く用いられている<sup>1),2)</sup>。これは活性汚泥に含まれる微生物による有機物の分解および凝集作用により汚濁物質を分離除去し、汚物が沈殿した際の上澄み水を回収再処理する方法である。この方法では、SVIなどの評価指標が一般化されているが、場合によっては、下水処理場のオペレータが活性汚泥の凝集様相を観察するなどの経験にたよった運転がなされている。

本研究では、活性汚泥中の微生物フロックの凝集・沈降過程に生じる雲状の模様に着目している。本論文では、このような模様を「凝集様相」と呼ぶことにする。この凝集様相に着目することによって、活性汚泥の状態を把握するための方法をさぐる。

活性汚泥の状態解析に関する研究において、鈴木<sup>3)</sup>は、活性汚泥中の微生物の様相を顕微鏡によって撮影し、画像処理を適用することによって、糸状菌を抽出し、糸状菌の量を定量化することにより、凝集能を定量化することを試み、SVIとの比較からその有用性を述べている。これに対して我々は、活性汚泥の凝集様相にフラクタル構造(自己相似性)が存在することに注目し、フラクタル

次元から活性汚泥の凝集を評価する方法を開発した。フラクタル構造の利点は、巨視的および微視的の視点の違いが存在しないことにある。現実的には、巨視および微視の尺度は有限であるが、その範囲内においては評価の視点をいずれにも置くことができる。すなわち、巨視的な画像からでも微視的な様相を測ることも、その逆も可能になると期待できる。

本論文では、まず、活性汚泥法における凝集様相および凝集能の定量化手法についてふれ、フラクタル次元による凝集様相の定量化手法を述べる。さらに、公共下水処理場から採取した活性汚泥の凝集様相を定量化し、巨視的および微視的な画像における凝集様相の変化の傾向が同様となることから、本手法の有用性を示す。

## 2 フラクタル次元による計測手法

### 2.1 フラクタルの概念

フラクタルとは、特徴的な長さを持たない図形や構造、現象などの総称である。ここでの特徴的な長さとは、球を考えるならばその半径、あるいは人間の形ならば身長というように、そのものに付随する長さのうちの代表的なものを指す。特徴的な長さを持つ図形とは、直方体や円柱、球のような幾何学によく知られた単純な形の組合せによって、その構造がよく近似できるものである。特徴的な長さを持たない図形とは、積乱雲や海岸線や山の起伏、川などの形が挙げられる。

また、フラクタルの重要な性質として自己相似性が挙げられる。自己相似性とは、考えている図形の一部を拡大してみると、全体（あるいは、より大きな部分）と同じような形になっている図形を指す。有名なコッホ曲線やペアノ曲線は完全な自己相似性を有しており、理論的にもフラクタル次元を定義することができる。しかし、凝集現象や銀河の分布などのような自然現象や自然物の構造は必ずしも厳密な自己相似性を持つわけではなく、統計的な意味での自己相似性が成立すると考えられている<sup>4)</sup>。

この意味は、幾何的な量を尺度にするだけでなく、対象が存在するような確率等の尺度であっても構わないことを指す。我々が注目しているのはこの性質であり、厳密な幾何模様でなくても、活性汚泥の分布を存在の尺度としたフラクタル構造と考えることができる。

### 2.2 活性汚泥の凝集作用

活性汚泥の微生物形態のモデルを Fig.1 に示す。活性汚泥の生態系は大きく塊状菌 (zooglear microorganisms) と糸状菌 (filamentous microorganisms) に分けられる。塊状菌は、凝集作用によって互いに結び付き、さらに糸状菌によって、一部分離した粒子も結合して、一体化された状態で沈降し、清澄な上澄み液ができる。Fig.1 に示した沈降過程において、ある程度の凝集が進むと、肉眼でも直接観測できる凝集体となり、さらに凝集体が連なって凝集様相を形成しながら沈降していく。このことから、凝集様相はフラクタル構造であると考えることができる。

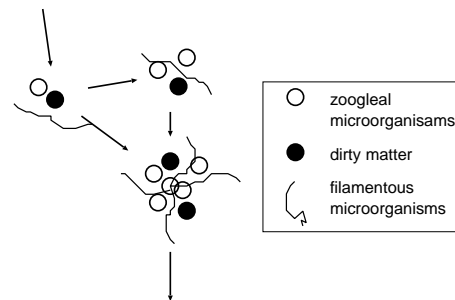


Fig.1 Structure model of activated sludge

Fig.2 に実体顕微鏡を介して撮影した活性汚泥の凝集様相を示す。この図は、実体顕微鏡上の視野において、17.5倍および30倍で観察される活性汚泥の画像を比較したものである。現時点では、活性汚泥における凝集様相は幾何的なフラクタル構造とは断言できず、さらなる検討が必要である。しかしながら、Fig.2 より、凝集体の分布の度合いは見かけ上同程度と考えることができる。このことから我々は、活性汚泥における凝集様相はフラクタル構造をなしているとみなしている。

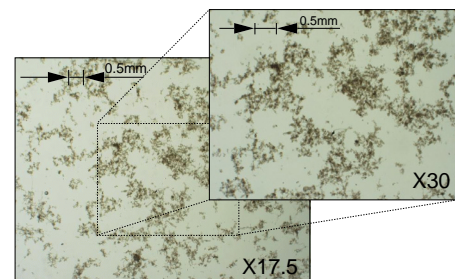


Fig.2 Aspects of activated sludge by micro-scope

2.3 フラクタル次元

フラクタルを定量的に表す方法としてフラクタル次元と呼ばれる考え方がある。その実用的な定義方法として次の5つに分類することができる<sup>4)</sup>。(1)粗視化の度合いを変える方法,(2)測度の関係より求める方法,(3)相関関数より求める方法,(4)分布関数より求める方法,(5)スペクトルより求める方法である。本研究では、画像上の粒子の分布(パターン)に対して有用な粗視化の度合いを変える方法に注目している。

まず、測定の対象画像を一辺の長さ  $r$  の正方形に分割する。その分割した領域において少なくとも1つの点を含むような正方形の個数を数え、 $N(r)$  とする。 $r$  を1から順に変化させる場合に  $r$  と  $N(r)$  との間に

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

なる関係を満たせば、対象画像はフラクタルとみなすことができる。このとき、指数  $Db$  はフラクタル次元または、ボックスカウント次元と呼ばれる<sup>4)</sup>。 $r = 1, 2, \dots, n$  として、 $\log r$  および  $-\log N(r)$  の関係が直線とみなせるとき、最小二乗法によって得られた直線の勾配がフラクタル次元となる。以下、このようにして求めたフラクタル次元を  $Db$  と呼ぶ。

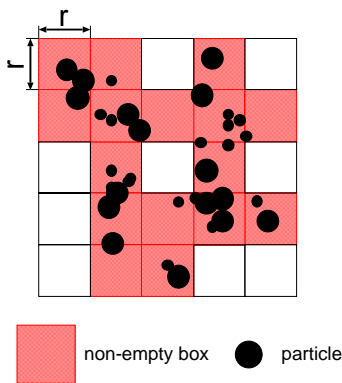


Fig.3 A conceptual figure of fractal dimension

2.4 画像におけるフラクタル次元

Fig.4 は同解像度の画像上で表現され得る凝集様相のモデルであり、両者は、同一数の粒子が分散している。Fig.4における(a)は、粒子の配置が画像全体に広く分布し、各々の粒子間の距離が広くなるように分布している。すなわち、粒子の分散が均一的である。同図(b)は複数の粒子が密接し合い互いに塊となっている。このよ

うに、粒子が占有する面積が同様でも、密集の感じ方は異なる。仮に、両者について  $Db$  を求めたとすると、同じ占有面積であっても、同じ値とはならない。

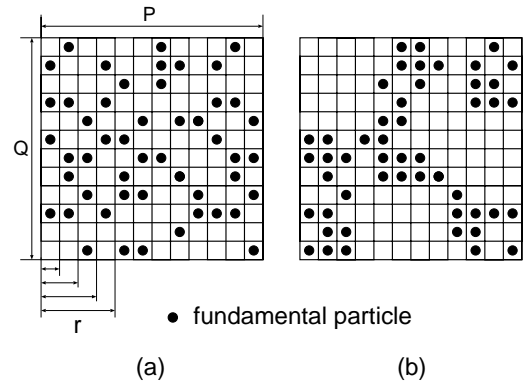


Fig.4 Difference between cohesion aspect models on same occupation ratio

3 フラクタル次元に基づく凝集様相の定量化

3.1 画像撮影システムの構成

本研究では、時間の経過による凝集沈降状態を観測するために、Fig.5 に示す画像撮影システムを構築した。本システムは、容量  $8\ell$  の観測用実験水槽(寸法:高さ

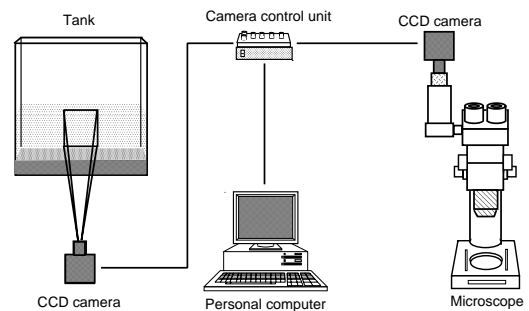


Fig.5 Experimental system

$0.2 \times$  幅  $0.2 \times$  奥行  $0.2 \text{ m}$ ), 3CCD カメラ, カメラコントロールユニット, 実体顕微鏡, そしてパーソナルコンピュータから構成される。

画像処理システムの解像度は  $640 \times 480$  画素であり、各画素は、R(赤), G(緑), B(青)の各 8bit に量子化された値で表現される。本計測システムによって取り込んだ R, G, B 画像の中で、背景の部分と微生物フロックの区別が最もはっきりとしている B 画像を用いて画像処理を行うことにした。

### 3.2 二値化処理

判別分析法 (discriminant analysis)<sup>5)</sup>とは、横軸をデータ値および縦軸を度数とする (ヒストグラム) 場合に、最もクラス分離のよい閾値  $f$  により、そのヒストグラムをクラス 1 およびクラス 2 の 2 つのクラスに分ける手法である。

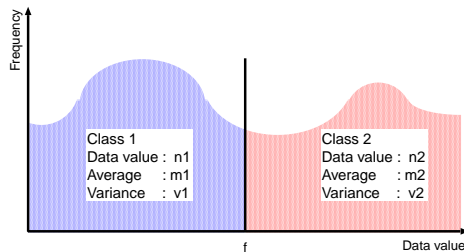


Fig.6 Selection of threshold value by discriminant analysis method

Fig.6 に示す適当な閾値  $f$  を与える場合、2 つのクラスについてそれぞれデータ数を  $n_1, n_2$ 、平均を  $m_1, m_2$  ( $m$  は全体の平均)、分散を  $v_1, v_2$  とすると、クラス内分散  $v_c$  およびクラス間分散  $v_b$  は次式により得られる。

$$v_c = (n_1 \cdot v_1 + n_2 \cdot v_2) / n_1 + n_2 \quad (2)$$

$$v_b = \frac{n_1(m_1 - m)^2 + n_2(m_2 - m)^2}{n_1 + n_2} \\ = \frac{n_1 \cdot n_2(m_1 - m_2)^2}{(n_1 + n_2)^2} \quad (3)$$

ここでクラス分離のよさの尺度は、クラス内分散  $v_c$  を最小化し、クラス間分散  $v_b$  を最大化することに相当し、また  $v_c$  および  $v_b$  はデータ値  $f$  の関数となることを考慮すると、式 (4) の  $R(f)$  を最大化する場合のデータ値が閾値  $f$  として選択できる。

$$R(f) = \frac{v_b(f)}{v_c(f)} \quad (4)$$

判別分析法を用いて二値化処理を行うことにより、画像上における個体粒子の抽出が可能となる。

### 3.3 巨視的および微視的画像における凝集体の抽出

#### 3.3.1 水槽画像 (巨視的凝集様相)

巨視的な凝集様相として水槽内全体に注目した。ただし、水槽全体では、沈降した部分と上澄みの部分とに凝集様相が異なる。本研究では、凝集する部分に注目しているため、十分に沈澱させたときに一様となる沈澱した部分のみを水槽画像として抽出した。水槽画像の抽出領

域は  $500 \times 500$  画素であり、1 画素あたり 290mm である。Fig.7 にその対象領域と水槽画像における二値化画像を示す。

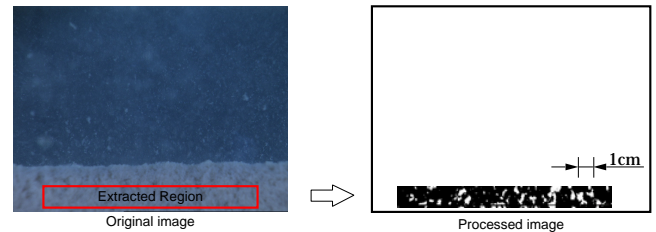


Fig.7 Aspect of activated sludge by macro-view

#### 3.3.2 顕微鏡画像 (微視的凝集様相)

活性汚泥が凝集沈降していく際の顕微鏡を介した画像を撮影するためには、実験水槽から試料を採取する必要がある。このとき、スポイトで採取を行うが、活性汚泥における凝集様相がくずれないように注意しながら、プレパラートの凹部にこれを滴下した。顕微鏡の倍率は、活性汚泥の凝集体が明瞭に観察できる程度の 30 倍とした。撮影される画像の解像度は  $640 \times 480$  画素であり、1 画素あたりの寸法は  $8.6 \mu\text{m}$  である。顕微鏡では、限られた範囲でしか撮影ができないため、撮影場所によって偏りが生じる場合がある。そこで、プレパラート上の三ヶ所を撮影し、それぞれにフラクタル次元  $D_b$  を求め、これらの平均値を求めることにした。Fig.8 に撮影した顕微鏡画像とその二値化画像を示す。

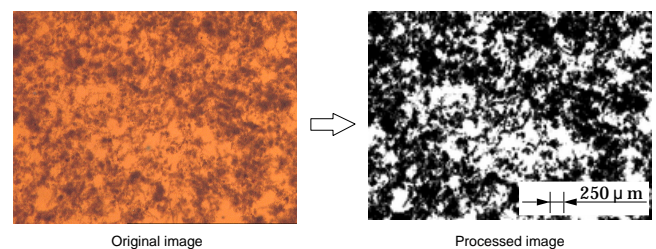


Fig.8 Aspect of activated sludge by micro-view

### 3.4 凝集様相でのフラクタル構造

計測対象がフラクタル構造を有するには式 (1) のような関係が成立しなければならない<sup>4)</sup>。すなわち、 $\log r$  および  $-\log N(r)$  の関係が直線的になる必要がある。直線

的な関係に近ければ相関係数は1に近い値をとり、両者の間に単調な関係がなければ相関係数は0に近くなる。なお、 $\log r$  と  $-\log N(r)$  の関係が直線とみなせるとき、最小二乗法によって得られた直線の勾配がフラクタル次元  $D_b$  となる。

Fig.5を用いて、水槽画像および顕微鏡画像における凝集様相の画像から、 $\log r$  と  $-\log N(r)$  の関係を調べた。粗視化の度合  $r$  は2画素から11画素までの範囲とし、凝集体を含む正方形の総数  $N(r)$  を数えた。

その結果を Fig.9 に示す。この図より、撮影された活性汚泥の凝集様相は、いずれも  $\log r$  と  $-\log N(r)$  の関係が直線となったことから、フラクタル構造とみなすことができる。相関係数はいずれも0.99以上であった。

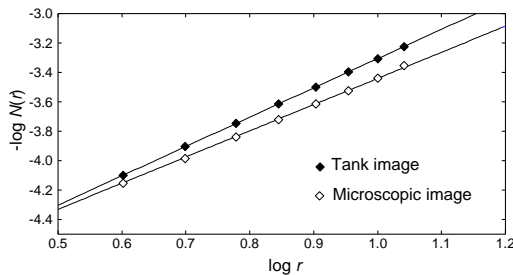


Fig.9 Relationship between  $r$  and  $N(r)$

なお、水槽画像および凝集画像における直線の勾配は異なる。これは、同じ状態の活性汚泥であっても撮影条件によっては多少のばらつきが生じてしまうことを意味する。たとえば、Fig.2では、見かけ上の違いもなく、両者の  $D_b$  を求めると約1.62の値となる。しかし、水槽画像と顕微鏡画像とを比較すると、計測環境に相異があるといわざるを得ない。前者は活性汚泥が三次元空間にあり、かつ自然の状態そのまま計測できるが、後者は活性汚泥が二次元平面に閉じ込められ、さらに採取することによって多少は構造が壊されてしまう。このため、同じ活性汚泥を計測したとしても多少の差は生じてしまう。したがって、この値の差を計測上の誤差と考えることにした。

#### 4 微視と巨視の凝集様相の比較

以上のことから、巨視的凝集様相(水槽画像)と微視的凝集様相(顕微鏡画像)における活性汚泥の凝集様相はフラクタル構造をなしていることが明らかとなった。すなわち、両者いずれの視点であっても同様の凝集様相が見られると考えられる。そこで、両者の対応関係を調べ

るために、同一の活性汚泥試料を用いて凝集沈降実験を行い、水槽画像と顕微鏡画像を撮影し、両者のフラクタル次元  $D_b$  を求め、その関係について考察する。

#### 4.1 実験方法

本実験では、公共下水処理場の曝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、凝集様相が安定(汚泥が十分に沈降)するまでの時間、60分間を観測時間とした。試料の水温は21°C、活性汚泥濃度(MLSS)は1.2g/lであった。

採取した活性汚泥試料を実験用水槽に移し、十分に攪拌させた後、凝集沈降の様子を観察しながら画像の取り込みを行った。水槽画像および顕微鏡画像の撮影は、3分間隔とし、第3章と同様、水槽画像および顕微鏡画像を取得した。なお顕微鏡画像は、同様にプレパラート上の三カ所を撮影した。以上のように、画像を撮影すると同時に、SV測定も行った。凝集様相を時系列に撮影した画像から各々にフラクタル次元  $D_b$  を求めた。

#### 4.2 実験結果

水槽画像と顕微鏡画像におけるフラクタル次元  $D_b$  の時間的変化を Fig.10 に示す。同時に、凝集様相の変化

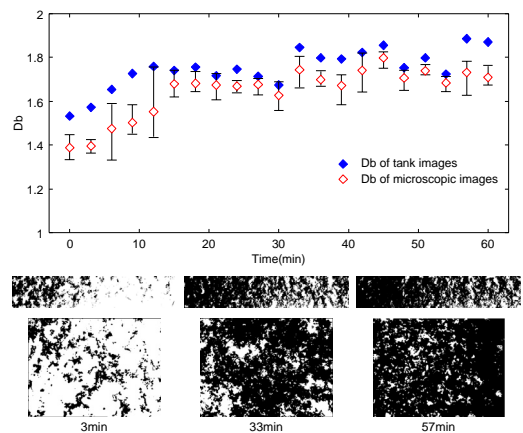


Fig.10 Relationship between time and  $D_b$  with images by macro-view and micro-view

の過程を示すために、3分、33分および57分時に撮影した画像を示す。ここでは、上段の画像が水槽画像であり、下段の画像が顕微鏡画像である。これらの画像のように肉眼で観察することによって、活性汚泥の凝集体が濃くなり、凝集が進行する様子を確認することができた。Fig.11にSVの時間的変化を示す。この図より、活性汚

泥の凝集が進み、界面が次第に低下し、ほぼ安定することがわかった。

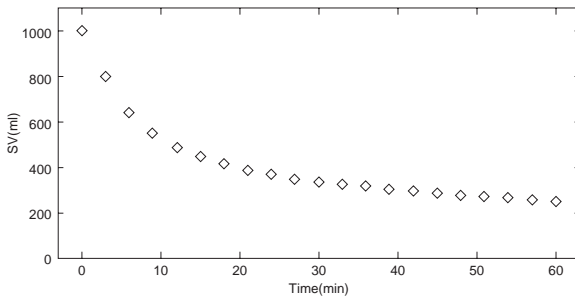


Fig.11 Relationship between SV and time

Fig.10では、フラクタル次元  $Db$  は、おおよそ15分まで比例的に上昇し、その後は、 $Db$  が1.7前後にほぼ飽和した傾向となった。これは活性汚泥の状態がよく、比較的短時間に凝集が十分進行したことを意味する。Fig.11においても、時間とともに界面が低下していることがわかった。図中のSV曲線においても約15分をピークに、以降ならかに界面が低下した。

Fig.10において、水槽画像および顕微鏡画像のフラクタル次元  $Db$  は、多少の計測上の誤差が生じているものの、互いに同様の傾向を示した。これによって、フラクタル次元を適用することによって、計測の視点にとらわれず凝集様相を把握することが可能になるといえる。すなわち、巨視的画像における凝集様相から、微視的な凝集様相を推測することが可能になった。

#### 4.3 考察

まず、水槽画像および顕微鏡画像から計測される凝集様相のフラクタル次元  $Db$  について考察する。Fig.10において、両者のフラクタル次元  $Db$  はほぼ同一傾向を示した。このことから、本研究のねらいどおり、活性汚泥のフラクタル構造の特徴を利用した計測が可能であるといえる。特に、30分および55分あたりでは、フラクタル次元  $Db$  が急激に変化している。

ここで、30分あたりに注目して考察する。Table.1に30分前後の水槽画像と顕微鏡画像の比較を示す。まず、水槽画像の界面が変化していないことから、SVはほぼ安定した状態であることが容易に推察される。しかしながら、30分、33分の順で、凝集体間の隙間がやや広がっていることがわかった。特に、顕微鏡画像をみると明らかに凝集体間の隙間が広がっていることが確認できた。この理由は、凝集体どうしが結合を強化し合うことによ

Tab.1 Comparison between macro and micro images

Time [min]	30	33	36
Macro Images			
Micro Images			

て、それらの間にある小さな凝集体が引きつけられ、この結果、凝集体間の隙間が広がったと考えられる。その後、隙間が大きくなり、自重に耐えられなくなると隙間が崩壊する。すなわち、これが圧密過程となる。このような内部状態の変化は、活性汚泥の凝集様相として表われる。簡単に述べると、凝集様相が粗くまばらになると  $Db$  は低下し、逆に、密で隙間がなくなると  $Db$  は上昇する。このことから、圧密過程にみられる構造の変化は、 $Db$  が上昇した後、徐々に低下し、直後、急激に上昇するというパターンで生じることがわかった。本実験では、30分および55分あたりで圧密過程を観察することができ、その変化を Fig.10 から把握することができた。

また、Table.1において、水槽画像からでは顕微鏡画像ほどの明瞭な差で隙間の違いを認識することはやや難しい。しかしながら、 $Db$  をみると水槽画像、顕微鏡画像ともに、同様の傾向を示している。すなわち、顕微鏡では明確にわかる内部構造の違いを、水槽画像のようなマクロな観察でも判定できる可能性を示唆しているといえる。さらには、これらを Fig.11 の SV の変化と比較しても明かである。SV からでは、圧密過程で観察される内部構造の変化を読み取ることはできない。

本研究での注目すべき成果は、活性汚泥における凝集様相のフラクタル性に注目することによって、凝集様相の定量化を行うだけでなく、計測の視点にとらわれない計測の可能性を示唆したことである。すなわち本手法を適用し、巨視的な凝集様相を観察することによって、汚泥の内部状態を把握することが可能になると期待できる。たとえば、巨視的な観察のみで、活性汚泥における塊状菌と糸状菌の状態を把握できる可能性がある。

## 5 おわりに

本研究では、活性汚泥が凝集沈降する際に生じる複雑な凝集様相に着目し、画像処理技術およびフラクタル理論を適用することによって、活性汚泥における凝集様相の定量化を行った。ここでの主題は、フラクタル次元  $D_b$  を用いて活性汚泥の凝集様相を定量化することであるが、次のことを明確にした。(1) フラクタル構造(自己相似性)の特徴のとおり、巨視的および微視的な画像における両方の凝集様相の傾向がほぼ一致することを明らかにした。すなわちこれは、いかなる計測の視点であっても凝集様相の評価が可能であることを意味する。(2) 本定量化手法による凝集様相の傾向は、活性汚泥法による SV などの指標とよく一致しており、本指標が適用可能であることを示した。

なお、本研究で提案した手法は、粒子群の密集度合いの定量化手法として一般化することが可能である<sup>6)</sup>。本実験では、塊状菌優占の比較的良好な活性汚泥を試料と

した。今後は、本提案の手法を適用し、糸状菌優占等のさまざまな状態の活性汚泥を試料として実験し、フラクタル性を活かした内部状態を把握する方法の開発に着手する予定である。

### 謝辞

本論文を作成するにあたり、本研究室大学院生 赤木祐子氏に協力いただいた。ここに謝意を表する。

### [参考文献]

- 1) 佐藤昌之：下水道工学, 丸善(1980)
- 2) 下水試験方法：日本下水道協会, 283(1984)
- 3) 鈴木一如：活性汚泥微生物の画像確認による下水処理制御, 環境システム計測制御学会誌, 4 (2), 27-40(1999)
- 4) 高安秀樹：フラクタル, 朝倉書店(1986)
- 5) 谷内田正彦：コンピュータビジョン, 丸善(1990)
- 6) 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)