

(3) 活性汚泥のゾーン沈降速度と SVI の関係

The Relationship between Zone-Settling Velocity of Activated Sludge and SVI

小松和也*、徳富孝明*、西村総介*、田中倫明*、安井英斉*
Kazuya KOMATSU*, Takaaki TOKUTOMI*, Sousuke NISHIMURA*,
Michiaki TANAKA*, Hidenari YASUI*

ABSTRACT; Sludge settling tests using activated sludge from various types of municipal and industrial wastewater treatment plants were carried out to collect the data for zone-settling velocity. The data from 97 separate runs covering 11 different treatment plants were analyzed and the empirical parameters of V_0 and k in Vesilind's equation were estimated. The value of maximum settling velocity (V_0) was found to be almost constant at 7.8 m/hr. On the other hand, value of k was observed to vary and possible to be expressed by a linear function of either Stirred SVI ($SSVI$) or Diluted SVI ($DSVI$). These relationships between value of k and $SSVI$ (or $DSVI$) were observed to be in close agreement to relationships suggested in some earlier reports that were mainly based on data from municipal sludge. These results suggested that such relationships could be valid when further extended to activated sludges of industrial nature. Based on Flux theory and the empirical relations obtained in this study, attainable Sludge Loading Rates (SLR_{max}) in a secondary settling tank were estimated and compared with those predicted through relationships by earlier reports. Based on the comparison studies using $SSVI$ based relationship, a reliable prediction of SLR_{max} can be expected for activated sludge having $SSVI$ value of more than 80 ml/g.

KEYWORDS; Diluted SVI, Secondary settling tank, Sludge loading rate, Stirred SVI, Zone-settling velocity

1. はじめに

活性汚泥プロセスによる排水処理では、プロセスの最終段階で処理水から汚泥を重力分離する。この固液分離操作は一般に最終沈殿池で行われており、プロセスの処理水質は、この分離性能に大きく依存することになる。

最終沈殿池での汚泥の沈降はゾーン沈降が支配的であるが、ゾーン沈降では汚泥粒子はお互いの位置を保ったままゾーンとして沈降し、明確な汚泥界面が形成される。最終沈殿池の固液分離性能を考慮するうえでは汚泥界面の沈降速度、すなわち、ゾーン沈降速度 (Zone-settling velocity) が問題となる。ゾーン沈降速度は汚泥性状のほかに汚泥濃度によって変わり、その表現として Eq. 1 のような Vesilind (1968) の実験式が広く受け入れられている。

$$V = V_0 \exp(-kX) \quad \dots \text{Eq. 1}$$

ここで、 V : ゾーン沈降速度 (m/day)

X : 汚泥濃度 (g/l)

* 栗田工業株式会社 (Kurita Water Industries Ltd.)

V_0 、 k ：定数 (m/day、1/g)

Eq. 1 では汚泥の沈降性が二つの定数 V_0 、 k によって表され、 V_0 が大きいほど、また、 k が小さいほど沈降性の良い汚泥、逆に V_0 が小さいほど、また、 k が大きいほど沈降性の悪い汚泥といえる。

最終沈殿池における汚泥の固液分離を良好に行うためには、沈殿池の固形物負荷(Sludge loading rate : SLR)をその沈殿池で分離可能な最大固形物負荷(SLR_{max})以下で運転する必要がある。 SLR_{max} は汚泥の V_0 、 k がわかっているれば沈降フラックス理論に基づいて算出することができる。

沈降フラックス理論は、汚泥の質量沈降速度 (フラックス) F をもとに沈殿池の流入・流出において物質収支を考えるものである。Yoshioka *et al.* (1957) による方法では、Eq. 2 で与えられる沈殿池内の汚泥のフラックスが一般に汚泥濃度に対してとる極小値が SLR_{max} として求められる。

$$F = X(V + q_R) = X(V_0 \exp(-kX) + q_R) \quad \dots \text{Eq. 2}$$

ここで、 F ：汚泥の質量沈降速度 (フラックス) (kgSS/m².day)

q_R ：返送汚泥の引き抜きによる沈殿池内の下降流速 (m/day)

従って、汚泥の V_0 、 k が得られれば SLR_{max} に基づいて最終沈殿池の設計、運転管理を適切に行うことが可能となる。

しかし、ある汚泥について妥当な V_0 、 k の値を得るには、4～6 段階の汚泥濃度においてゾーン沈降速度を測定する必要があり、後述のように多くの手間と時間を要する。そこで、近年、 V_0 、 k と、より簡易かつ迅速に測定可能な汚泥沈降性の指標である SVI、その修正法である DSVI (Diluted SVI)、SSVI (Stirred SVI) との関係を求める試みがなされている。これら V_0 、 k と SVI 等の関係について Table 1 にまとめた。SVI はその測定に際して汚泥濃度の影響やメスシリンダー壁面の影響を受けることが指摘されている。そのため、より正確に汚泥沈降性を評価できるように、汚泥を希釈してから測定する DSVI、および、メスシリンダー内を緩やかに攪拌しながら測定する SSVI が使われる。

Table 1 List of empirical equation for zone-settling velocity

	Equations (V_0 : m/hr, k : 1/g)	Reference
DSVI	$V_0 = \exp(2.605 - 0.00365DSVI)$, $k = 0.249 + 0.002191DSVI$	Koopman and Cadee (1983)
	$V_0 = e^{2.30854} \exp(-0.00297DSVI)$, $k = 0.29721 + 0.00095DSVI$	Ekama <i>et al.</i> (1995)
	$\ln V_0 = 2.028$, $k = 0.1030 + 0.002555DSVI$	Daigger (1995)
SSVI	Gave V_0 and k values for different ranges of SSVI	Rachwal <i>et al.</i> (1982)
	$V_0/k = 67.9 \exp(-0.016SSVI)$, $k = 0.88 - 0.393 \log(V_0/k)$	Pitman (1980, 1984)
	$V_0 = 15.3 - 0.0615SSVI$, $k = 0.426 - 0.00384SSVI + 0.0000543SSVI^2$	Wahlberg and Keinath (1988)
	$\ln V_0 = 2.076$, $k = 0.0583 + 0.00405SSVI$	Daigger (1995)
	$V_0 = e^{2.45095} \exp(-0.00636SSVI)$, $k = 0.16756 + 0.00218SSVI$	Ekama <i>et al.</i> (1995)
	$V_0 = e^{2.70065} \exp(-0.00808SSVI)$, $k = 0.22632 + 0.00264SSVI$	Ekama <i>et al.</i> (1995)

V_0 、 k と SVI 等の関係式は研究者ごとに大きく異なっているが、これらを用いて SVI から V_0 、 k を求め、さらに最終沈殿池の最大固形物負荷 SLR_{max} を決定するうえではこれらの違いは殆どないようである。実際、Fig. 1 は DSVI 150 ml/g、SSVI 100 ml/g の汚泥について返送汚泥による下降流速 0.4 m/hr における SLR_{max} を計算したものであるが、それぞれの関係式から求めた SLR_{max} は 4.3～5.3 kgSS/m².hr にあつて大きな差はなく、下降流速を 0.2～1.0 m/hr の範囲で与えても同様の傾向を示す。

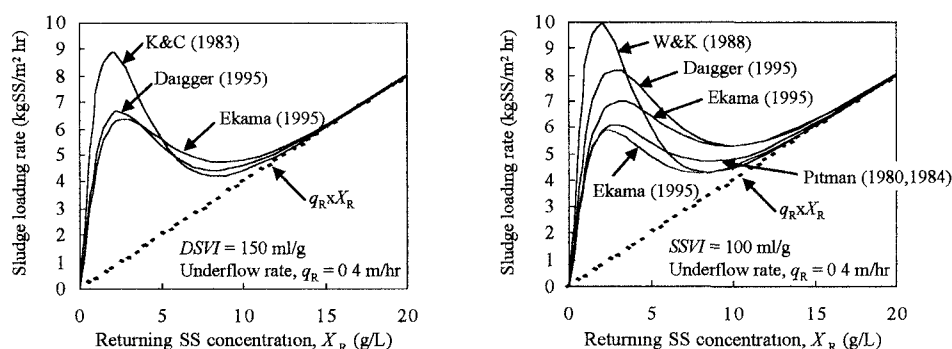


Fig. 1 The prediction of attainable sludge loading rate and its returning SS concentration (assumed $1.5DSVI = SSVI$, from Ekama and Marais (1986))

しかしながら、これらの関係式はほぼ全て似通った流入水質の下水汚泥について求めたものであり、また、異なる研究者が同じデータを用いて論じている場合もあるため、これらの一般的な妥当性を確認するには多種多様な汚泥を対象として確かめる必要があるといえる。

そこで、本研究では、1ヶ所の下水処理施設の2系列および9ヶ所の産業排水処理施設（鉄鋼、製薬、石油化学、自動車製造、食品）の計11種類の汚泥についてゾーン沈降速度と $DSVI$ 、 $SSVI$ を測定し、 V_0 、 k と $DSVI$ 、 $SSVI$ の関係を求め、既存の研究と比較した。

2 試験方法

1ヶ所の下水処理施設の2系列および9ヶ所の産業排水処理施設（鉄鋼、製薬、石油化学、自動車製造、食品）の計11種類の汚泥について、ゾーン沈降速度、 $DSVI$ 、 $SSVI$ を測定した。これらは処理方式によって、(1)BOD除去の標準活性汚泥法（製薬、自動車製造、食品）、(2)好気セクターを付加したBOD除去の二段活性汚泥法（石油化学）、(3)廃硝酸のメタノール添加による脱窒法（鉄鋼）、(4)間欠的に硝化脱窒を行うオキシデーションディッチ法（下水）に分類される。SRTは6.5～35 dayであり、 COD_{α} -SS負荷は0.03～0.47 $COD_{\alpha}/gSS.day$ であった。

ゾーン沈降速度は、Wahlberg & Keinath (1988)に従ってFig. 2に示す高さ1,700 mm、直径125 mmの透明PVC製の沈降速度測定カラムを用いて、カラム内を1 rpmで攪拌しながら測定した。返送汚泥を処理水で希釈して汚泥濃度を数段階に調整し、カラムに満たした。測定前にカラム内を2分間曝気してから静置し、汚泥界面高さの経時変化を測定した。ゾーン沈降速度 V は汚泥界面高さを時間に対してプロットしたときの直線の傾きから求めた。Vesilindの沈降定数 V_0 、 k は、 V の対数 $\ln(V)$ を初期汚泥濃度 X に対してプロットしたときの直線回帰式の切片、傾きからそれぞれ求めた。

$DSVI$ は、 $SV_{30} < 30\%$ となるように汚泥を処理水で希釈して1 Lガラスメスシリンダーにより測定した。 $SSVI$ は曝気槽から採取した汚泥をそのまま用いて、1 Lガラスメスシリンダー内を1 rpmで攪拌しながら測定した。 $SSVI$ を測定した汚泥の濃度は3～5 g/Lの範囲にあった。

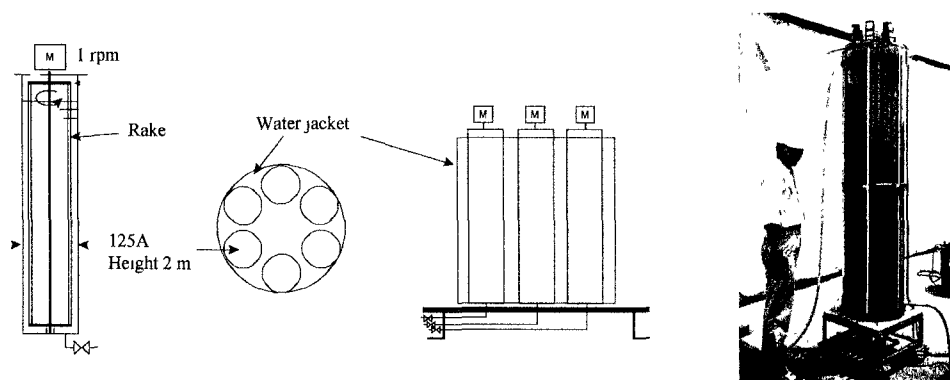


Fig. 2 The measurement apparatus for zone-settling velocity

3. 結果および考察

ゾーン沈降速度を測定した汚泥の濃度、VSS/SS 比、DSVI、SSVI を Table 2 に示す。

Table 2 Data obtained from the wastewater treatment plants

Source of influent	Data sets	SS conc. (g/l)	VSS/SS ratio	DSVI (ml/g)	SSVI (ml/g)
Sewage	53	0.42 – 8.42	0.74 – 0.89	51 – 616	123 – 574
Steel	16	4.05 – 18.8	0.56 – 0.87	46 – 209	Not measured
Pharmaceutical (1)	2	3.62 – 12.5	0.72	103	78
Pharmaceutical (2)	8	1.44 – 9.38	0.83 – 0.95	Not measured	Not measured
Chemical	6	2.84 – 22.3	0.89 – 0.90	82 – 127	56 – 111
Car-manufacturing (1)	2	4.12 – 19.5	0.54 – 0.65	78 – 83	49 – 50
Car-manufacturing (2)	3	1.82 – 8.83	0.65	226	141
Food processing (1)	3	2.62 – 12.3	0.68 – 0.90	126 – 139	79 – 136
Food processing (2)	2	3.53 – 13.4	0.67 – 0.73	70 – 76	53 – 58
Food processing (3)	2	2.45 – 8.94	0.62 – 0.63	102 – 109	75 – 80

ゾーン沈降速度の測定の際、きわめて低い汚泥濃度でははっきりとした汚泥界面が形成されず、また、きわめて高い汚泥濃度では測定を行った2～3時間における汚泥界面の低下が2～3 cm であり、ゾーン沈降速度を決定することが困難であった。しかしながら、汚泥濃度 X とゾーン沈降速度 V の関係を示した Fig. 3 のように、個々のデータ系列について V は X に対して指数関数的に減少しており、いずれも Eq. 1 の Vesilind の沈降速度式で表現することができた。また、 V_0 (Fig. 3 における V 切片) は全てのデータ系列について 200 m/day 付近に集中する傾向が見られた。Daigger (1995) は、Table 1 に示すように、異なる汚泥の V_0 を $\exp(2.028)=7.6$ m/hr =182 m/day または $\exp(2.076)=8.0$ m/hr =192 m/day で一定としてまとめており、Fig. 3 に見られた傾向はこれと対応していた。そこで、これら V_0 の中間値 ($V_0=7.8$ m/hr =187 m/day) を用いて、個々のデータ系列について X と V の関係を直線回帰すると、回帰した直線はもとのデータと高い相関性を示した ($R^2=0.66\sim0.999$ 、平均 0.91、データ系列数 97)。 V_0 が全ての汚泥でほぼ等しくなった理由は現時点で明らかでないが、この値は活性汚泥のような直径 0.2～0.4 mm、密度 1.03～1.05 g/cm³ の球形粒子について Stokes の式から求めた自由沈降速度とほぼ一致する。

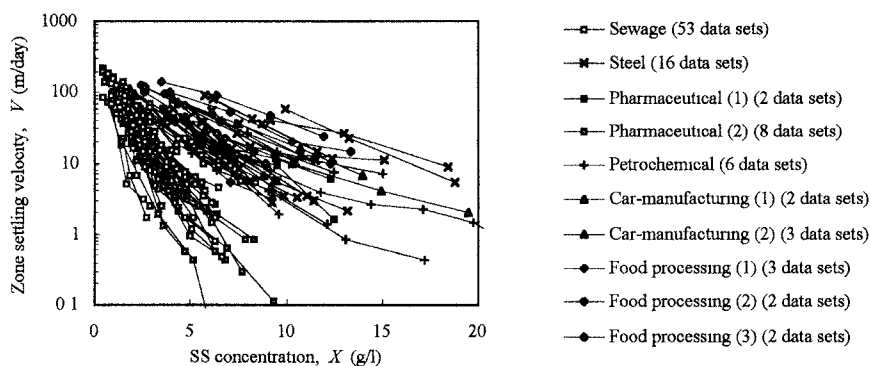


Fig. 3 Relationship between X and V

次に、 X と V の関係を Fig. 4 のように $DSVI$ 、 $SSVI$ の範囲に従って 3 グループに分類すると、 V 切片である V_0 は SVI によらず 200 m/day 付近に集中しているのに対し、傾き k は SVI が大きくなるにつれて大きくなる傾向が見られた。

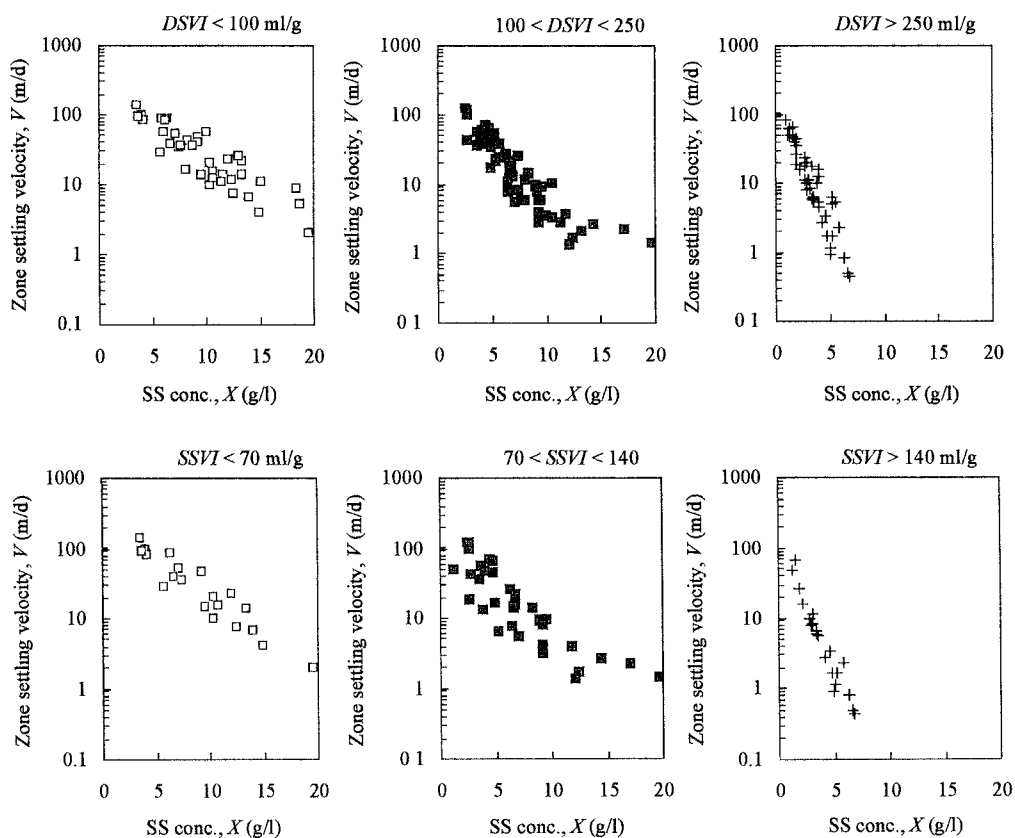


Fig. 4 Relationship between X and V in the SVI group

個々のデータ系列について、 $V_0=7.8 \text{ m/hr}=187 \text{ m/day}$ として直線回帰したときの傾き k を求め、 $DSVI$ 、 $SSVI$ と k の関係を Fig. 5 のように求めた。 k は $DSVI$ 、 $SSVI$ に対し一次的に増加しており、それぞれ

$$k = 0.098 + 0.0024DSVI \quad (R^2=0.72) \quad \cdots \text{Eq. 3}$$

$$k = 0.044 + 0.0041SSVI \quad (R^2=0.92) \quad \cdots \text{Eq. 4}$$

で近似することができた。Daigger (1995) は、 k と SVI の関係について

$$k = 0.1030 + 0.002555DSVI \quad \cdots \text{Eq. 5}$$

$$k = 0.0583 + 0.00405SSVI \quad \cdots \text{Eq. 6}$$

と報告しているが、これらは Fig. 5 中に示すように今回得られた結果とよく一致していた。

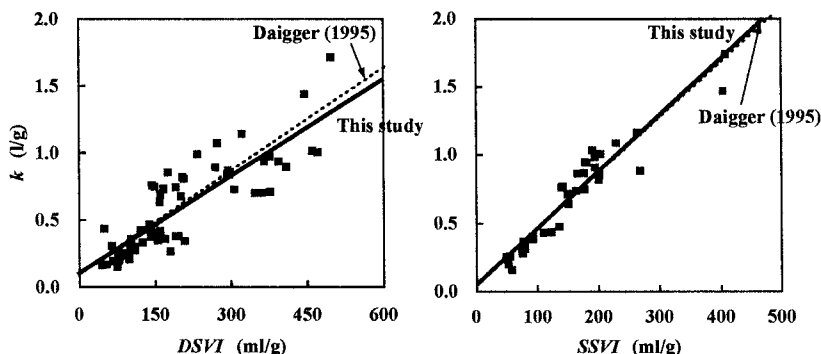


Fig. 5 Relationship between SVI and k

$DSVI$ 、 $SSVI$ から逆に Eq. 3、4 を用いて求めたゾーン沈降速度と沈降カラムにより実測したゾーン沈降速度の比較を Fig. 6 に示す。 $DSVI$ より $SSVI$ を使った Eq. 4 の方がデータのばらつきが少ないことから、汚泥沈降性の指標として $SSVI$ がより適切であると考えられた。また、 1 g/L 以下のような低い濃度では $DSVI$ 、 $SSVI$ のいずれについてもばらつきが大きくなったが、先に述べたとおり、低濃度でのゾーン沈降速度測定の困難さによるものである。

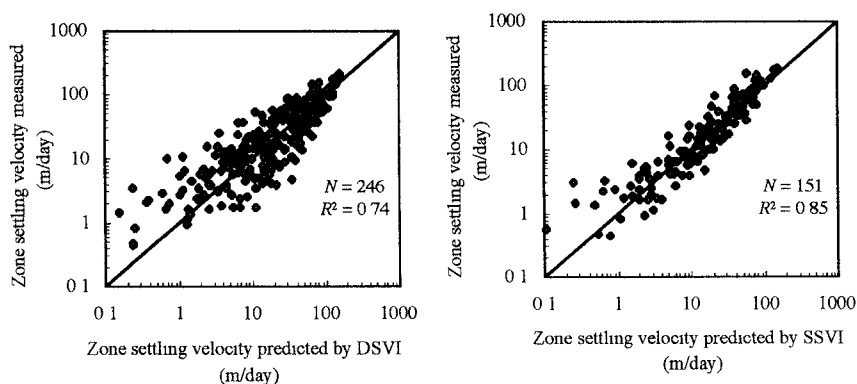


Fig. 6 Relationship between the measured V and the calculated V

次に、フラックス理論に基づいて求めた沈殿池の最大固形物負荷 SLR_{max} を、沈降カラムによる実測から求めたものと、 $DSVI$ 、 $SSVI$ から Eq. 3、4 より算出したゾーン沈降速度から求めたもので比較した。結果を Fig. 7 に示

す。 $DSVI$ 、 $SSVI$ からの算出に基づく SLR_{max} は実測に基づく SLR_{max} とよく一致していた。

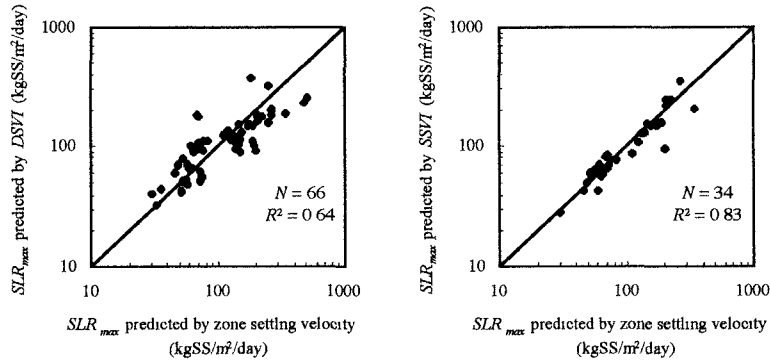


Fig. 7 Comparison of predicted SLR_{max} between by measured zone-settling velocity and calculated from SVI (underflow rate q_R at 9.6 m/day)

$DSVI$ 、 $SSVI$ と SLR_{max} の関係を、返送汚泥による下降流速 4.8、9.6、14.4 m/day の場合について計算した結果を Fig. 8 に示す。図中には比較のため Daigger (1995) の関係式 Eq. 5、6 より求めた関係も合わせて示す。 $DSVI$ ベースでは、本研究で得られた関係は Daigger (1995) とほぼ一致しており、また、 $SSVI$ ベースでは、80 ml/g 以上の範囲でよく一致していたが、80 ml/g 未満では本研究の方が高くなった。

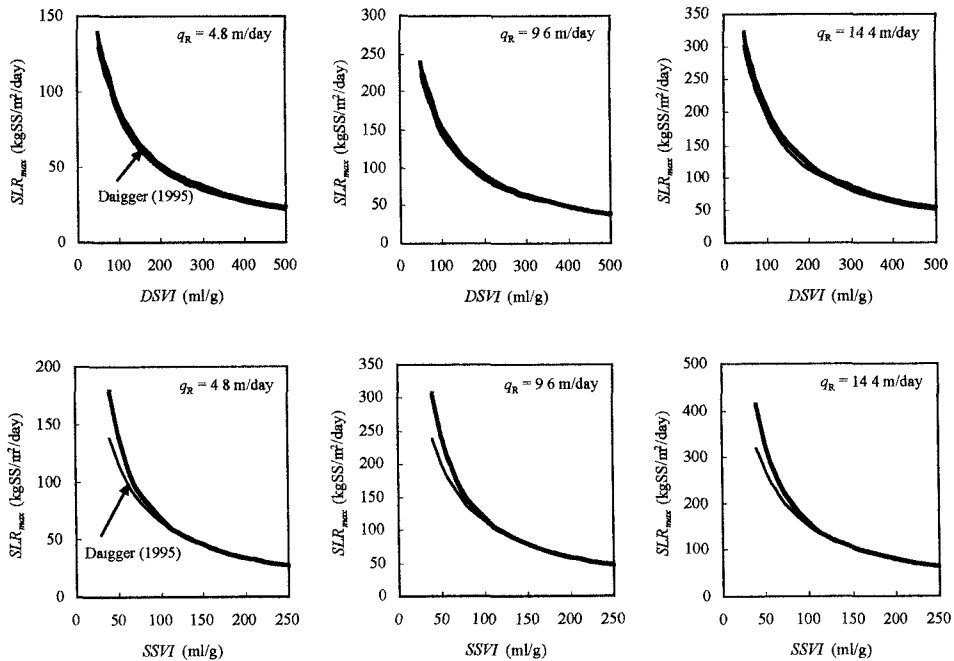


Fig. 8 SLR_{max} against SVIs

以上の結果、汚泥のゾーン沈降速度の近似式として、 V_0 を約 200 m/day の定数、 k を $SSVI$ の一次式（あるいは $DSVI$ の一次式）とした以下の修正 Vesilind 式が提案された。

$$V_0 = 7.80 \text{ (m/hr)} = 187 \text{ (m/day)} \quad \cdots \text{Eq. 7}$$

$$k = 0.044 + 0.0041SSVI \text{ (l/g)} \quad \cdots \text{Eq. 8}$$

$$(k = 0.044 + 0.0041DSVI) \quad \cdots \text{Eq. 9}$$

高い SVI 値を持つ汚泥ほど沈殿池で沈みにくいことは、よく知られた事実である。本研究によって、SVI の値とゾーン沈降速度が対応することが示され、上の点は定量的に裏づけられた。ここでは処理方式が様々な産業排水処理施設から採取した汚泥が主体であったが、この結果は下水汚泥を対象とした Daigger (1995) のレビュー結果と極めて似通っていた。両者を合わせると、調べられた汚泥は延べ 60 種以上にも及び、SVI も 50 ml/g 以下から 500 ml/g 以上に渡る。従って、上で示した関係は一般的な活性汚泥の性質を表すものと推論して差し支えないであろう。

Eq. 7~Eq. 9 は、沈殿池の最適運転条件や設計時の判断に役立つことが期待されるが、これらの精度を上げるためには、データのばらつきを統計的に評価する作業が必要となる。この作業には、上の推論を確かめるためにも、本研究で得られたデータ以外に、文献に報告された数値も加えて検討する必要がある。

一方、Eq. 7~Eq. 9 を利用するうえで留意すべき点は、SVI が静置後の汚泥容積を表した数値であるのに対して、ゾーン沈降速度 V は汚泥フロックの動的な沈降を示すものであって、両者の測定原理が全く異なることである。ゾーン沈降速度を近似的に、 V_0 を一定、 k を SVI の一次式で表すことができたが、SVI とゾーン沈降速度が一定の関係を持つことを理論的に保証する根拠を示すことが今後の検討課題のひとつである。

4. 結論

一般的な活性汚泥について最終沈殿池の最大固形物負荷 SLR_{max} を容易に推定するために、下水、産業排水処理施設の汚泥について、汚泥のゾーン沈降速度を表す二つの定数 V_0 、 k と SVI の修正法である $DSVI$ 、 $SSVI$ との関係求めた。ゾーン沈降速度 V の対数は約 200 m/day の切片 V_0 と、 $DSVI$ 、 $SSVI$ の一次式で表される傾き k の直線で表すことができ、特に $DSVI$ より $SSVI$ の方がデータのばらつきが少なく、指標として適切であった。 $SSVI$ に基づいて求めた SLR_{max} は特に $SSVI > 80 \text{ ml/g}$ のときに実測したゾーン沈降速度から求めた SLR_{max} とよく一致していた。

ゾーン沈降速度の近似式として、Daigger (1995) も示すような、 V_0 を一定、 k を SVI の一次式とするのは、下水汚泥に限らず一般的な活性汚泥の性質を表すものと考えられた。

参考文献

- Daigger G. T. (1995) 'Development of Refined Clarifier Operating Diagrams Using Updated Settling Characteristics Database' *Wat. Environ. Res.*, Vol.67, No.1, 95-100
- Ekama G. A., Barnard J. L., Günthert F. W., Krebs P., McCorquodale J. A., Parker D. S., Wahlberg E. J. (1997) 'Secondary Settling Tanks : Theory, Modeling, Design and Operation' *IWA Scientific and Technical Report* No.6
- Ekama G. A., Marais G. v. R. (1986) 'Sludge Settleability and Secondary Settling Tank Design Procedures' *Wat. Pollut. Control*, Vol.85, No.1, pp.101-113
- Koopman B. L., Cadee K. (1983) 'Prediction of Thickening Capacity Using Diluted Sludge Volume Index' *Wat. Res.* Vol.17, No.10, pp.1421-1431
- Pitman A. R. (1980) 'Settling Properties of Extended Aeration Sludge' *JWPRC*, Vol.52, No.3, pp.524-536

- Pitman A. R. (1984) 'Settling of Nutrient Removal Activated Sludges' *Wat. Sci. Tech.*, Vol.17, pp.493-504
- Rachwal A. J., Johnstone D. W., Hambury M. J., Critchard D. J. (1982) 'The Application of Settleability Tests for the Control of Activated-Sludge Plants', in *Bulking Control of Activated Sludge: Preventative and Remedial Methods*, edit. Chambers B., Tomlinson E. J., Ellis Horwood Ltd. and the Water Research Centre
- Vesilind P. A. (1968) 'Design of Prototype Thickeners from Batch Settling Tests' *Wat. Sewage Wks*, Vol.115, July
- Wahlberg E. J., Keinath T. M. (1988) 'Development of Settling Flux Curves Using SVI' *JWPCF*, Vol.60, No.12, pp.2095-2100
- Yoshioka N., Hotta Y., Tanaka S., Naito S., Tsugami S. (1957) 'Continuous Thickening of Homogenous Flocculated Slurries' *Chem. Engng., Tokyo (Kagaku Kogaku)* Vol.21, pp.66-74