

(19) 活性汚泥プロセスにおける沈殿特性の評価に関する研究

STUDY ON ESTIMATIONS OF SETTLING CHARACTERISTICS
IN THE FULL-SCALE ACTIVATED SLUDGE PROCESS

富士元英二^{*}, 津倉 洋^{*}, 岩堀恵祐^{*}, 松井三郎^{**}

Eiji FUJIMOTO^{*}, Hiroshi TSUGURA^{*},

Keisuke IWAHORI^{*}, Saburo MATSUI^{**}

ABSTRACT; We have developed the sludge settling analyzer which provides with the additional functions to automatically measure the supernatant turbidity in the settling column and to analyze the settling properties from settling curves, besides the measurement of sludge volume index (SVI). Settling test studies using this apparatus were conducted to determine the settling parameters in the full-scale activated sludge process under a variety of operational conditions. As a result, the settling curves can be expressed in the form combined with the two settling zones, that is, both hindered settling and compression regions. These parameters such as initial settling velocity (ISV), Roberts' constant (k_r) and compaction point (t_c , H_c) are shown to be expressed as a function of SVI. It has been found that supernatant turbidity is well correlated with 30 min settled volume (SV₃₀) or ISV. Therefore, these parameters are available for the designs and process controls of the secondary clarifiers.

KEYWORDS: Activated sludge, Sludge volume index, Initial settling velocity, Filamentous organisms, Settling characteristics.

1. はじめに

活性汚泥プロセスの最終沈殿池は、沈殿操作による清澄な上澄水の生産工程と沈殿池底部における活性汚泥の濃縮工程の役割を同時に担っている。しかし、最終沈殿池へ流入する活性汚泥の性状が何らから影響で悪化すると、凝集性不良によるフロック形成能の低下、汚泥密度の減少あるいは圧密性の低下による沈降性の悪化といった現象が生じ、沈殿池での沈泥界面の上昇がおこり、最終的には汚泥が放流水中に流出して、処理水質を悪化させる原因となる。

このような汚泥性状の悪化に対処し、最終沈殿池を効果的に運用するためには、流入してくる活性汚泥について、その沈降特性を把握することが極めて重要なことである。すなわち、沈降特性の評価方法のひとつである汚泥界面沈降試験により、活性汚泥の初期沈降速度 (Initial Settling Velocity, ISV), 圧密

* 機 明 電 舎 開 発 本 部 R & D Division, Meidensha Electric Mfg., Co., Ltd.

** 金沢大学建設工学科 Dept. of Const. & Environ. Engrg., Kanazawa Univ.

点等の沈降特性を表す各種パラメータを測定し、これらの情報から流入水量、流入汚泥濃度、汚泥返送率および引き抜き汚泥量を制御することにより、安定した最終沈殿池の運用を図ることができる¹⁾。

そこで、実用化されてきたSVI計²⁾に、汚泥沈降試験時の上澄水濁度を自動的に計測できる濁度計を装着した新型SVI計を開発した。したがって本研究では、この新型SVI計を都市下水処理場のエアレーションタンク出口に設置して、活性汚泥の沈降状態についての連続試験を行い、測定した各種のパラメータと汚泥特性との関係について検討した。

2. 理 論

活性汚泥の沈降は、その様相により、①自由沈降過程、②等速沈降過程（干渉沈降過程）、③圧密沈降過程に大別することができる。後二者の沈降特性を示す関係式は、これまで多くの研究者により報告されてきた^{2)~6)}が、筆者ら^{7), 8)}は、都市下水を処理する活性汚泥プロセスにおいて、等速沈降過程を1次式、圧密沈降過程をRoberts式でそれぞれ近似できることを報告した。

2.1 等速沈降過程

本実験では等速沈降過程において、粒子が互いに干渉および凝集の影響を受けながら巨視的に形成される汚泥界面 ht が一定速度 Vt で降下していくので、汚泥界面の沈降速度 (dht/dt) は次式で表される。

$$\frac{dht}{dt} = -Vt \quad (1)$$

さらに、 $Ht = ht/h_0$ 、 $At = Vt/h_0$ とおくと、式(1)は式(2)のように変換できる。

$$\frac{dHt}{dt} = -At \quad (2)$$

なお、 h_0 は装置上で決定される定数であり、本実験では $h_0 = 60 \text{ cm}$ であるので数値的には $Vt = At \times 10^{-2}$ [cm/sec]の関係になる。式(2)を積分して、初高 h_0 の違いを考慮した表現形式である無次元汚泥界面高 Ht が式(3)により得られる。

$$Ht = -At \cdot t + bt \quad (3)$$

ここで、 t ：沈降経過時間 [min]、 Ht ：時刻 t における無次元汚泥界面高 (ht/h_0) [%]、 At ：初期沈降速度 (Vt/h_0) [%/min]、 bt ：定数 [%]。

しかし、汚泥性状の違いにより沈降開始後すぐに等速沈降を示す場合と20分以上経過しないと等速沈降を示さない場合があり、後者の場合には式(3)の適用に注意を要する。

2.2 圧密沈降過程

等速沈降過程終了後ただちに圧密沈降過程が始まる場合と、遷移過程を経て圧密沈降過程に達する場合があるが、いずれの場合も圧密沈降過程は、2.1と同様に初高の違いを考慮した表現形式を用いて、実験的に次式で示される。

$$\ln(Ht - H_{\infty}) = -A \cdot t + \ln b \quad (4)$$

ここで、 H_{∞} ：無次元最終汚泥界面高 (h_{∞}/h_0) [%]、 A ：圧密沈降速度 [1/min]、 b ：定数 [%]。

式(4)で示される曲線は圧密点 (tc, Hc) を通るので、 b は次式により算出される。

$$b = \frac{Hc - H_{\infty}}{\exp(-A \cdot tc)} \quad (5)$$

ここで、 tc ：圧密点時刻 [min]、 Hc ： tc における無次元汚泥界面高 (hc/h_0) [%]。式(5)を式(4)に代入すると、

$$\frac{Ht - H_{\infty}}{Hc - H_{\infty}} = \exp[-A \cdot (t - tc)] \quad (6)$$

が得られ、式(4)は Roberts の関係式と一致し、A は Roberts 定数 k_R に相当する。

等速および圧密過程の界面沈降速度は、Robinson の実験式⁹⁾に示されるように Stokes 式の変形とも見なし得るので、 V_t および k_R は汚泥の濃度、密度および粘度等の関数と考えることができる。

一方、初期沈降速度 V_t と汚泥濃度の関係は、一般に次式で表される^{10), 11)}。

$$V_t = \alpha \cdot C^{-\beta} \tag{7}$$

ここで、 V_t : 初期濃度 C での汚泥界面の初期沈降速度 [cm/sec] , C : 汚泥界面沈降試験における初期汚泥濃度 [mg/l] , α , β : 汚泥の密度や粘度等の汚泥物性によって決まる定数。式(7)の関係式は、汚泥を濃縮または希釈して同一の汚泥物性を有する汚泥について汚泥沈降試験を行うことにより得られたものであり、連続試験中に SVI が変化し汚泥の沈降特性が異なる場合には、 α , β および C に影響が現れその関係式を求めることは困難であると考えられる。よってここでは、 α , β および C を含んだマクロ的な指標である SVI と関係づけて V_t を表すことにする。また、圧密沈降速度である Roberts 定数についても同様である。

したがって本論文では、等速沈降過程と圧密沈降過程を組合せて、 ISV および Roberts 定数を中心とした沈降特性を評価するパラメータについて検討した。

3. 実験装置と実験方法

S 下水処理場 (処理水量 : 3 0 0 0 0 m^3 /日, BOD-SS 負荷 : 0.11~0.46 kg-BOD/kg-SS/日) のエアレーションタンク出口付近に SVI 計を設置し、一定のサンプリング周期 (本実験では 5 0 分間) で汚泥界面位置、MLSS 濃度および上澄水濁度を測定し、記録計に出力させるとともに、これらのデータをミニコンピュータに入力し、測定終了時にオンラインでデータ解析^{1), 7), 8)}を行い、その処理結果を出力印字した。

3.1 実験装置

本研究で使用した実験装置は図-1 に示すように、 SVI 計を中心とする汚泥界面測定部と、データの記録および解析計算を行うデータ解析部から構成される。この SVI 計は内径 170 mm、管高 600 mm のガラス製円筒管の側面に界面位置検知用光電管を装着し、汚泥界面の降下に伴い、光電管がそれに追従し界面位置を計測する装置である。また、円筒管の底部には、散乱光比較方式による MLSS 計¹²⁾、上部には近赤外光方式による濁度計¹³⁾の各センサー検出部が取り付けられ、 SVI 計内の各変換器でアナログ信号に変換されたデータが記録計へ伝送される。

この動作手順は、①採水口からエアリフトポンプにより、エアレーションタンク内活性汚泥を一定測定周期ごとに沈降管上端より採水する、②底部から攪拌用のエアが吹き込まれ沈降管内の MLSS 濃度を測定する、③ MLSS 測定後エアを停止し汚泥界面沈降試験を行い、50 分間の界面位置データと上澄水濁度を記録し、④これらのデータをミニコンピュータに入力する、⑤測定終了後沈降管から排泥しブラシ洗浄を行ってから次の測定周期にはいり、同時にコンピュータでデータ解析演算を

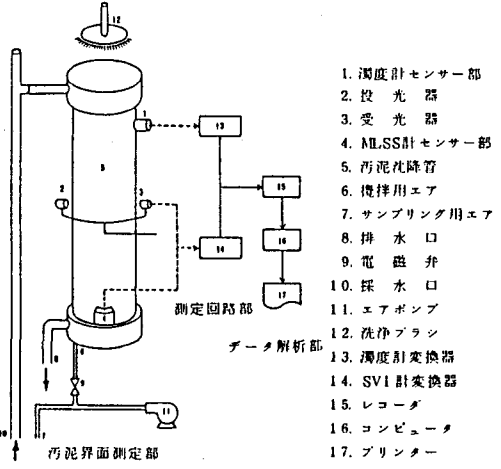


Fig. 1 Diagrams of SVI analyzer

Table 1 Experimental conditions

	制御項目	制御点	設定値
DO一定制御	DO	エアレーションタンク出口	2 mg/l
返送汚泥制御	返送率	返送汚泥ライン	0.2-0.4
引き抜き汚泥制御	SRT	同上	5, 7, 10 days

行い計算結果をプリンタに出力印字する。

3.2 実験方法

実験期間中の活性汚泥プロセスの運転条件を表-1に示す。すなわち、エアレーションタンク出口のDO濃度が 2 mg/l になるようなDO一定制御を行い、汚泥返送率が一定値($0.2 \sim 0.4$)になるようにコントロールを用いて返送汚泥ポンプを制御した。また、返送ラインから引き抜かれる余剰汚泥についても、汚泥滞留時間(SRT)が5, 7, 1.0日と一定になるように引き抜き制御を行った。

このような運転条件のもとで、前記SVI計により、活性汚泥の沈降特性についての連続試験を行った。なお、MLSSおよび濁度の指示値は、実験開始直前に手分析値¹⁴⁾と比較校正したが、実験期間中も約1週間に1回の割合で手分析値との比較を行った。この結果、全期間中両者にはかなり良い相関が認められた。

4. 実験結果および考察

活性汚泥の性状が変化すると、その密度、粘度等の汚泥物性も変化するが、その物性を精度よく、しかも迅速に測定することは困難である。そこで、従来から活性汚泥の特性を総括的に表現できる指標であるSVIを用いて、汚泥沈降特性との関係を論議した。

SVIをパラメータとして、沈降時間 t と $H_t - H_\infty$ の対数関係を示すと図-2, 3の通りである。図-2はSVIが200以下の低SVI領域、図-3はSVIが300以上の高SVI領域であり、圧密開始時間 t_c は各図に破線で示した。図-2の低SVI領域では、SVIが上昇するにつれて、各直線部の傾きで示されるRoberts定数 k_R が低下し、等速沈降速度 A_t も減少することがわかる。また、沈降開始後3~7分と比較的短時間に等速沈降過程が出現した。一方、図-3では、SVIの上昇に伴い A_t は低SVI領域と同様の傾向を示したが、 k_R はSVIの上昇で若干減少するだけであった。また、SVIが300のときの k_R は、SVIが190の場合よりも高い値を示した。

なお、DO濃度は 2.0 mg/l と一定制御を行っており、

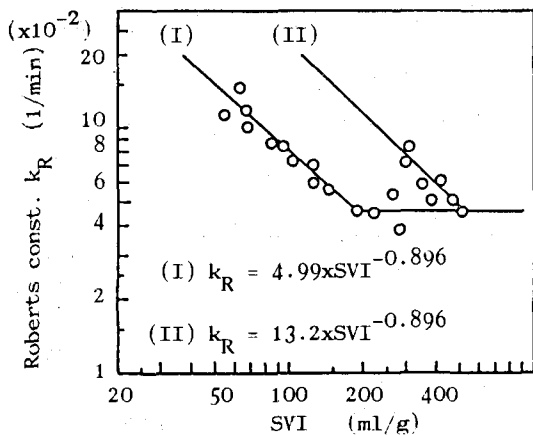


Fig. 4 Relationship of k_R with SVI

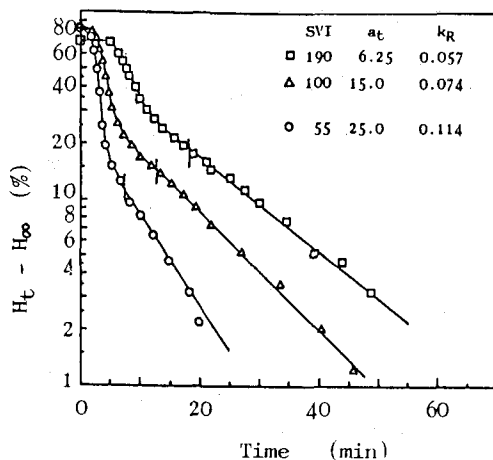


Fig. 2 Semi-log plots of Settling curves

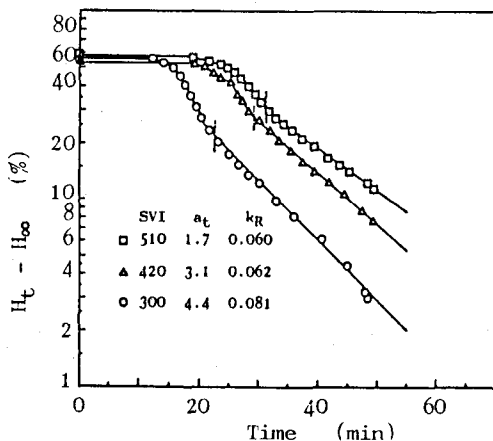


Fig. 3 Semi-log plots of Settling curves

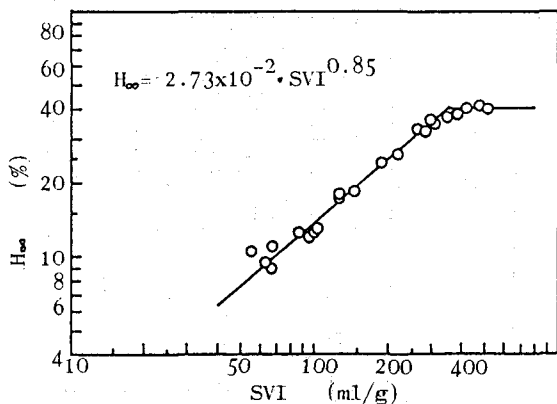


Fig. 5 Relationship of H_{∞} with SVI

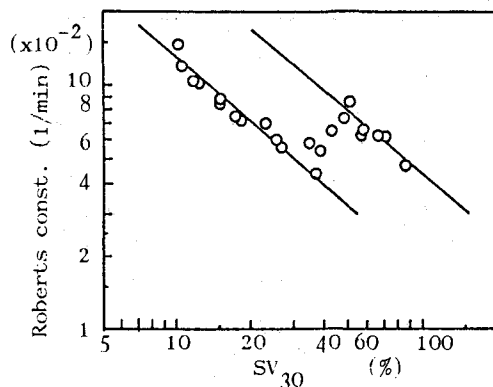


Fig. 6 Relationship of k_R with SVI

また汚泥返送率, SRTともに大きな変化を与えていないため, むしろ他の要因による方が大であると思われる, 汚泥の沈降性への影響は明確には観察されなかった。

4.1 Roberts 定数の変化について

SVI と Roberts 定数 k_R の関係を図-4 に示す。この図から, SVI が 200 付近までは直線 (I) にそって k_R は徐々に減少し, SVI が 300 程度からは直線 (II) にそって, $k_R = 5 \times 10^{-2}$ 程度まで変化することがわかる。また, 図-5 に示した最終界面高 H_{∞} と SVI の関係から明らかなように, SVI が 300 付近までは, H_{∞} は SVI の上昇に伴い SVI の 0.85 乗に比例して増加し, それ以上では, $H_{\infty} = 40\%$ 程度に飽和してくる。このように, SVI が 300 以上になる場合, 沈降パターンが多少変化しても, H_{∞} にはあまり影響がなく, 逆に k_R の変化幅の方が大きいと考えられる。一方, MLSS 濃度を C_A とすると, 図-4 の 2 直線の傾きが -0.896 であることから, $k_R \propto (C_A / SV_{30})^{0.896}$ の関係が成立する。これは, k_R が C_A の 0.896 乗に比例し, SV_{30} の 0.896 乗に反比例することを意味しており, 後者は, 図-6 に図示した結果と一致する。しかし, C_A については, $k_R \propto C_A^{0.896}$ になると予想されるが, 実際に変化した濃度範囲が $1459 \sim 2107 \text{ mg/l}$ と狭いためその傾向がつかめなかった。

流入汚泥濃度が $0.5 \sim 1.5\%$ 程度の変動幅を有する濃縮槽の汚泥を取りあつかう場合は, 濃度の影響は無

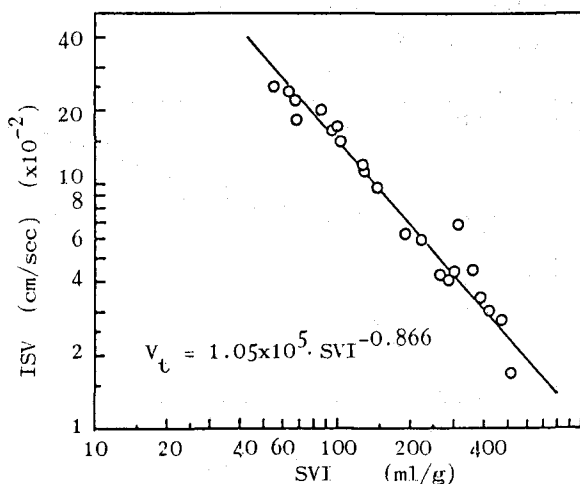


Fig. 7 Relationship of ISV with SVI

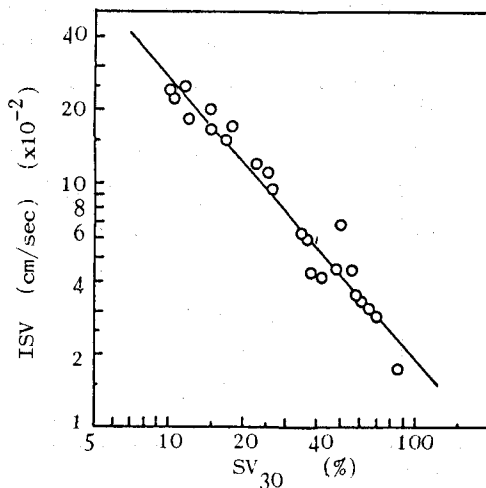


Fig. 8 Relationship of ISV with SV_{30}

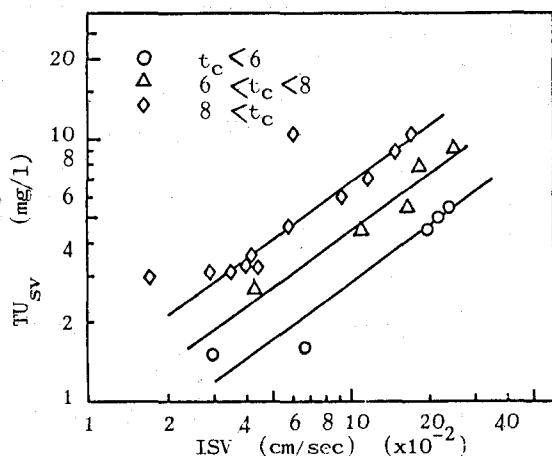


Fig. 9 Relationship between TU_{sv} and ISV

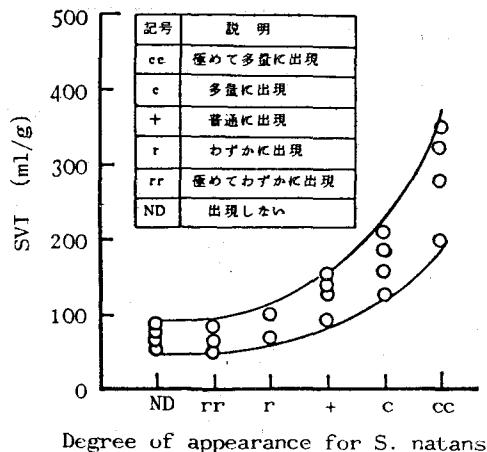


Fig. 10 Relationship between SVI and the appearance for *S. natans*

視できないが、通常の都市下水処理場のエアレーションタンクから最終沈殿池へ流入する場合は、 $MLSS$ 濃度が1500~3000 mg/l 程度の変動であり、この濃度変動による影響は少ないと考えられるので、他の処理施設でも同様な結果が得られると思われる。

4.2 初期沈降速度 (ISV) の変化について

$ISV (At)$ と SVI の関係を図-7に示す。これより、 SVI が上昇するにつれて、 ISV は減少傾向を示し、 $At \propto SVI^{-0.866} = (C_A / SV_{30})^{0.866}$ の関係式が成立する。これは、 k_R と SVI の関係とも類似しており、図-6と同様の結果が期待できる(図-8)。しかし、 ISV を測定する意義は、 SV_{30} が同じでも沈降パターンの異なる活性汚泥の沈降特性を評価するのに有効である点であり、換言すると、この ISV を把握していれば、 SVI があまり変化しない場合の放流水 SS 濃度を評価することができるとと思われる。そこで、沈降管上澄水濁度 (TU_{sv}) と ISV の関係を図示すると図-9の通りである。同じ ISV でも t_c が増加すると、 ISV が高くなるにつれて TU_{sv} が上昇することがわかる。

本実験期間中、エアレーションタンクの活性汚泥混合液を定期的に検鏡した結果、 SVI の増加つまり ISV の減少につれて、*Sphaerotilus natans* が多く観察された(図-10)。このことから、 SVI が200以上のバルキング汚泥では明確な汚泥界面が生じ、上部は清澄な処理水が形成されるという Pipes¹⁵⁾

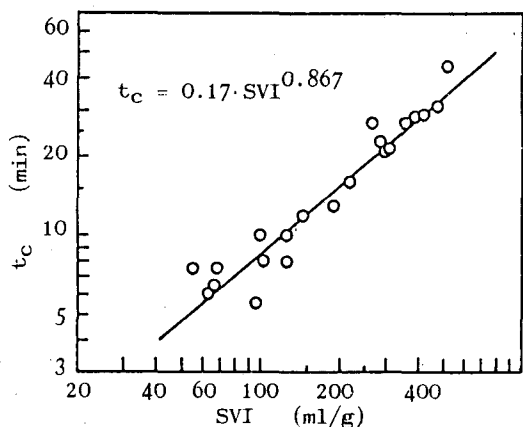


Fig. 11 Relationship of t_c with SVI

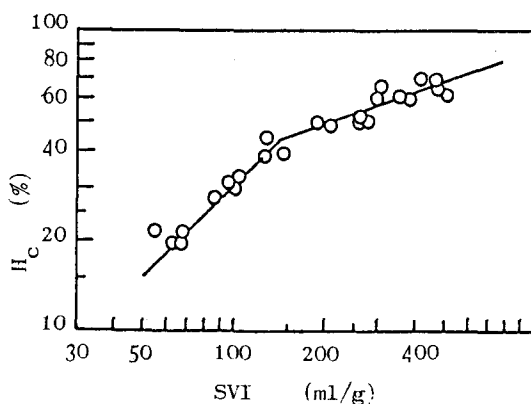


Fig. 12 Relationship between H_c and SVI

の報告と一致していることがわかる。しかし、実際の最終沈殿池では、汚泥の沈降速度ばかりではなく、流下方向への移動速度や上昇速度が存在するので、後二者に影響されない界面沈降試験だけから判定することは難しいといえる。

4.3 H_c 、 t_c および H_∞ の変化について

圧密開始時間 t_c とSVIの関係を図-11に示す。 t_c はSVIの0.867乗に比例して増加し、SVIの指数関数で近似できるといえる。また、図-12には、 t_c における汚泥界面高 H_c とSVIの関係を示す。SVIが150前後で2本の直線関係が存在し、低いSVI域(150以下)に比べ、高いSVI域(150以上)の傾きが小さくなっている。これは、SVIの変化に対する H_c の変化が、SVIが高くなるにつれて減少してい

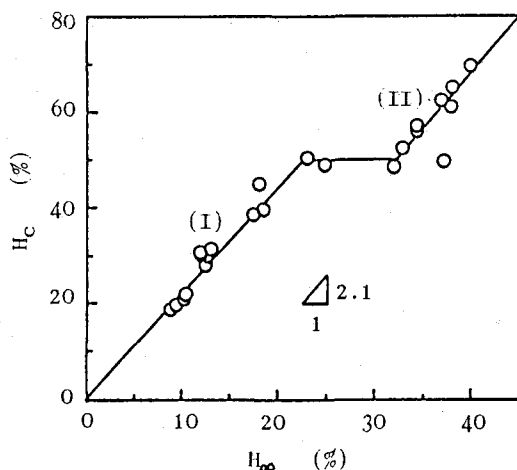


Fig.13 Relationship of H_c with H_∞

ることを意味している。図-11から、SVIが150近傍では t_c が1.3付近である。したがって、 t_c が1.3分以上つまりSVIが150以上の汚泥では、圧密性の低下が著しいことを示唆するものである。

図-13に H_c と H_∞ の関係を示す。 H_∞ が2.2近傍では、傾き2.1の原点を通る直線(I)で近似できるが、 H_∞ が2.2~3.2の間では $H_c = 5.0$ と一定値を示した。また、 H_∞ が3.2以上では直線(I)と同様の傾きをもつ直線(II)と同様の傾きをもつ直線(II)で近似することができる。 $H_c = 5.0$ は、図-12から、SVIが150近傍に相当する。したがって、SVI=150前後で両者の圧密性が異なるものと思われる。

本研究では、奥野の提案した圧密点決定法¹⁶⁾に従って、統計手法を用いながら最初にRoberts定数 k_R を求め、続いて H_∞ 、 t_c 、 H_c を順次決定していった。このような手法で算出された特性パラメータとSVIの関係式は、矩形最終沈殿池における汚泥の滞留状態の把握に利用できると考えられる。

4.4 TU_{SV} の変化について

SV_{30} 、SVIと TU_{SV} の関係を図-14、15にそれぞれ示す。 SV_{30} およびSVIが上昇すると TU_{SV} は低下することが観察された。これは、4.2で議論したことと一致している。図-14と15を比較した場合、 TU_{SV} との相関は SV_{30} の方が高い。これは、MLSS濃度の影響を除いた SV_{30} が初期沈降速度と関係が強いためである。

図-16(a)と(b)に上澄水濁度の変化例を示す。(a)では、 TU_{SV} は1~2分で30 mg/lまで減少し、測定

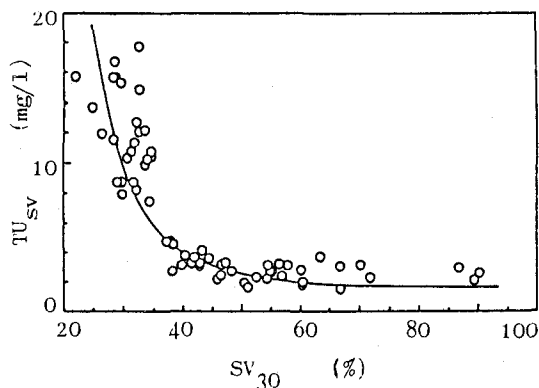


Fig.14 Relationship of TU_{SV} with SV_{30}

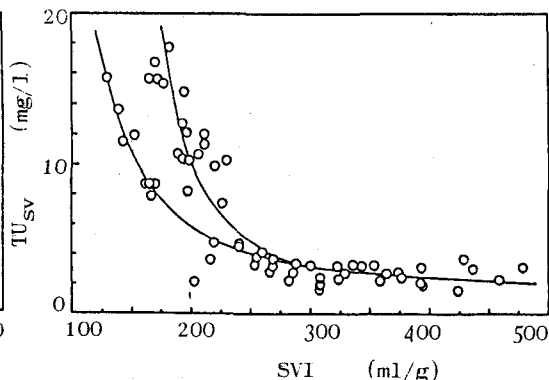


Fig.15 Relationship of TU_{SV} with SVI

終了時に 14 mg/l となっている。一方, (b)では, TU_{sv} は 15 mg/l までに $5 \sim 7$ 分かかっておりそれ以降 5 mg/l まで減少している。よって, 低 SVI 領域 ($SVI < 175$) では, 汚泥フロック間の沈降速度差が増大するため, 粒径の小さな沈降速度のおそい微細汚泥が沈降管上部に残留するものと考えられる。一方, 糸状菌の発生により SVI の上昇がおこる ($SVI > 225$) 場合, 糸状菌によるフロック間の架橋作用が強化され沈降速度も全体的に減少するため, 微小フロックがそれに取り込まれやすくなり TU_{sv} が低下すると思われる。この図から以上のことが予想される。

5. おわりに

汚泥界面沈降曲線, SVI および上澄水濁度を自動的に計測できる SVI 計を, 都市下水処理場のエアレーションタンク出口に設置し, 活性汚泥の沈降状態について連続試験を行った。

得られた汚泥の沈降特性に関する各種のパラメータを検討した結果, その汚泥の沈降特性を表現するためには ISV , t_c , H_∞ および Roberts 定数が有効であることが確認できた。また, 汚泥沈降管の上澄水濁度は SV_{30} および ISV と高い相関関係にあることがわかり, TU_{sv} および ISV を常時モニターすることにより SVI の変化を予測できると考えられる。

したがって, これらの特性パラメータは, 固液分離操作を行う最終沈殿池の滞留汚泥の状態把握および最終沈殿池の汚泥量の制御に応用できるとと思われる。

<参考文献>

- 1) 津倉, 富士元, 松井: 第38回土木学会年次学術講演集(Ⅱ) (1983)
- 2) Matsui, S., Furuya, N.: Prog. Wat. Tech., 12, P.213 (1980)
- 3) Work, L.T., Kohler, A.S.: Industrial and Engineering Chem., 32, P.1329 (1940)
- 4) Roberts, E.J.: Mining Engineering, 1, P.61 (1949)
- 5) Kynch, G.J.: Trans. Faraday Society, 48, P.166 (1952)
- 6) Talmadge, W.P., Fitch, E.B.: Industrial and Engineering Chem., 47, P.38 (1955)
- 7) 津倉, 富士元, 松井: 第17回水質汚濁研究発表会講演集, P.33 (1983)
- 8) 津倉, 富士元, 松井: 第20回下水道研究発表会講演集, P.221 (1983)
- 9) 大竹: 化学工学Ⅱ, P.98, (1962)
- 10) Pitman, A.R.: Journal of WPCF, 52, 3, P.525 (1980)
- 11) Schaffner, M.W., Pipes, W.O.: Journal of WPCF, 50, 1, P.20 (1978)
- 12) 古屋, 富士元, 熊田, 佐藤: 第14回下水道研究発表会講演集, P.525 (1977)
- 13) 熊田, 漆原, 天野: 第19回下水道研究発表会講演集, P.419 (1982)
- 14) 下水試験法, 日本下水道協会編(1974)
- 15) Pipes, O.W.: Advances in Applied Microbiol., 9, P.185 (1967)
- 16) 松井, 田中, 柴田: 下水道協会誌, 15, 171, P.33 (1978)

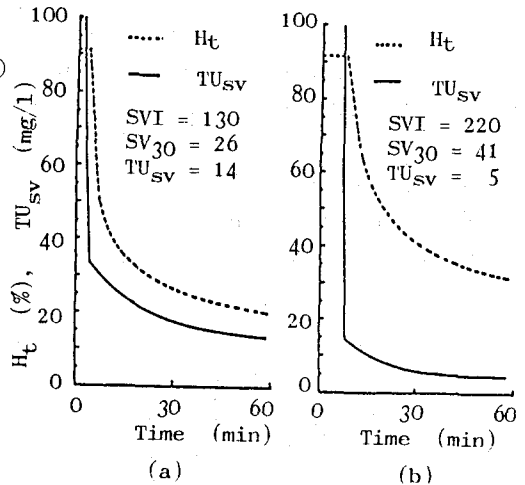


Fig.16 Time-series Variations of TU_{sv}