

土木研究所資料

汚泥性状の改善に関する調査報告書(Ⅰ) —汚泥濃縮性評価のための実験手法の提案—

昭和61年 3 月

建設省土木研究所
下水道部汚泥研究室

Copyright ©(1986) by P. W. R. I

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P. W. R. I

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、土木研究所長の承認を得ずしてこれを行ってはならない。

汚泥性状の改善に関する調査報告書 (I)

—汚泥濃縮性評価のための実験手法の提案—

汚泥研究室 京 才 俊 則
櫻 井 克 信
白 石 隆

要 旨

濃縮は汚泥の含水率を低下させ、汚泥容積を減少させる操作である。

濃縮工程は、消化、脱水あるいは汚泥処分の前処理と位置づけられ、濃縮の成否はそれ以降のプロセスの施設容量や経費に大きな影響を与える。本調査は、汚泥の濃縮性とそれに係わる汚泥性状を明らかにし、ひいては汚泥濃縮性改善のための汚泥性状改善手法を明らかにしようとするものである。

本報告書は、その前段として汚泥の性状と重力濃縮性の関連を検討するにあたって必要な沈降速度や濃縮汚泥濃度を回分沈降実験により求める手法についてとりまとめたものである。

なお、この実験手法は重力式汚泥濃縮タンクの管理手法としても使用できる。

キーワード：下水汚泥、重力濃縮、汚泥性状、濃縮性、沈降速度、濃縮汚泥濃度

目 次

1. 重力式汚泥濃縮タンクの機構及び設計基準	1
1.1 重力式汚泥濃縮タンクの機構	1
1.2 重力式汚泥濃縮タンク設計の考え方	2
1.3 重力式汚泥濃縮タンク設計基準	12
2. 濃縮性評価のための回分実験における問題点とその解決手法の提案	15
2.1 回分沈降実験の概要	15
2.2 下水汚泥の濃縮性を評価する指標	17
2.3 統一的な評価手法の必要性	18
2.4 濃縮性評価手法の提案	21
3. 濃縮性評価手法の実施例	26
3.1 実験の装置・器具及び手順	26
3.2 濃縮性評価手法の実施例	31
4. 回分実験装置の形状の考え方	37
4.1 シリンダーの直径	37
4.2 シリンダーの深さ	38
4.3 ピケットフェンス	39
5. 実験データの整理及び解析手法	41
5.1 グラフから直接読みとる方法	41
5.2 最小二乗法による算出方法	52

序

水質汚濁防止施設としての下水道の役割は、下水から汚濁物質を除去し、清澄となった下水（＝処理水）の放流、及び除去した汚濁物質（＝汚泥）の処理処分を適正に行うことである。

汚泥処理の一般的なフローを下图に示す。

それぞれのプロセスの性能を左右するものとしては、それぞれの機器の性能や使用する薬品等の他に、いわゆる汚泥性状がある。

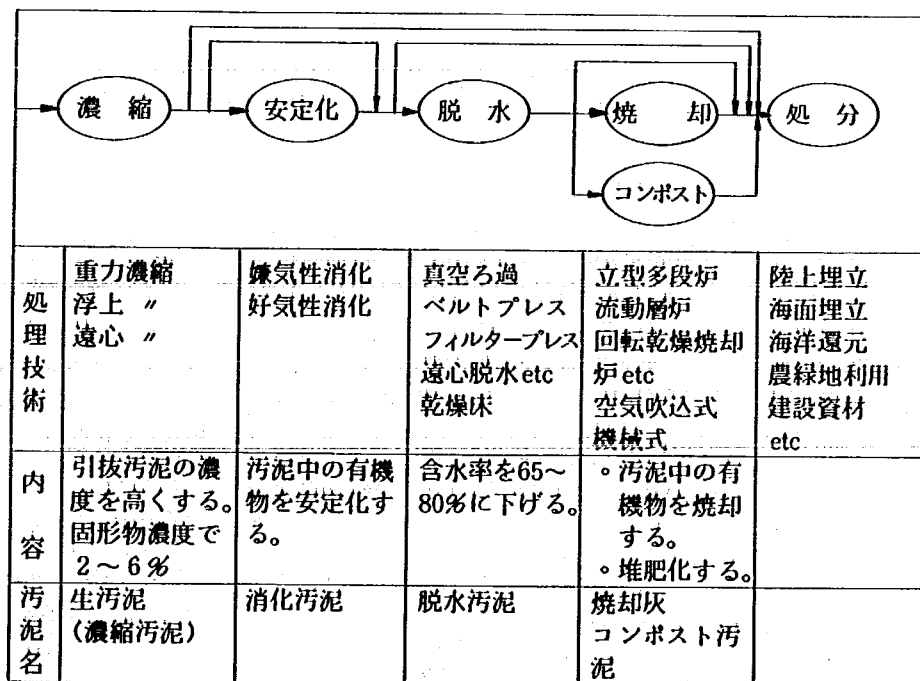
汚泥性状といわれるものには、有機物比、粘度、粒度、pH、みかけ比重、真密度、コロイド当量など種々考えられているが、処理プロセスの性能を左右する汚泥性状及びそれを制御する方法は確立されていない。

本調査は、この処理性能を左右する汚泥性状を明らかにし、さらに、それを制御する方法をみつけ出そうとするものである。処理プロセス毎に着目すべき汚泥性状が異なると考えられるので、当面は濃縮工程を対象とすることとしている。

濃縮は汚泥の含水率を低下させ、汚泥容積を減少させる操作である。濃縮工程は消化、脱水あるいは汚泥処分の前処理と位置づけられるので、濃縮汚泥濃度が低下すると、消化プロセスにおいて加温熱量が増大したり、脱水プロセスにおいて薬品添加量が増大するなどの問題が生じる。

本報告書は、汚泥性状と濃縮性の関連を検討するにあたって必要となる沈降速度や濃縮汚泥濃度を、回分沈降実験により求める手法についてまとめたものである。

なお、この実験手法は濃縮タンクの維持管理にも使用できる。



下水汚泥処理プロセスの概要

1. 重力式汚泥濃縮タンクの機構及び設計基準

1.1 重力式汚泥濃縮タンクの機構

重力濃縮は、一種の沈降操作である。

(1) 沈降の一般的パターン¹⁾

沈降のうち、清澄な越流水 (over flow) を得ることを主目的とする操作を清澄 (clarification) といい、濃い固形物成分すなわちスラッジ (sludge) を上澄水から分離することを主な目的とする操作を濃縮 (thickening) という。濃縮された固形物成分は底部からスラリー (slurry) 状で排出 (under flow) される。

清澄、濃縮のための沈降を粒子群の沈降様式によって分類すると、図 1.1.1 に示すように大別して 4 つの型となる。

懸濁粒子の濃度が低く、粒子が相互に集塊 (flocculate) する性質をもたない時には、粒子の沈降は単独な粒子 (discrete particle) の自由沈降であり、単粒子自由沈降 (I) (discrete particle free settling) と称される。低濃度で、並んで沈降する粒子相互の流線の干渉が無視しうる自由沈降であっても、粒子の大小 (沈降速度の大小) の差によって大きな粒子による追突が行われた際両粒子が合体し、さらに大きな 1 個の粒子に成長沈降していくような状態を、凝集性自由沈降 (II) (flocculent free settling) と称する。

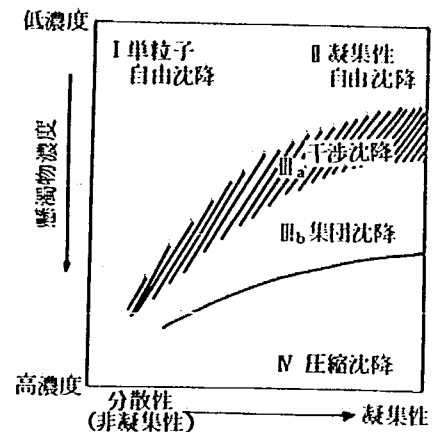


図-1.1.1 沈降様式

各粒子の沈降速度が、他の粒子の存在の影響を受けて、単粒子の自由沈降速度より低下してくるような沈降を干渉沈降 (III) (hindered settling) という。干渉沈降も濃度があまり高くないうちは沈降速度が若干低下するのみで、粒子は個々に沈降しうるが、濃度をさらに増すと粒子間の干渉が激しくなると、粒子は相互にその相対的位置を変えることが難しくなり集合的に一体となって沈降する。このような沈降も広義には干渉沈降であるが狭義に集団沈降 (IIIb) (collective settling) と定義し、個々の粒子運動の可能な範囲での干渉沈降を狭義の干渉沈降 (IIIa) と定義する。粒子群が沈降槽底に沈積し、非常に高い濃度になってくると、個々の粒子が互いに接触し、上方の粒子の重量によって下方の粒子が圧縮変形を受け、余分の水を上方に排出して濃縮していくようになる。このような領域における沈降を圧縮沈降 (IV) (compression settling) と称する。III, IV の領域の沈降様式は凝集性の増大とともに顕著になってくる。

沈砂池、普通沈降池などで領域 (I) が、水平流式薬品沈降池において領域 (II) が、上昇流式のプランケット型接触沈降池などで領域 (III) が、また、これらの沈降池の排泥部分や汚泥処理の濃縮タンクなどでは領域 (III) および (IV) が発現する。

(2) 重力式汚泥濃縮タンク¹⁾

典型的な濃縮タンクの構造は、図-1.1.2 に示される例のようなものである。池の中央または一方か

ら汚泥を供給し、上澄水は表面より越流する。流入した汚泥は図-1.1.2に示されるように、明確な界面を示すような形（界面沈降）で沈降していく。図-1.1.3は回分式沈降による時間と界面の変化の関係を描いたものである。連続式濃縮タンクでは、連続的に汚泥が上部から供給され、底部から濃縮された汚泥が引き出され、上部からは上澄水が越流していくので、図-1.1.2のように上下方向の濃度分布のパターンが常に存在する。すなわち、供給されてくる原汚泥の濃度から、濃縮濃度に至る種々の濃度層が下方に向かって段々と濃度が高まる形で存在している。槽底に沈積した汚泥は、かき寄せ機によって排泥口付近に集められ、水圧、ポンプなどによって排出される。

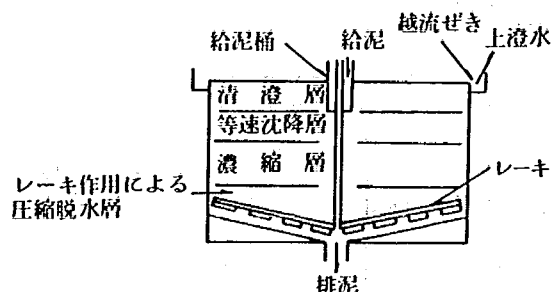


図-1.1.2 重力濃縮タンク

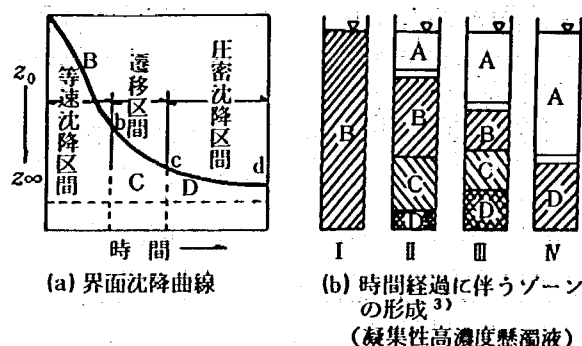


図-1.1.3 界面沈降

(3) 高濃度粒子群（スラリー, slurry）の沈降パターン¹⁾

相当高い濃度の汚泥をシリンダ中に一様に分散するように取り、沈降させると干渉沈降（広義）が見られる。さらに初期濃度を増やすと、始めから集団沈降がみられ、個々の粒子としての沈降はみられない。このような点より高い濃度では上澄液と懸濁液の間に明確な分離界面がみられる層沈降状態となる。

回分沈降において分離界面が時間とともに変化していく状態を図-1.1.3に示す。同図に示すように懸濁液の濃度分布は4つの層に分類される。初期においてこの懸濁液は高さ方向に一様な濃度Bをもっているが、沈降が進むにつれて、きわめて速やかに、上澄液Aと懸濁液の界面ができ、B層は定速度で沈降を続ける。A, B層の界面は粒子群の寸法が一樣なほど明瞭である。B層での懸濁質の沈降速度は一樣であって、群として集団的に行動し、したがって定濃度である。最上層に清澄部Aが生ずるのと反対に、下部にはB層よりもはるかに濃縮されたC, D層が現われてくる。C層は沈積による濃度の増加によって沈降速度が低下してくる遷移域（transition zone）である。濃度がさらに増加してくると、沈積してきた粒子が直接下部に堆積している粒子によって支えられるようになり、粒子の自重によって間隙水が排除される形で、きわめてゆっくりした沈降しか示さないD層が生ずる。このような領域を圧縮域（compression zone）という。

1.2 重力式汚泥濃縮タンクの設計の考え方

(1) 重力式汚泥濃縮タンクの設計因子

I) 評価項目

重力式汚泥濃縮タンクの設計又は運転においては、①濃縮汚泥濃度及び、②固形物回収率が評価指

標となる。

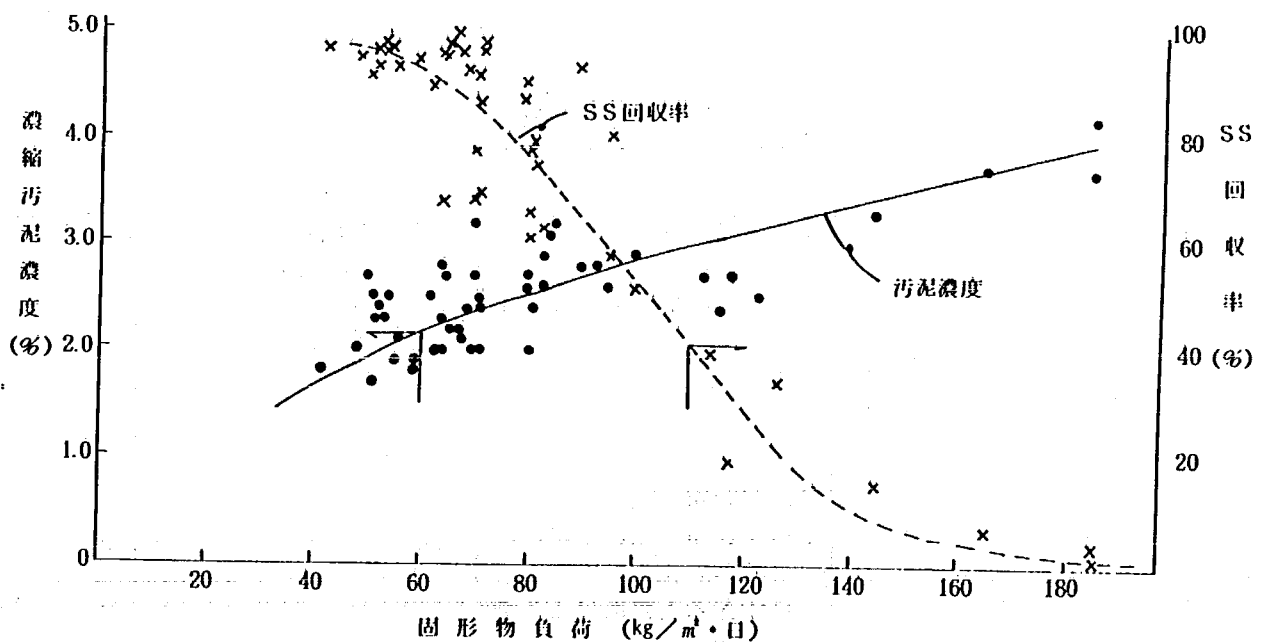
①濃縮汚泥濃度……濃縮汚泥として引き抜かれる汚泥濃度であり、濃縮操作の目的そのものである。これは、タンクの構造及び運転方法によって変化するが、汚泥の特性からくる上限値が存在する。

濃縮汚泥濃度の低下は、後続汚泥処理プロセスでの処理汚泥量を増大させ、施設容量の増大や汚泥処理系統の経費増大を招くことになる。

②固形物回収率……濃縮タンクに投入した汚泥のうち濃縮汚泥として引抜かれる固形物の割合をいう。

固形物回収率が低いということは、上澄水の固形物濃度が高い、つまり、汚泥が水処理系内を循環することになり、ひいては、ポンプ類の運転経費増や処理水の悪化を招く。

この両項目の関係としては、同一汚泥で、固形物回収率が低くなるような運転を行う（固形物負荷を大きくすると、濃縮濃度が増加することが報告されている。これは、高負荷となると、投入汚泥のうち沈降しにくい汚泥粒子が上澄水側に洗い出され、濃縮する汚泥は沈降性のよいものとなるため、このような結果²⁾になると考えられる（図－1.2.1）。



図－1.2.1 固形物負荷と濃縮汚泥濃度、及びSS回収率の関係²⁾

II) 評価項目に関連する濃縮タンク管理因子

固形物回収率の極大化を図るには、すべての汚泥粒子を沈降させる、つまり分離水を清澄なものとするための清澄条件と、タンク内の物質収支を満たし、汚泥界面位置を一定にするための濃縮条件を同時に満足することが必要である。清澄条件として、沈澱池と同様に水面積負荷、濃縮条件としては、固形物負荷という考え方が必要である。

また、実際の重力式汚泥濃縮タンクでは、流入する汚泥の量や質が刻々変化するのでこの変動を吸

収するよう、汚泥界面の位置を制御することが重要となっている。

濃縮現象が圧密であることから、一般的には、注目する汚泥層上部の汚泥層からの有効応力が大きく、その継続時間が長い方が濃縮汚泥濃度は高くなると考えられる。有効応力とは、汚泥層の厚さであり、汚泥界面の位置によって決定される。継続時間は、汚泥滞留時間 (Sludge Retention Time → SRT) ということになる。これらの観点から濃縮タンク水深が決定される。

しかし、汚泥は有機物を多く含むので、嫌気性下に放置されると腐敗する。この腐敗により、ガスが発生し汚泥の濃縮性を悪化させるので、SRT はこの観点から短い方がよいといえる。

今まで述べた評価項目の固形物回収率及び濃縮汚泥濃度と、管理因子の固形物負荷、汚泥界面位置、汚泥滞留時間との関係を表 1.2.1 に示す。

表-1.2.1 評価項目、管理因子、設計項目との関係

評 価 項 目	管 理 因 子	設 計 項 目
固 形 物 回 収 率	(水面積負荷) → 固形物負荷	→ タンク面積
	(水面 (越流堰) との距離が大きい方がよい)	
濃 縮 汚 泥 濃 度	→ 汚泥界面位置 (汚泥深が大きい方がよい)	→ タンク水深 (有効水深)
	→ 汚泥滞留時間 (短すぎると圧密不足による濃縮悪化、 長すぎると腐敗による濃縮悪化)	

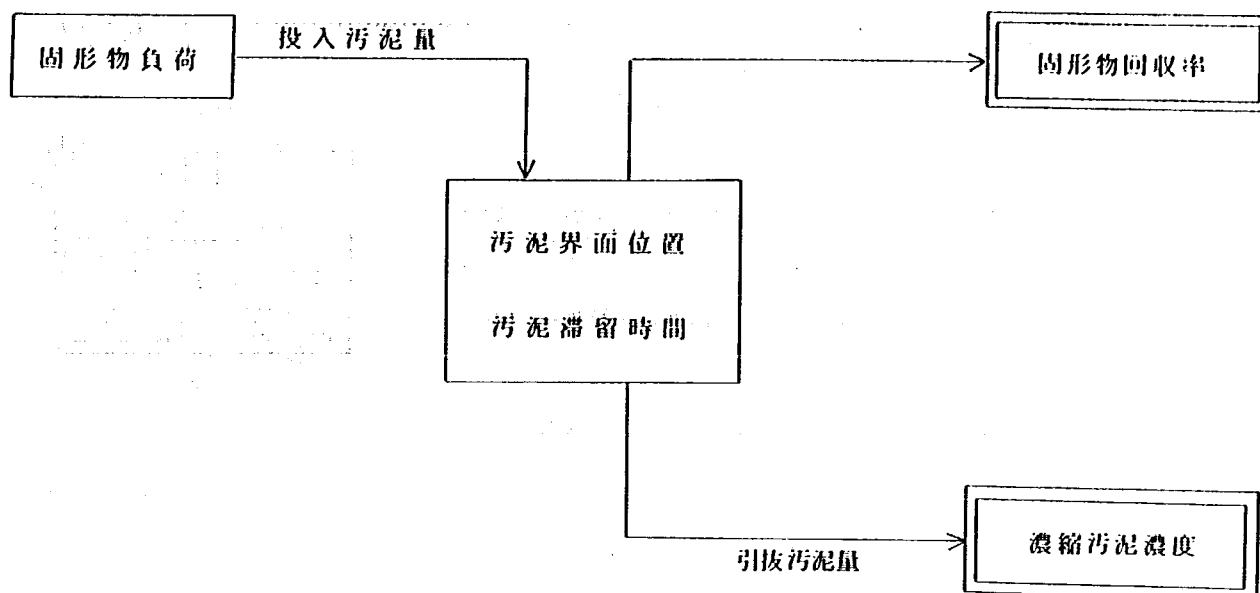


図-1.2.2 管理因子間及び評価項目の相互関係

固形物回収率及び濃縮汚泥濃度を目標として濃縮システムを管理するわけであるが、前述の管理因子の3つをすべて独立変数として操作することはできない。固形物負荷、すなわち投入汚泥量は、ポンプ類の操作によって制御できる。また汚泥界面の位置は、固形物負荷つまり投入汚泥量と引抜き汚泥量の操作によって制御できる。

しかし、タンク内に滞留している汚泥層の濃度分布は汚泥の特性によって大きく異なり、任意に設定することができないので、汚泥滞留時間のみを制御することはできない。しかし、他の2つの因子を制御することによってある程度汚泥滞留時間を制御することができる。

以下に、水面積負荷、固形物負荷について説明する。以下、Cは濃度、Qは流量、添字oは流入、uは引抜、eは越流を表わす。

①水面積負荷³⁾

濃縮タンクに流入した汚泥は汚泥粒子と清澄水に分離し、清澄水は上方の越流堰に向かって上昇する。すべての汚泥粒子を回収するためには、汚泥の沈降速度 (v , m/日) が水の上昇速度 (v_e , m/日) よりも速くなくてはならない。

$$v \geq v_e \quad \dots\dots\dots (1.2.1)$$

濃縮タンクの面積を A (m²)、上澄水流量を Q_e (m³/日) とすると、

$$v_e = \frac{Q_e}{A} \quad \dots\dots\dots (1.2.2)$$

であるから、式 (1.2.1) より、

$$v \geq \frac{Q_e}{A} = \frac{Q_o - Q_u}{A} \quad \dots\dots\dots (1.2.3)$$

が得られる。式(1.2.3)の右辺を水面積負荷とよぶ。

②固形物負荷³⁾

濃縮タンクに流入した汚泥と等量の汚泥が引き抜かれないと、汚泥はタンク内に蓄積して界面が上昇し、しまいには清澄水と共に越流するか、または界面が低下して低濃度の汚泥を引き抜くことになる。

濃縮タンクの水分と固形物の物質収支は、汚泥の密度を ρ_s とすると、それぞれ、

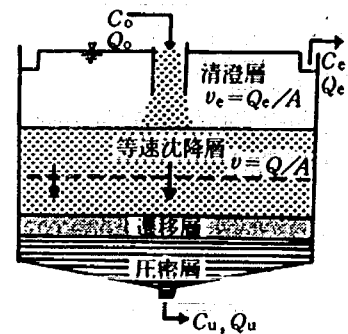


図-1.2.3 濃縮タンクのマスバランス

$$\text{水の収支} \quad Q_o \left(1 - \frac{C_o}{\rho_s}\right) = Q_e \left(1 - \frac{C_e}{\rho_s}\right) + Q_u \left(1 - \frac{C_u}{\rho_s}\right) \quad \dots\dots\dots (1.2.4)$$

$$\text{固形物の収支} \quad \frac{Q_o C_o}{\rho_s} = \frac{Q_e C_e + Q_u C_u}{\rho_s} \quad \dots\dots\dots (1.2.5)$$

である。いま、 $C_e \div 0$ とすると、それぞれ

$$Q_o \left(1 - \frac{C_o}{\rho_s}\right) - Q_u \left(1 - \frac{C_u}{\rho_s}\right) = 0 \quad \dots\dots\dots (1.2.6)$$

$$Q_o C_o = Q_u C_u \quad \dots\dots\dots (1.2.7)$$

である。式(1.2.7)の左辺は投入固形物量であり、単位面積当たりにかかる固形物量 $Q_o C_o/A$ を固形物負荷(ソリッドフラックス)Gという。

Ⅲ) 設計項目

濃縮タンクの形状は、中心に汚泥を集める方式を採用することから、円形となっているものが多い。(一部にはタンク底のみ円錐形にし上部は正方形のものも見られる。)その諸元は、前節で述べたような管理因子から、①水面積(タンクの径)及び、②有効水深(タンクの深さ)が決められる(表-1.2.1)。

水面積は、投入する汚泥量と固形物負荷から計算される。また、有効水深は、圧密に必要な汚泥深又は汚泥滞留時間と、十分な清澄域を確保する観点から決められる。

この他、濃縮タンクの設計については、次のような項目が重要である。

③底部勾配(かき寄せ機の有無によって大きく異なる)

④かき寄せ機(ピケットフェンス有無、構造)

⑤投入・引抜部の構造

⑥配管口径及びポンプ能力

以下に、簡単にこれらの項目と濃縮タンクでの役割を述べる。

a. 実施設の濃縮タンクでは、底部に濃縮した汚泥を中央部から引抜くため、タンク中央部まで濃縮された汚泥を乱さずに、かき寄せなければならないこと。——項目 ③、④

- b. 投入にあたっては、十分に投入汚泥が拡散され、短絡流が生じないこと。引抜きにあたっては、かき寄せられ、濃縮された部分だけを引抜き、余計な部分を引抜かないこと。——項目 ⑤, ⑥
- c. 汚泥層に適度な乱れを与え濃縮を促進させること及び、発生したガスによる汚泥の浮上を防ぐため付着した気泡を離脱させること。——項目 ④

(2) 重力式汚泥濃縮タンクの設計理論

下水汚泥の濃縮タンクの設計方法として、次のようなものが提案されている。

I) 面積の決め方

濃縮タンクの設計理論のうち、下水汚泥のような圧縮性のものに適用され得る①コー・クレベンガー (Coe-Clevenger) 計算法及び②吉岡らの方法を述べる。

①コー・クレベンガー計算法⁴⁾

濃縮タンク内の水分、固形物の物質収支について、 $C_e = 0$ とした式を再掲する。

$$Q_o \left(1 - \frac{C_o}{\rho_s}\right) - Q_u \left(1 - \frac{C_u}{\rho_s}\right) = Q_e \quad (1.2.6)$$

$$Q_o C_o = Q_u C_u \quad (1.2.7)$$

ここで (1.2.6) 式に

$$Q_e = v_e A \quad (1.2.2)$$

$$Q_u = \frac{Q_o C_o}{C_u} \quad (1.2.7')$$

を用い整理すると

$$Q_o \left(1 - \frac{C_o}{\rho_s}\right) - \frac{Q_o C_o}{C_u} \left(1 - \frac{C_u}{\rho_s}\right) = v_e A$$

$$Q_o - \frac{Q_o C_o}{C_u} = v_e A$$

$$Q_o C_o \left(\frac{1}{C_o} - \frac{1}{C_u}\right) = v_e A$$

$$\frac{Q_o C_o}{A} = \frac{v_e}{\frac{1}{C_o} - \frac{1}{C_u}} \quad (1.2.8)$$

左辺 $\frac{Q_o C_o}{A}$ は固形物質負荷 G である。

濃縮が順調に進行するためには、(1.2.8) 式の関係が汚泥層の任意の部分で成立しなければならない。

濃度 C_i の部分での上昇流速 v_i 、汚泥量 Q_i とすると、

$$\frac{Q_i C_i}{A} = \frac{v_i}{\frac{1}{C_i} - \frac{1}{C_u}} = \frac{Q_o C_o}{A} \quad \left(\because C_e = 0, \therefore Q_i C_i = Q_o C_o \right)$$

$$A = \frac{Q_o C_o}{v_i} \left(\frac{1}{C_i} - \frac{1}{C_u} \right) \quad \dots\dots\dots (1.2.9)$$

となる。

濃縮タンク面積としては、投入濃度から引抜濃度までの濃度(C_i)について 汚泥の沈降速度(v_i)を求め、(1.2.9)式により算出される面積(A)のうち最大のものを採用する。

②吉岡らの方法³⁾

濃縮タンクに流入した汚泥は、①沈降濃縮および②汚泥の引抜操作によって、タンクの底部に到達する。タンク内の任意深さの単位面積を単位時間に通過する固形物量 (全フラックス, G , $Kg/m^2/日$) は沈降フラックス (G_s , $Kg/m^2/日$) と引抜フラックス (G_u , $Kg/m^2/日$) の和であり、次式で表わされる。

$$G = G_s + G_u = c_i (v_i + u) \quad \dots\dots\dots (1.2.10)$$

ここで、 v_i は濃度 c_i なる汚泥の沈降速度 (m/日) であり、 u は引抜速度 (m/日) である。

処理水と共に流出する汚泥量を無視すると、

$$u = \frac{Q_u}{A} = \frac{1}{A} \cdot \frac{Q_o C_o}{C_u} = \frac{Q_o C_o}{A} \cdot \frac{1}{C_u} = \frac{G}{C_u} \quad \dots\dots\dots (1.2.11)$$

式 (1.2.10, 1.2.11) より、

$$G = C \left(v + \frac{G}{C_u} \right) \quad \dots\dots\dots (1.2.12)$$

G について整理し、 $G = Q_o C_o / A$ を代入すると、

$$A = \frac{Q_o C_o}{v} \left(\frac{1}{C} - \frac{1}{C_u} \right) \quad \dots\dots\dots (1.2.13)$$

となり、コーらと同形の式を得る。

吉岡らは図 1.2.4 に示す図解法を提案した。多数の沈降実験で測定した沈降速度から求めた沈降フラックス(1)と、引拔量を仮定して求めた引抜フラックス(2)を合成し、全フラックス(3)を作図する。

いま、濃度 C_o の汚泥が流量 Q_o' ($> Q_o$) で投入され、その時の引抜速度が Q_u であるとする。上澄水が清澄であるためには、 $C_u' = C_o Q_o' / Q_u$ となり、引抜濃度が図 1.2.5 の C_u' ($> C_u$) でなければならない。しかし、濃縮タンクのある断面では C_{mu} より濃くなり得ず、引抜濃度も C_u より濃くなり得ない。

したがって、 $C_o Q_o' - C_u Q_u$ なる固形物量がタンク内に蓄積するような過負荷状態にある。この図に示す運転条件での適正負荷量は、 $C_o Q_o / A$ であって、これを限界フラックス (G_{max}) と呼ぶ。また、 $Q_o' < Q_o$ なる時は低負荷であり、濃縮タンクは余力をもっている。

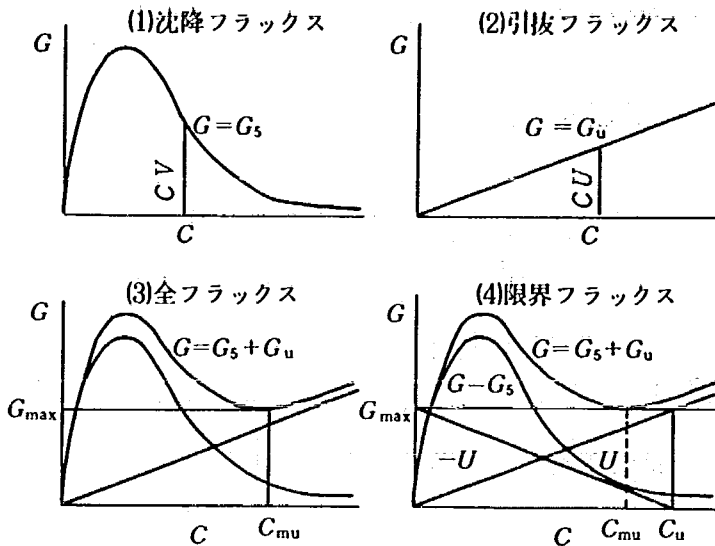


図-1.2.4 ソリッドフラックス

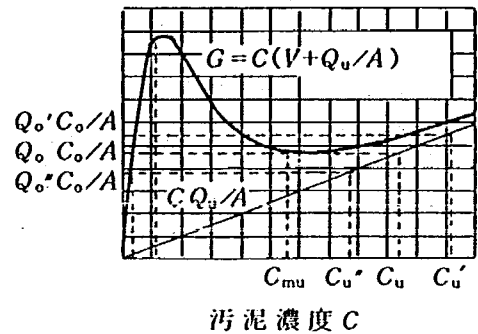


図-1.2.5 限界フラックス

このようにして求めた関係は、

$$\frac{A}{C_0 Q_0} = \left[\frac{1}{v} \left(\frac{1}{C} - \frac{1}{C_u} \right) \right]_{\max} \quad (1.2.13')$$

と書け、引拔量（引拔汚泥濃度）を変化させ、投入量及び引拔汚泥濃度の組合せのうち、目的とする面積を選択するという事でコーラの方法とまったく同じことになる。

吉岡らはさらに、図 1.2.4 (4) に示す関係を明らかにした。すなわち、 $C - G$ 平面に $G = G_s$ を描き、 $G_{\max}$ を通り曲線に接線を引くと、その接線の勾配は $-u$ になる。したがって、図 1.2.4 (3) のように試行錯誤的に $G_{\max}$ 、 C_{μ} を求めた後に C_u を得るまでもなく、 $G = G_s$ に適当な接線を引くことによって、固形物負荷量、引拔速度、引拔濃度の関係が容易に求められる。以上の関係は、式 (1.2.10, 1.2.11) から導かれる次のフラックス方程式で表わされる。

$$G_s = G - \frac{G}{C_u} \cdot C \quad \text{または} \quad G_s = G - u \cdot C \quad (1.2.14)$$

II) 深さの決め方¹⁾

濃縮タンクの深さを決める要素は、

- ①給泥 (feed) された原スラリーによる乱れが濃縮層に影響を与えず、越流上澄水に給泥の乱れが及ばないように、等速沈降層上澄層厚さを決める (図-1.2.2.)、
 - ②濃縮層に余裕高をもたせ、避けえない給泥量の変動による濃縮層厚の変化をこの余裕高の範囲にとどめ、給泥量が増加してもスラリーが越流せぬよう、また給泥量が減少しても稀薄なスラリーが底部から排出されることのないようにする、
 - ③必要な排泥の濃度 C_u に達するに充分な圧密時間を与える容積をもつ、
- といったことである。

これらのすべてを考えた合理的な設計法はまだない。

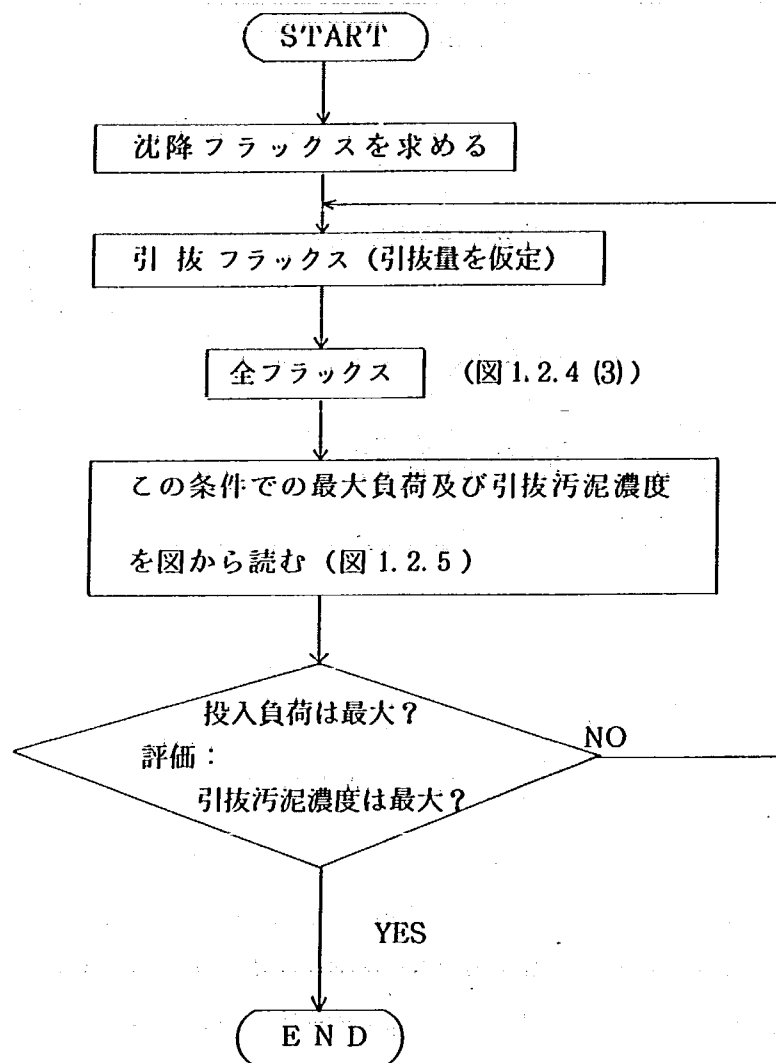


図-1.2.6 吉岡らの方法(1)の計算フロー

参考⁵⁾：以下に濃縮理論から導かれる深さの決定法を示す。

1. コー・クレベンガーの方法

排泥濃度がスラッジ堆積深さに関係せず，滞留時間によって定まるとしてスラッジ層高を求める方法である。

固体処理量を S (kg/h)，目標排泥濃度に到達するに要する滞留時間を t_D とすると，

$$\text{槽内の固体量} = St_D = C_0 Q_0 t_D \quad (1)$$

$$\text{槽内の液体量} = (V_s - St_D / \rho_s) \rho_L \quad (2)$$

槽内の全スラッジの質量 $V_{s\rho_m}$ は，

$$V_{s\rho_m} = St_D + (V_s - St_D / \rho_s) \rho_L \quad (3)$$

ここに， ρ_m ：スラッジの平均密度， ρ_L ：水の密度， V_s ：スラッジ容量である。

式(1)より,

$$V_s = \frac{t_D C_0 Q_0 (\rho_s - \rho_L)}{\rho_s (\rho_m - \rho_L)} \quad (4)$$

任意の高さにおけるスラッジの密度を ρ_{sL} とすると、次のようになる。

$$\rho_m = \frac{\int_{H_u}^{H_c} \rho_{sL} dH}{H_c - H_u} \quad (5)$$

ここに、 H_c 、 H_u ：それぞれ圧密沈降開始点の高さ、排泥濃度に達した高さである。式(5)を積分することは面倒であるので、圧密開始点の密度 ρ_c 、排泥濃度の密度を ρ_u として $\rho_m = (\rho_c + \rho_u)/2$ と近似している。

スラッジ層の所要高さ $H_s = V_s/A$ なるから、次のようになる。

$$H_s = \frac{t_D C_0 Q_0 (\rho_s - \rho_L)}{\rho_s (\rho_m - \rho_L) A} \quad (6)$$

2. ローバーツ (Roberts) の方法

Roberts の関係式を希釈度 D (kg-liquid/kg-solid) で表わすと、

$$-dD/dt = k(D - D_\infty) \quad (7)$$

ここに、 D_∞ ：最終到達時における希釈度である。

スラッジ容積に関する収支をとると、

$$[\text{スラッジ容積}] = [\text{スラッジ中の固体容積}] + [\text{スラッジ中の液体の容積}]$$

であるから、

$$[\text{スラッジ中の固体の占める容積}] = (C_0 Q_0 / \rho_s) (t_\infty - t_c) = C_0 Q_0 t_D / \rho_s$$

$$\begin{aligned} [\text{スラッジ中の液体の占める容積}] &= \frac{C_0 Q_0}{\rho_L} \int_{t_c}^{t_\infty} D dt \\ &= \frac{C_0 Q_0}{\rho_L} \left[\int_{t_c}^{t_\infty} (D - D_\infty) dt + \int_{t_c}^{t_\infty} D_\infty dt \right] \\ &= \frac{C_0 Q_0}{\rho_L} \left[\int_{D_c}^{D_u} -\frac{dD}{k} + \int_{t_c}^{t_\infty} D_\infty dt \right] \\ &= \frac{C_0 Q_0}{\rho_L} \left[\frac{1}{k} (D_c - D_u) + D_\infty t_D \right] \end{aligned}$$

$$V_s = A H_s = \frac{C_0 Q_0}{\rho_L} \left[\frac{1}{k} (D_c - D_u) + t_D (D_\infty + \frac{\rho_L}{\rho_s}) \right] \quad (8)$$

希釈度 D と濃度 C との関係は、 $C = 1/(D/\rho_L + 1/\rho_s)$ になるから、

$$V_s = A H_s = \left[\frac{C_0 Q_0}{k} \left(\frac{1}{C_c} - \frac{1}{C_u} \right) + \frac{C_0 Q_0}{C_\infty} \cdot t_D \right] \quad (9)$$

$$H_s = \left[\frac{C_0 Q_0}{k} \left(\frac{1}{C_c} - \frac{1}{C_u} \right) + \frac{C_0 Q_0}{C_\infty} \cdot t_D \right] / A \quad (10)$$

1.3 重力式汚泥濃縮タンクの設計基準

(1) 面積及び水深

上記のように面積については設計理論が提案されているが、

①汚泥が発生していない場合でも設計しなければならない場合もあること（新設の場合）

②汚泥の特性が同一処理場においても、経年的にも季節的にも変化するものであることなどから、

必ずしも実施設計はこの理論に基づいて行われているわけではない。以下に、重力式汚泥濃縮タンクの設計基準を示す。

(2) その他の項目

1.2 で述べた、面積、水深以外の項目も濃縮タンクの設計において重要であるが、理論的検討が少なく、一般的に次のような設計基準によって行われている。

表-1.3.1 濃縮タンクの面積及び水深に関する基準

	下水道施設設計指針と ⁶⁾ 解 説	EPA マニュアル ⁷⁾	WPCF マニュアル ⁸⁾
水 面 積 負 荷 ($m^3 / m^2 / 日$)	特になし	初沈汚泥 24~31 余剰汚泥 5~7	
固 形 物 負 荷 ($kg / m^2 / 日$)	混合汚泥 60~90	初沈汚泥 96~144 余剰汚泥 12~36 混合汚泥 32~84	100~150 20~ 40 40~ 80
投入 - 引 抜 濃 度 (%)	引抜濃度 (混合) 平均 3%程度 (2~4%)	投入 引抜 初沈 2~7 5~10 余剰 0.5~1.5 2~3 混合 2.5~4.0 4~7	同 左
有 効 水 深	4 m 程度 (清澄域 1 m 程度)	清澄域 0.6~0.9 m 沈降層 1.2~1.8 m (余剰汚泥ではこれ以上必要) 圧縮層 滞留時間 2 4 時間 を越えない程度 計	2 ~ 5 m (圧縮層 1 ~ 2 m)
滞 留 時 間	12時間程度	2 4 時間以内	余剰汚泥 18時間以内 (水温 20℃ 以上)

表-1.3.2 濃縮タンクに関するその他の基準

	下水道施設設計指針と 解説 ⁶⁾	EPA マニュアル ⁷⁾	WPCF マニュアル ⁸⁾
底 部 勾 配	(かき寄せ機有) $\frac{5}{100}$ 以上 (かき寄せ機無) ホッパ式 水平に対して 60度以上	$\frac{17}{100}$ 以上	$\frac{125}{100} \sim \frac{250}{100}$
か き 寄 せ 機 (ピケットフェンス)	周速度 3 m/分程度 (沈降した汚泥をかき乱さ ない程度) (ピケットフェンスについ ては特に記述なし。 例図に示されている。)	周速度 3 ~ 6 m/分 (ピケットフェンス必要。 しかしかき寄せ機のマ ームが同様の効果を生 みだす。)	周速度 4.8 ~ 6 m/分 (同 左)
投入・引抜き部の 構 造			投入部：乱れが少ないよう に
配管口径及び ポンプ能力	・引抜き管の管径 150mm 以上 ・引抜きポンプの最小口径 80mm	投入ポンプ：連続投入がで きるように 引抜きポンプ：界面位置や 濃度により 引抜き量が 変化するので 調整できた 方がよい。	投入、引抜きポンプ： ：流量制御のため、①台数 制御ないし、②回転数制 御が出来ること。
そ の 他	スカム対策 管清掃時の対応 覆がい及び換気、脱臭 設備	スカム対策	余剰汚泥のみの濃縮 タンクの直径 11 ~ 12m 以内

参 考 文 献

- 1) 丹保憲仁著：土木学会編 新体系土木工学 88 上水道
- 2) 大阪市下水道局：下水汚泥の濃縮に関する実験報告書，昭和54年4月
- 3) 岡田和男編著：下水汚泥の処理・処分，環境公害新聞社
- 4) Coe, H. S. and Clevenger, G. H. (1916) : Methods for Determining the Capacities of Slime Settling Tanks, Trans. AIME, 55, 356.
- 5) 井手哲夫編：水処理工学，技報堂，1976年7月
- 6) 日本下水道協会：下水道施設設計指針と解説，1984年版
- 7) EPA : Sludge Treatment and Disposal, 1979年
- 8) WPCF : Sludge Thickening, 1980年

2. 濃縮性評価のための回分実験における問題点とその解決手法の提案

2.1 回分沈降実験の概要

下水汚泥の濃縮性を評価するため、回分沈降実験が行われている。この沈降実験によって、①界面沈降曲線及び、②濃縮汚泥濃度が得られる。さらに、界面沈降曲線からは等速沈降速度 (settling velocity) が算出される。

(1) 界面沈降曲線と等速沈降速度

一定濃度以上の下水汚泥を沈降させると、干渉沈降となり、汚泥から分離した上澄液と汚泥層の間に明確な分離界面がみられる層沈降状態となる。縦軸に界面位置を、横軸に沈降実験開始からの経過時間を表したものを、界面沈降曲線という (図-2.1.1)。

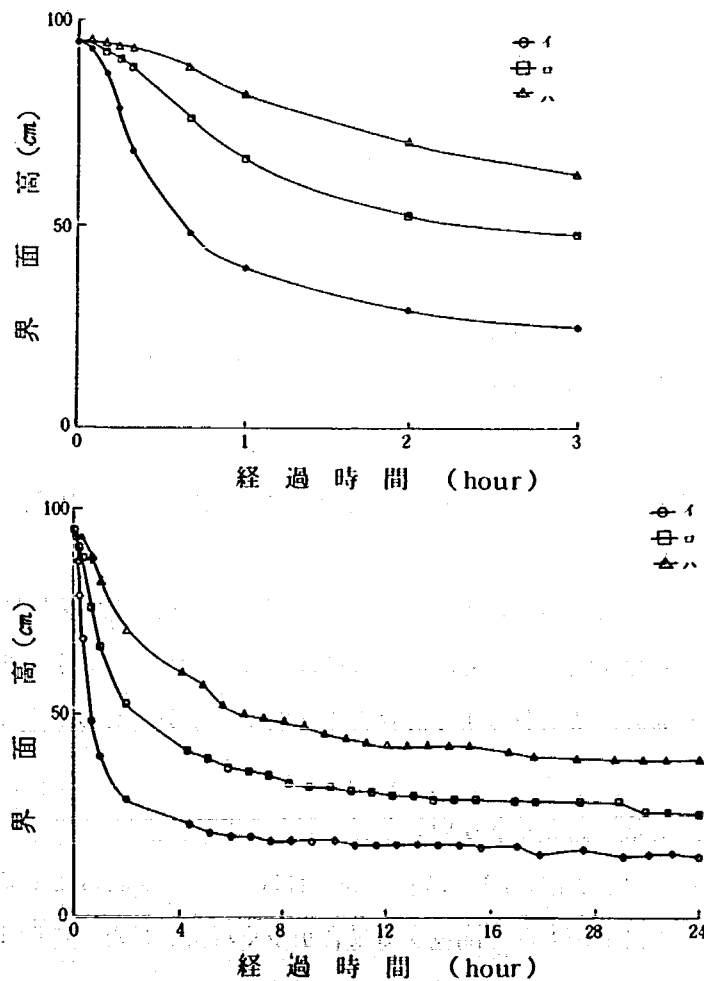


図-2.1.1 沈降曲線-A下水処理場 第1回目-

1.1の(3)でも述べたように、この曲線は①等速沈降区間、②遷移区間、③圧密沈降区間に分けられる。

しかし、界面の動きを時間軸を細分割して観測すると、等速沈降となる以前に、等速沈降区間より界面の動きが鈍くなる区間が存在する。この区間を沈降遅延区間という。この沈降遅延区間は、同一汚泥でも濃度によって異なり高濃度のものほど長くなる。この沈降遅延区間に、①汚泥投入時に生じた水理

的な乱れの安定、②投入時に破壊されたフロックの再凝集が生じていると考えられる。

等速沈降速度は、等速沈降区間における界面の沈降速度で、界面沈降曲線の当該部分の接線の傾きとして算出される。

(2) 濃縮汚泥濃度

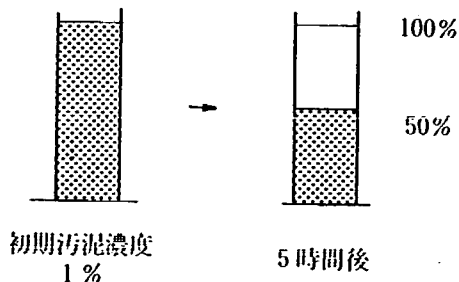
濃縮汚泥濃度とは、文字通り濃縮された汚泥の濃度であるが、その表現方法としては次の2つが用いられている。

- a. (平均) 濃縮汚泥濃度……濃縮された界面下の汚泥の平均濃度を示すものであり、一般には汚泥界面から次のような方法により算出される。

$$\text{濃縮汚泥濃度} = \text{投入初濃度} \times \frac{100}{\text{汚泥界面高 (SV\%)}}$$

算出例

投入初濃度1%で5時間後の汚泥界面高が50%の場合



$$5 \text{ 時間後濃縮汚泥濃度} = 1\% \times \frac{100}{50} = 2\%$$

- b. (下部) 濃縮汚泥濃度……濃縮された汚泥を引抜き測定したもので、特に最下部の汚泥を(下部)濃縮汚泥濃度とする。

(注) 3.1に述べるように実験装置の形態によって異なるが、実験装置では引抜き開始直後の汚泥が必ずしも汚泥濃度が最も高いものにはならないので、一定量捨てた後のものとする。

a法は、b法に比べ、界面測定結果からすぐ計算でき簡便であるが、次のような理由から本研究ではb法を採用している。

① 界面が必ずしも、明確に測定できないこと。

3.1で述べるように当研究室で用いている沈降筒にはコーンが設けてある。そのためか、沈降実験を行った場合、中央部が大きく陥没する場合が多く観測された。このような場合、正確な界面位置が特定できず、a法による平均濃度自体の正確さが問題となる。

② 実施設では、下部から引抜いていること。

実施設の重力式汚泥濃縮タンクでは、濃縮汚泥は順次下部から引抜かれているので、回分実験でも下部の圧密されたと考えられる汚泥濃度で評価しようとするものである。

(下部)濃縮汚泥濃度の測定にあたっては、その引抜き操作方法如何で結果に大きな影響を与えるので、3.1で述べるように注意深く、常に一定の基準による操作が必要となる。

(3) 汚泥の濃縮性に及ぼす水温の影響

濃縮性に大きく影響するものとして水温がある。温度の影響は大きく、高温（20数度以上）では濃縮性が大きく悪化する。¹⁾

実施設との対応を考える場合には、実施設のそれと同じにするとして、統一的に汚泥を比較しようとする場合には、一定の温度がよく、当研究は20℃恒温室内で行っている。

2.2 下水汚泥の濃縮性を評価する指標

下水汚泥の沈降性・濃縮性を表す指標として、回分実験によって求められるものは、①等速沈降速度及び②濃縮汚泥濃度である。

(1) 下水汚泥の濃縮特性を表す指標としての等速沈降速度

等速沈降速度は、汚泥が集団として沈降していく速度であり、汚泥粒子と水との分離性を示す指標と考えられる。また、この特性は集団沈降がより進んだ圧縮沈降領域においても同様であると考えられる。

一方、1章で述べたように重力式濃縮タンクの設計にあたっては、固形物負荷（フラックス）が大きな因子となる。この考え方では、律速となるのは高濃度領域のところである。図-2.2.1に実測及びそれに基づいて推測したフラックス・カーブと固形物負荷 $30\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{日}$ としたときの濃縮律速濃度（ C_{mu} ）を示す。余剰汚泥の場合、初期濃度が $10,000\text{mg}/\ell$ より低い区間でのフラックスの大小は、直接濃縮タンクの大きさを決める因子、言い方を変えれば濃縮汚泥濃度を左右する因子とはならない。

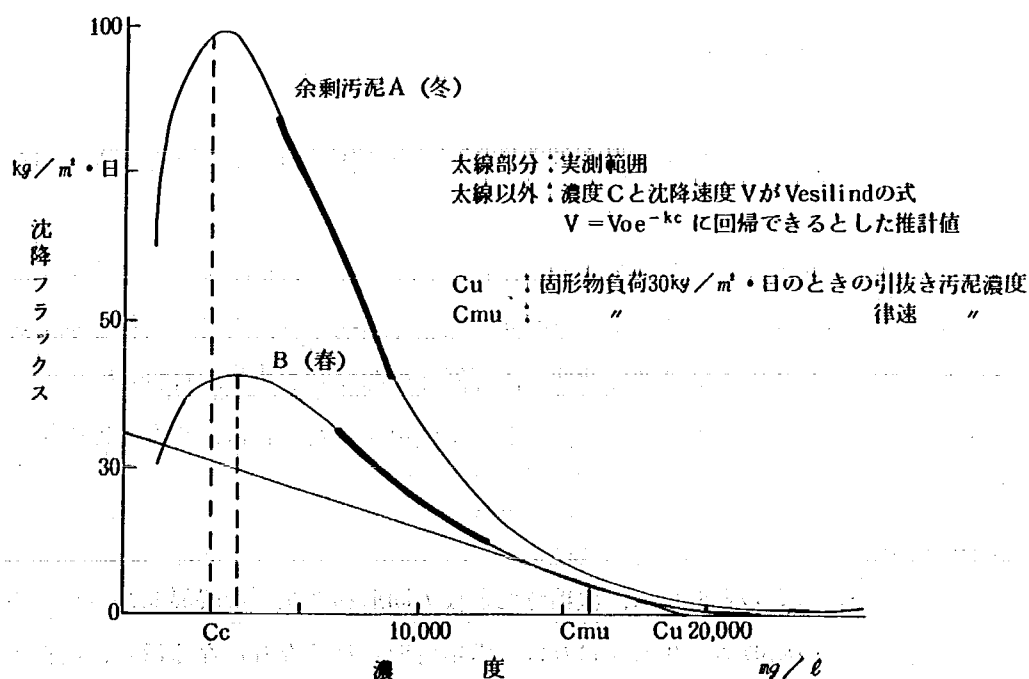


図-2.2.1 沈降フラックス (余剰汚泥の例)⁵⁾

しかし、高濃度領域での圧縮沈降では汚泥層の厚みが制限因子となり、実施設において問題となる濃度領域の挙動を回分沈降実験で把握することは困難であると考えられるので、汚泥の濃縮性の一つとして等速沈降速度（以下、単に沈降速度という。）を採用することにした。

さらに、高濃度領域で実験をしない理由としては次のようなものもある。

- ① 余剰汚泥として引抜かれる汚泥濃度は、 $15,000\text{mg}/\ell$ 以下であり、ほとんどの実験で $10,000\text{mg}/\ell$ 以下であった。²⁾
- ② これらの目的とする高濃度にまで重力によって濃縮するには、数時間を要し汚泥性状が悪化すると考えられた。また、遠心力による濃縮を行うと量の確保がたいへんなことや汚泥フロックの破壊等が懸念された。

(2) 濃縮汚泥濃度

汚泥の濃縮性を表す指標として、濃縮汚泥の濃度そのものを示しており、その数値の高いものほど濃縮性が良いといえる。

汚泥の濃縮性の他にこの指標を左右する因子が存在する。これらについては、次節で述べる。

実（連続）施設の濃縮汚泥濃度と回分式のそれとは、汚泥滞留時間（SRT）を同一にし、汚泥の引抜きを理想化しても汚泥界面位置を統一することができないので、同一とは考えられないため、回分実験によって得た濃縮汚泥濃度によって実施設のそれを直接推測することはできない。しかし、回分実験における濃縮汚泥濃度の高低の関係は、実施設においても同様と考えられ、汚泥の濃縮性を表す指標として十分に使用できると考えられる。

2.3 統一的な評価手法の必要性

(1) 濃縮性評価指標を左右する因子

下水汚泥の濃縮性の評価指標の影響因子には、汚泥性状の他に次のようなものがある。

1) 沈降速度

同一汚泥を用いた場合でも、図-2.3.1に示すように（同一記号に着目）等速沈降速度は投入汚泥濃度により異なる値となる³⁾。このような関係は数多く指摘され、両者の関係を示す式も数多く提案されている。提案されている等速沈降速度と汚泥濃度の関係式を表2.3.1に示す。

等速沈降速度を汚泥の濃縮性を表わす指標として使用するためには、汚泥濃度の影響を排除しなければならない。

2). 濃縮汚泥濃度

これに影響を与えるものとしては、濃縮時間と投入固形物総量（最終界面高さ）である。

- ① 濃縮時間……腐敗等が生じなければ、濃縮時間が長くなればなるほど、濃縮汚泥濃度は高くなると考えられる。図-2.3.2に示す汚泥は24時間経過時点でも界面は沈降しており、濃縮は進んでいると考えられる。

現実には、腐敗が生じるので余り長時間にわたる実験は意味がないので、実施設での滞留時間

表-2.3.1 提案されている等速沈降速度式¹⁾

等 速 沈 降 速 度 式	提 案 者
$w = w(1 - KC) 10^{-1.82KC}$	Steinour, 1944
$w = w(1 - KC)^{4.65}, Re < 0.2$	Richardson and Zaki, 1954
$w = w(1 - 2.78(KC)^{2/3})$	Bond, 1960
$w = w 10^{-aKC}$	Thomas, 1964
$w = a C^{-b}$	Cole, 1968
$w = w e^{-KC}$	Vesilind, 1969
$w = w(1 - C)^{4.5}, 0.02 < Re < 0.6$	Magara and Nambu, 1976
$w = w \frac{C}{Kc + C}$	Lee, Fan and Takamatsu, 1976
$w = \frac{C}{A + KC}$	Reed and Murphy, 1969

本文中では速度をVとして表示している。

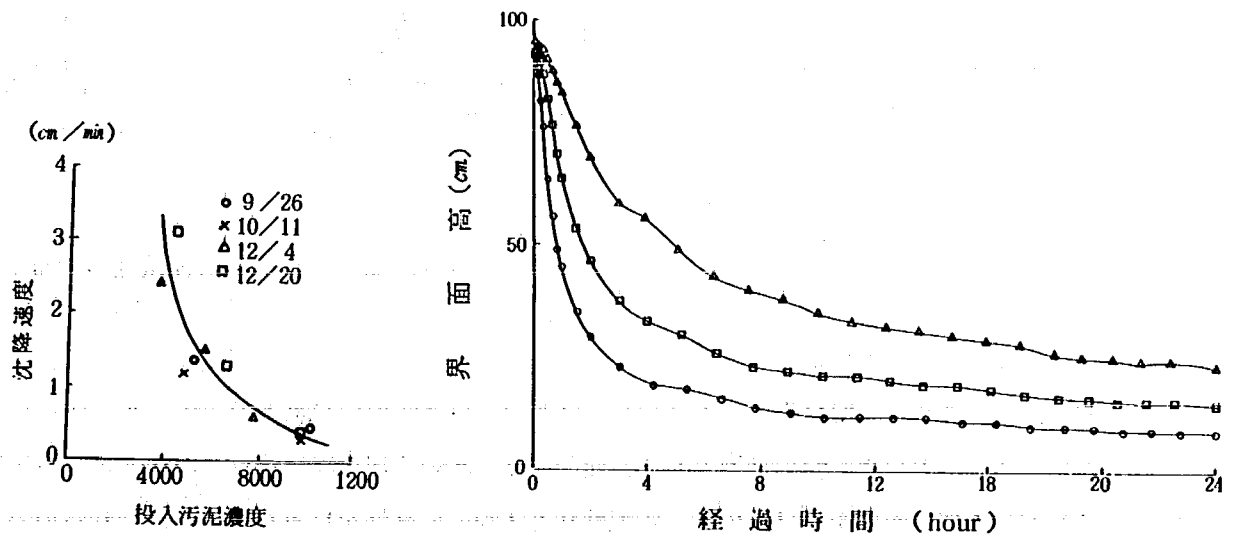


図-2.3.1 投入汚泥濃度と沈降速度³⁾

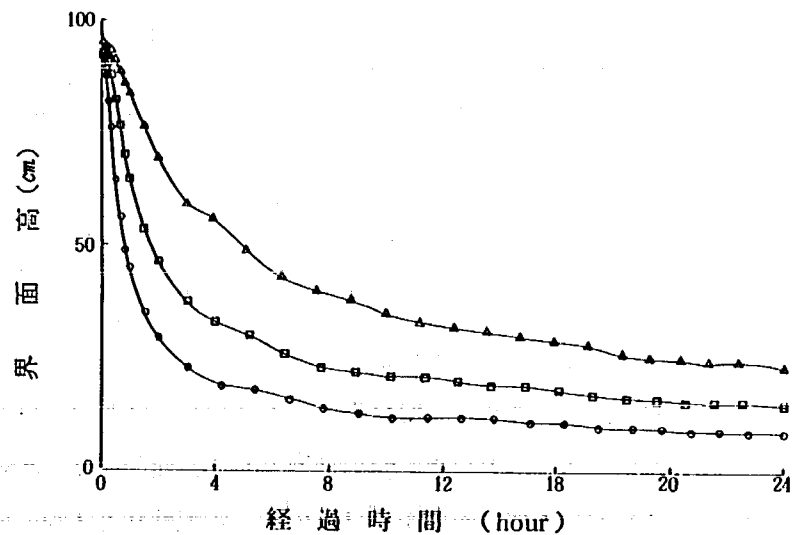


図-2.3.2 沈降曲線 (24時間) - B下水処理場 -

や実験の容易さなどから一定の濃縮時間を設定し、実験を行う必要がある。

- ② 投入固形物総量 (最終界面高さ)³⁾ 圧縮沈降領域では、上方の汚泥の重量によって下方の粒子が圧縮変形を受け濃縮されるので、濃縮汚泥濃度は最終的な汚泥層の厚さ (又は重量) による影響を受ける。図-2.3.3はこの関係を示す。この図では最終的な汚泥深ではなく、投入固形物総量の関係を表している。

(注) ここで用いている濃縮汚泥濃度は、下部から汚泥を一定量採取し、その平均濃度を測定したものである (2.1参照)。このような測定手法であるので、汚泥濃度勾配が大きい場合には、濃縮汚泥濃度と極部的に存在している最高濃度との差が大きくなっていることが考えられる。図-2.3.4に示したように汚泥深が異なると、筒内の汚泥濃度勾配が大きく異なっており、これが本文で述べた差となっているとも考えられる。

しかし、この測定方法を採用している限り、本文で述べたような投入固形物総量との関係は成り立つといえる。

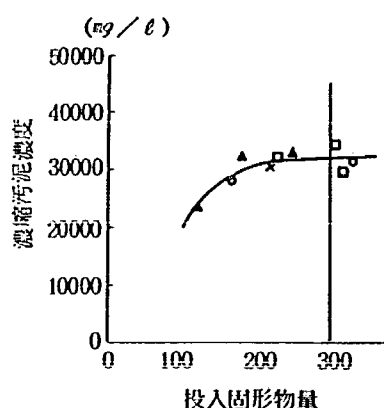


図-2.3.3 投入固形物量と濃縮汚泥濃度³⁾

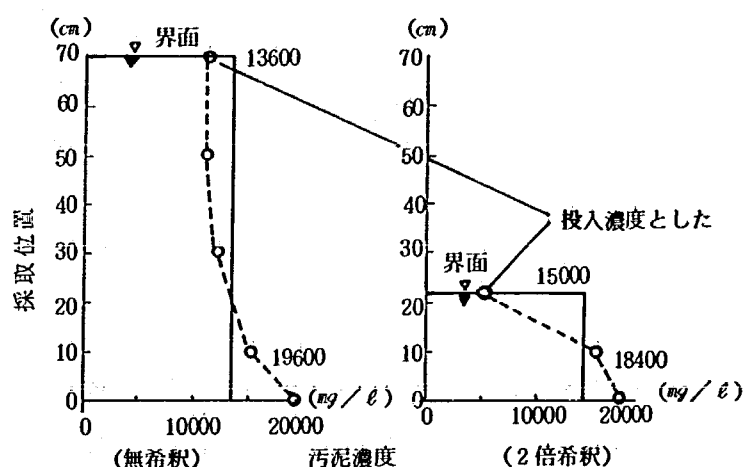


図-2.3.4 濃縮汚泥濃度の分布³⁾
(ピケットフェンスなし)

(2) 統一的な評価手法の必要性

本研究は、汚泥性状 (有機物化、みかけ比重、粘度など) と汚泥の濃縮との関係を明らかにしようとするものである。汚泥の濃縮性の指標として、沈降速度、濃縮汚泥濃度に注目したが、これらは投入汚泥濃度及び濃縮時間に影響を受けるので、汚泥性状と汚泥の濃縮性を見るためには、これらの影響を受けないようにすることが必要である。その1つの方法として次節で述べる濃縮性評価手法を考えた。

この実験手法は、日常の汚泥濃縮タンク管理の指標、汚泥生成の条件つまり水処理の操作が適性かどうかの判断指標 (汚泥容量指標と同じような使い方) としても使用できる。

沈 降 速 度……………清澄条件からみた濃縮タンクの操作条件

濃縮汚泥濃度……………濃縮時間や上部汚泥層の重量の整合には問題はあるが、この濃縮汚泥濃度は、その汚泥が実際に濃縮し得る値であるので、実施設の管理目標となる。前段で述べたように、回分式の値は連続式のそれと異なるので、その程度を定量化しておく必要がある。

2.4 濃縮性評価手法の提案

(1) 濃縮性評価手法

提案する回分実験における濃縮性の評価手法は次の通りである。当研究室で行っている詳細な実験手法は、3章で述べる。

ステップ1. 同一汚泥を、濃度範囲が4,000~10,000mg/ℓ間の3段階（以上）になるよう調整する。

調整方法 a. 原汚泥濃度が10,000mg/ℓ以上である場合、水道水又は処理水で希釈

b. 原汚泥濃度が8,000mg/ℓ以下の場合、濃縮操作

ステップ2. ステップ1で調整した汚泥をそれぞれ沈降筒に投入し、24時間沈降実験を行い、沈降曲線及び濃縮汚泥濃度を求める。

ステップ3. 沈降曲線から沈降速度をそれぞれ求め、投入汚泥濃度との関係式に調整する。

関係式 $V = V_0 \times e^{-KC}$

ここで V : 沈降速度

C : 投入汚泥濃度

V_0 : ストークスの沈降速度

K : 定数

ステップ4. 濃縮汚泥濃度と固形物総量との関係からこの条件における最高濃縮汚泥濃度を読み取る。

(2) 濃縮性評価手法の考え方

ステップ1

1) 濃度範囲について

多くの処理場の余剰汚泥は10,000mg/ℓ未満で運転されていること、濃縮汚泥濃度が一定となるには、当研究室で実施している直径20cmの場合、投入固形物量で250g、つまり濃度8,000mg/ℓ以上が必要なことなどから設定したものである。

なお、2.3で述べたように沈降速度に及ぼす汚泥濃度の影響を除くには基準濃度を設定し、その濃度になるよう素早く濃度調整を行い、沈降速度を得る方法もある。しかし、①基準濃度に素早く投入汚泥を調整することが難しいことや、②沈降速度に及ぼす汚泥濃度の影響が一樣でないことから、一定の濃度範囲の数段階において沈降実験を行い、回帰式を算出し、その係数 V_0 、Kによって汚泥の濃縮性を判断する手法を採用した。

2) 設定段階数について

段階数は多いほどよいが、少ないとも3段階のものがないと、回帰式や濃縮汚泥濃度の推定ができない。

3) 濃度調整方法について

a. 希釈する場合

希釈水としては、余剰汚泥を採取した処理場の処理水が望ましい。しかし、処理水に亜硝酸態窒素や硝酸態窒素が含まれていると、脱窒による窒素ガス発生により汚泥の沈降性が悪化する³⁾ので、脱窒を完了させておく必要がある。

一般的には、水道水の希釈で十分と考えられる。使用にあたっては残留塩素を除去するため、昼夜曝気しておく方がよい。

しかし、溶解性の塩類が多く、蒸発残留物濃度(TS)と浮遊物質濃度(SS)の差の大きい(1,000mg/l以上)ような場合には、水道水で希釈すると活性汚泥の馴養された条件と異なってくる。このような場合の希釈水としては、処理水を使うべきであろう。

b. 濃縮する場合

汚泥の性質を変えないことが条件となるので、強力な力を用いず、迅速に処置する必要がある。その方法としては次の2つが考えられる。

- ①口径が大きく深いポリバケツ等を用いて重力濃縮する。
- ②図-2.4.1に示すように汚泥中の水を吸引する。

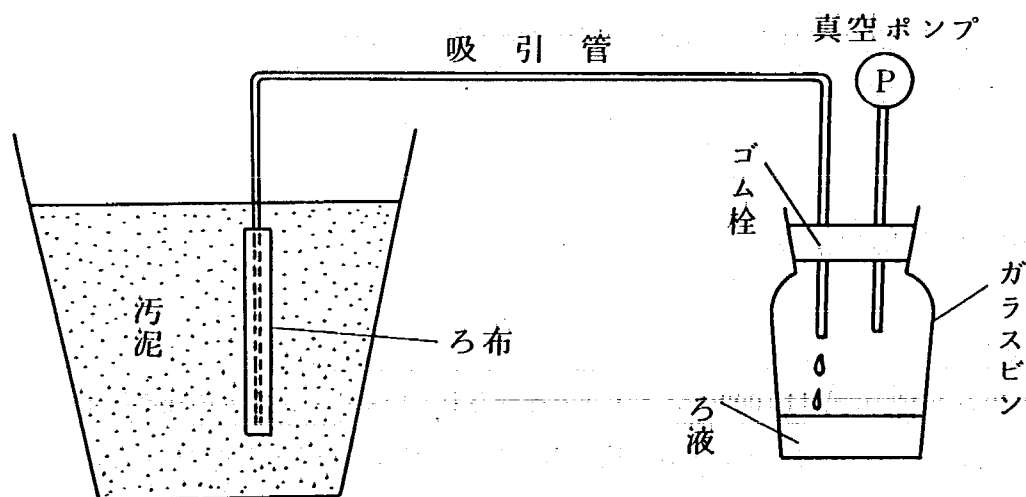


図-2.4.1 試料濃度の調整法

ステップ2

1) 沈降曲線 —— 界面高の測定について

界面高測定の間隔及び継続時間は、その汚泥の沈降特性によって変化させるべきである。しかし、現場で沈降特性を見ながら変化させるのは難しいので、どのような汚泥にも適用できるものが必要である。標準的には、5.1の(2)に定める時間間隔で十分である。

2) 濃縮汚泥濃度について

沈降筒からの汚泥の引抜きには十分に注意をし、濃縮の進んだ下部の汚泥から順次引抜くようにしなければならない。この操作如何で、これ以後の測定がどんなに正確でもデータは無意味なものとなる。

ステップ3

1) 沈降速度の算出について

界面沈降曲線の等速沈降部から、その接線の傾きとして、等速沈降速度として読み取る。

具体的な方法については、3.1(3)に述べる。

2) 回帰式の選定について

投入汚泥濃度と沈降速度との関係式は、表2.3.1に示すように、Richardson and Zaki, などの理論式から、Coleの式やVesilindの式のような実験式まで数多くのものが提案されている。しかし、沈降速度を表す式として、どれが最も適したものであるか未だ定説がない。図-2.4.2に実測値をこの3式で回帰した例を示す。

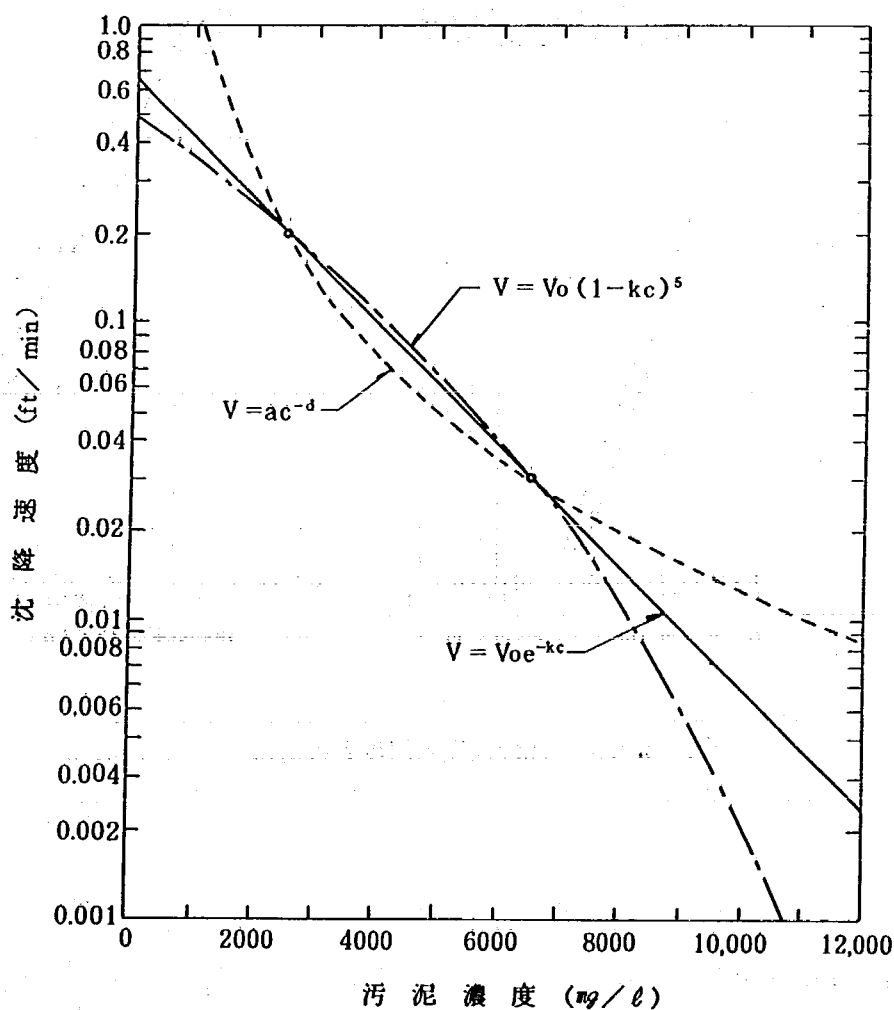


図-2.4.2 沈降速度の回帰式の比較⁶⁾

本実験手法において、この関係式として、

①汚泥濃度 4,000~10,000mg/l 程度の範囲において、両者の関係を表わせること。

②各種係数の算出が容易であること。

などの条件が要求される。

この観点から、当研究ではVesilind の式を用いている。これは、①実験式の方が各種係数の算出が容易であること、②目標とする濃度範囲内でColeの式では、折れ線で表示されるのに対して、Vesilind の式では全濃度域を単一速度式で表わせるとの報告⁷⁾があることなどによる (図-2.4.3参照)。

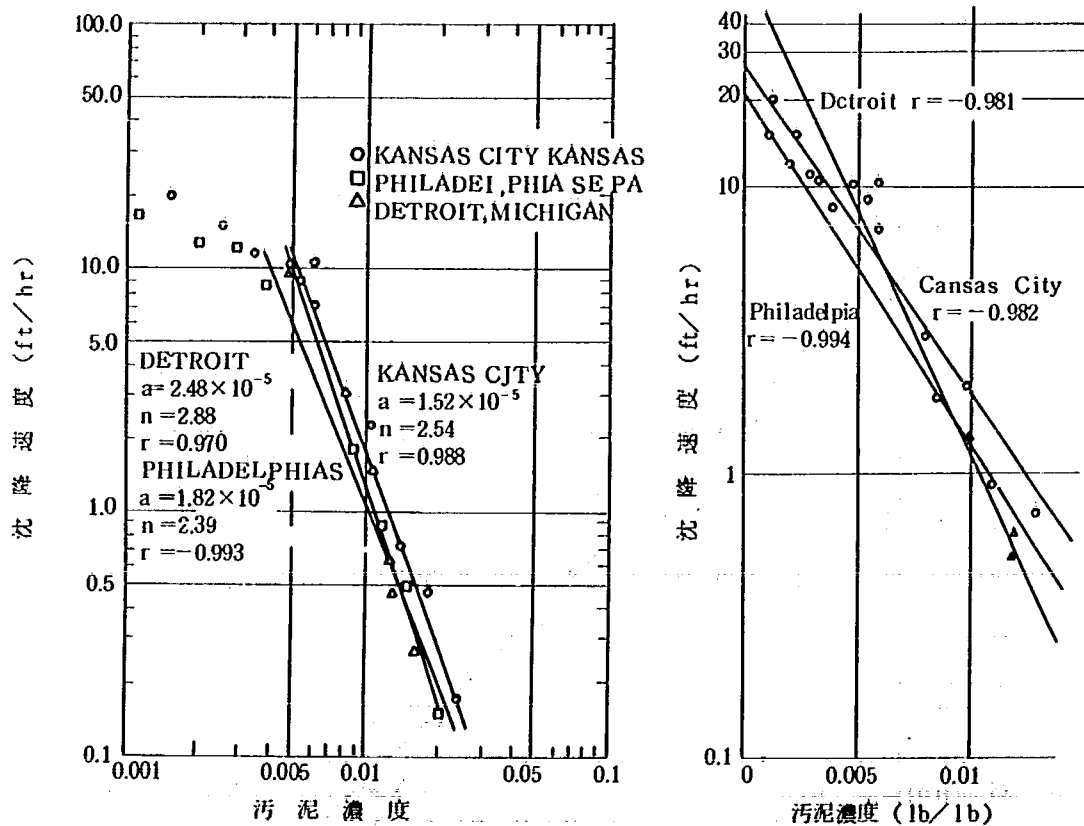


図-2.4.3 沈降速度と濃度との関係⁷⁾

ステップ4

最高濃縮汚泥濃度について

濃縮汚泥濃度と固形物総量との関係を図に示し、そこから24時間濃縮における最高濃縮汚泥濃度を読み取る (例えば図2.3.3)。

参考文献

- 1) 白石, 櫻井, 京才: ガス発生特性から見た重力分離濃縮の可能性について, 第23回下水道研究発表会講演集, 昭和61年度, 日本下水道協会 (発表予定)
- 2) 京才, 櫻井, 白石: 汚泥性状の改善に関する調査, 土木研究所資料 第2129号 昭和58年度下水道関係調査研究年次報告書, 昭和59年7月, 建設省土木研究所
- 3) 京才, 櫻井, 白石: 汚泥性状の改善に関する調査, 土木研究所資料 第2243号 昭和59年度下水道関係調査研究年次報告書, 昭和60年10月, 建設省土木研究所
- 4) 岡田和男 編著: 下水汚泥の処理・処分, 環境公害新聞社
- 5) 櫻井: 重力濃縮の改善可能性について, 月刊下水道, VOL. 8 No.12 P.29~35, 環境公害新聞社
- 6) Dick, R. and Ewing, B.B.: EVALUATION OF ACTIVATED SLUDGE THICKENING THEORIES ASCE, SA II, P.333~340, April, 1969
- 7) 福田寛允: 汚泥の沈降速度, 東京都下水道局技術調査年報, P.307~348, 昭和57年3月

3. 濃縮性評価手法の実施例

2章で述べた濃縮性評価手法として、本研究室において実施している実験方法の詳細及び実施した例を示す。

なお、この実験方法は単なる沈降実験にも使用できる。

3.1 実験の装置・器具及び手順

(1) 実験に用いる装置・器具

1) 沈降実験装置

当研究室で用いている沈降実験筒の仕様を表-3.1.1及び図-3.1.1に、写真を巻末に示す。

この仕様の妥当性については、4章で説明する。

なお、今後、沈降実験装置を製作する場合の留意点は次のようである。

①沈降筒の径及び深さとして、この値は最小値である（4章参照）。

②汚泥投入・引抜コックは、余剰汚泥を前提としているので、混合、初沈汚泥の場合にはその径について検討する必要がある。

表-3.1.1 沈降実験装置の仕様

沈降実験装置……濃縮性評価実験として用いる場合、沈降筒 3 本
沈降筒（3 本）：主な構成：透明アクリル製円筒、コーン部掻き寄せ翼、 ピケットフェンス、投入・引抜配管及びコックからなる。
界面測定用目盛（側面）：下部より10cm間隔及び95cm
採 水 口：下部より10, 30, 50, 70, 90cm
製 御 盤：沈降筒毎の電源のON/OFF 及び回転速度が調整可能。

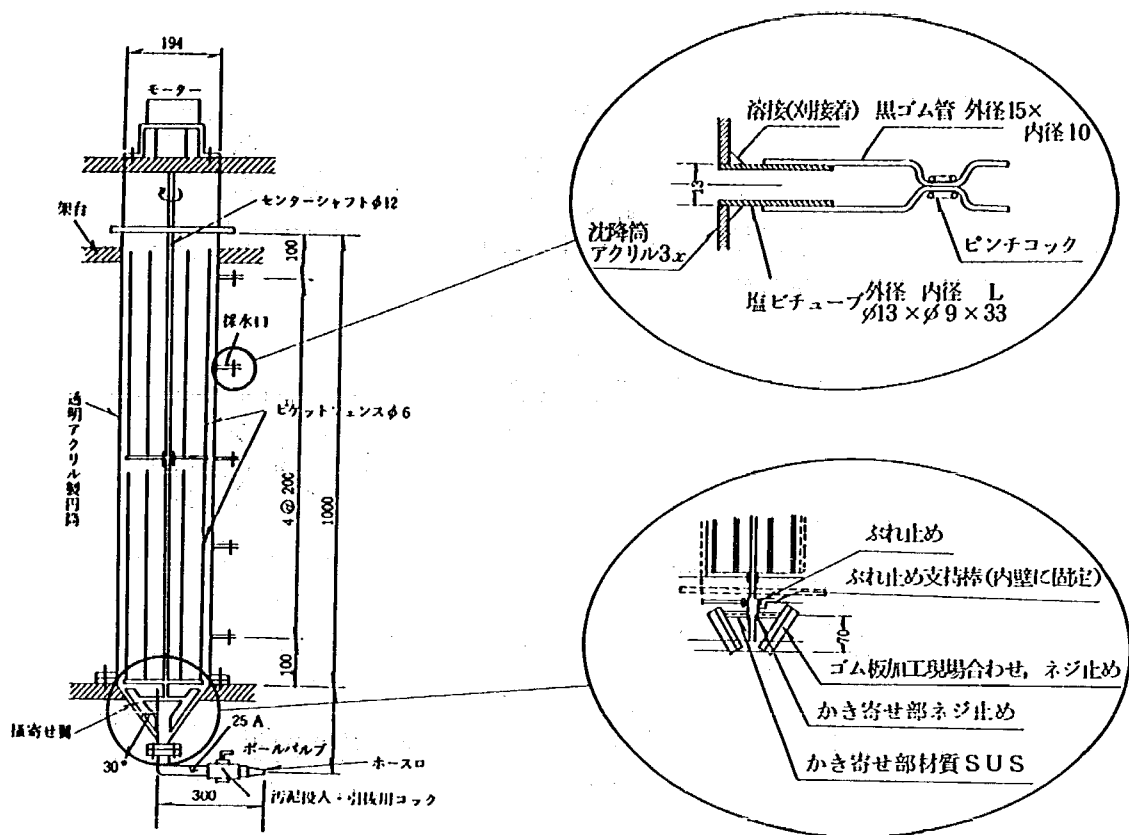


図-3.1.1 沈降実験装置の詳細図

2) 沈降実験器材

沈降実験に必要な一般的な器材を表-3.1.2に、実験における器材の配置例を図-3.1.2に示す。
沈降実験の野張例を表-3.1.3に示す。

表-3.1.2 沈降実験必要器材一覧 (濃縮性評価実験用)

必要器材名	数量	備 考
水中ポンプ	1台	口径15mm, 最高揚量3m, 最大水量24 l / 分
ポリバケツ 100 l	2個	希釈水用, 実験汚泥混合用
ポリバケツ 60 l	3個	投入汚泥調整用
20 l ポリタンク	5~10	実験試料採取用 必要本数 = $\frac{30000}{\text{予想MLSS濃度}}$
攪拌棒	1本	長さ1m程度のもの
テーブルタップ	1~2	3m延長可能なもの
取手付きビーカー 20 l	2個	分析試料採取用
ポリメスシリンダー 5 l	2個	希釈水計量用
コンプレッサー	1機	希釈水曝気用
カメラ タイマー付	1式	夜間界面高測定用
目覚時計	1台	夜間界面高測定用
1 l ポリビン	9本	分析試料用
ビニールホース	1本	上澄水引抜用, 内径1~2cm, 長さ3~4m
タイマー	1台	5分毎にアラームの鳴るもの
30cm定規	1本	界面高測定用
実験野帳	1枚	表-3.1.3

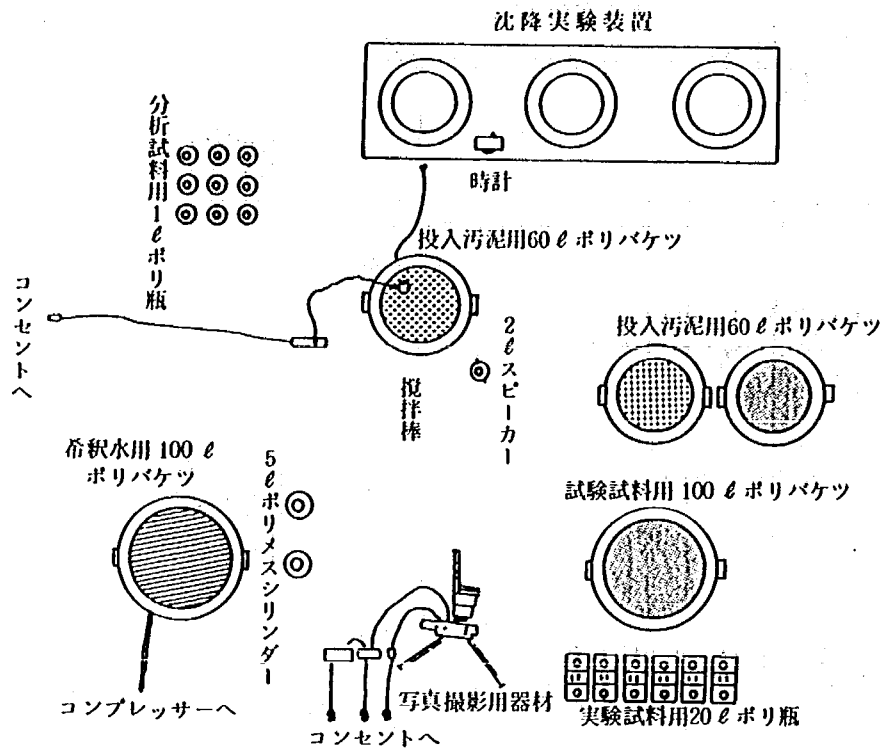


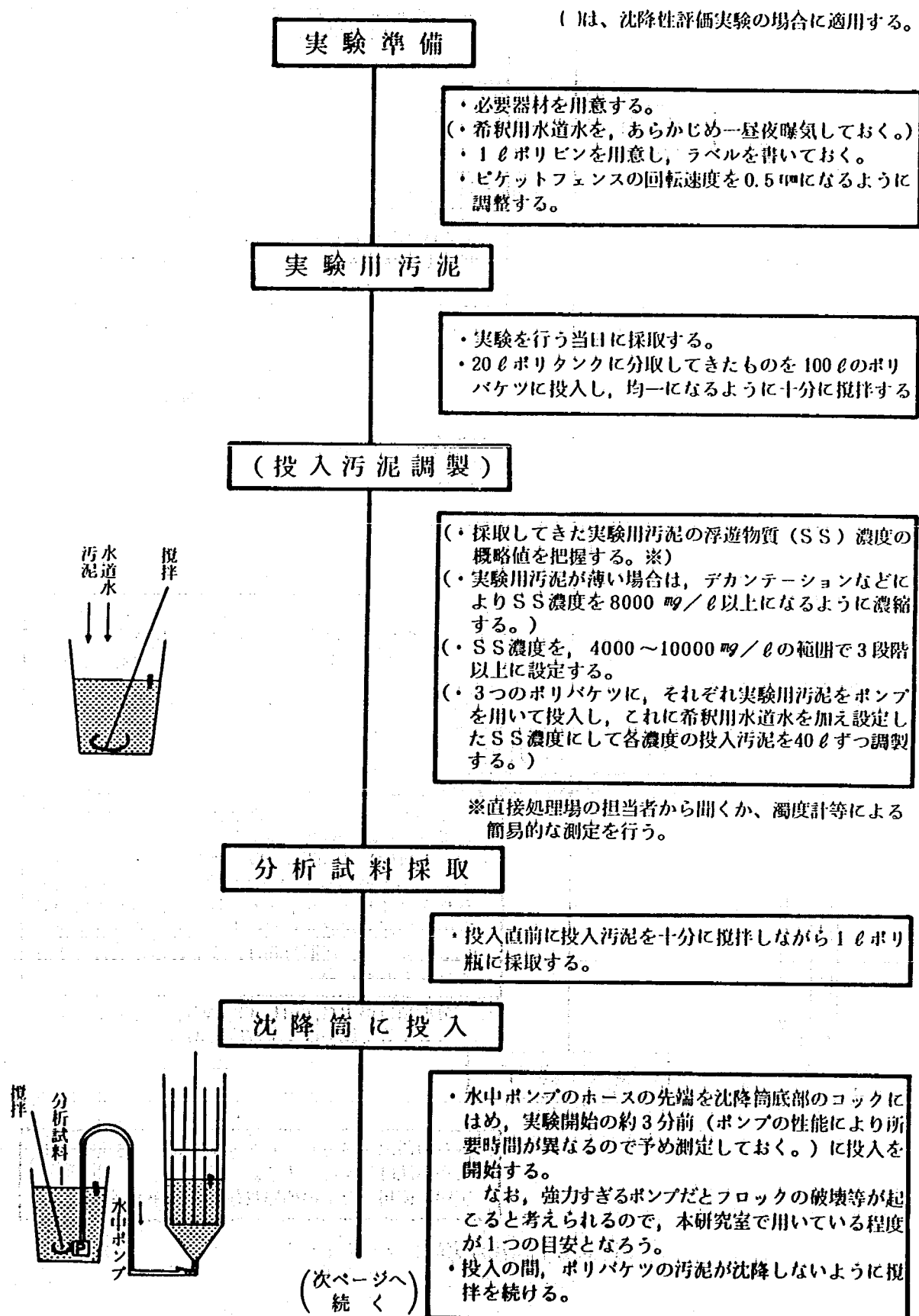
図-3.1.2 沈降実験配置例 (濃縮性評価実験用)

表-3.1.3 沈降実験野帳 (濃縮性評価実験用)

下水処理場名	下水処理場	処理方法	実験回数	第 回目	採取日時	月 日 時 分
MLSS 濃度	水 温	・ ℃	pH	・	ORP	mV
実験 ケース	— ・ — イ	— ・ — ロ	— ・ — ハ			
設定MLSS()						
投入SS量 (g)						
実験開始日時	月 日 時 分	月 日 時 分	月 日 時 分			
経過時間 (分)	0 5 10 15 20 30	0 5 10 15 20 30	0 5 10 15 20 30			
界 面 高 (cm)						
経過時間 (時間)	40 50 1 15 2 25	40 50 1 15 2 25	40 50 1 15 2 25			
界 面 高 (cm)						
経過時間 (時間)	3 4 5 6 7 8	3 4 5 6 7 8	3 4 5 6 7 8			
界 面 高 (cm)						
経過時間 (時間)						
界 面 高 (cm)						
経過時間 (時間)						
界 面 高 (cm)						
備 考						

(2) 濃縮性評価実験の詳細フロー

沈降実験の手順（フローチャート）を以下に示す。



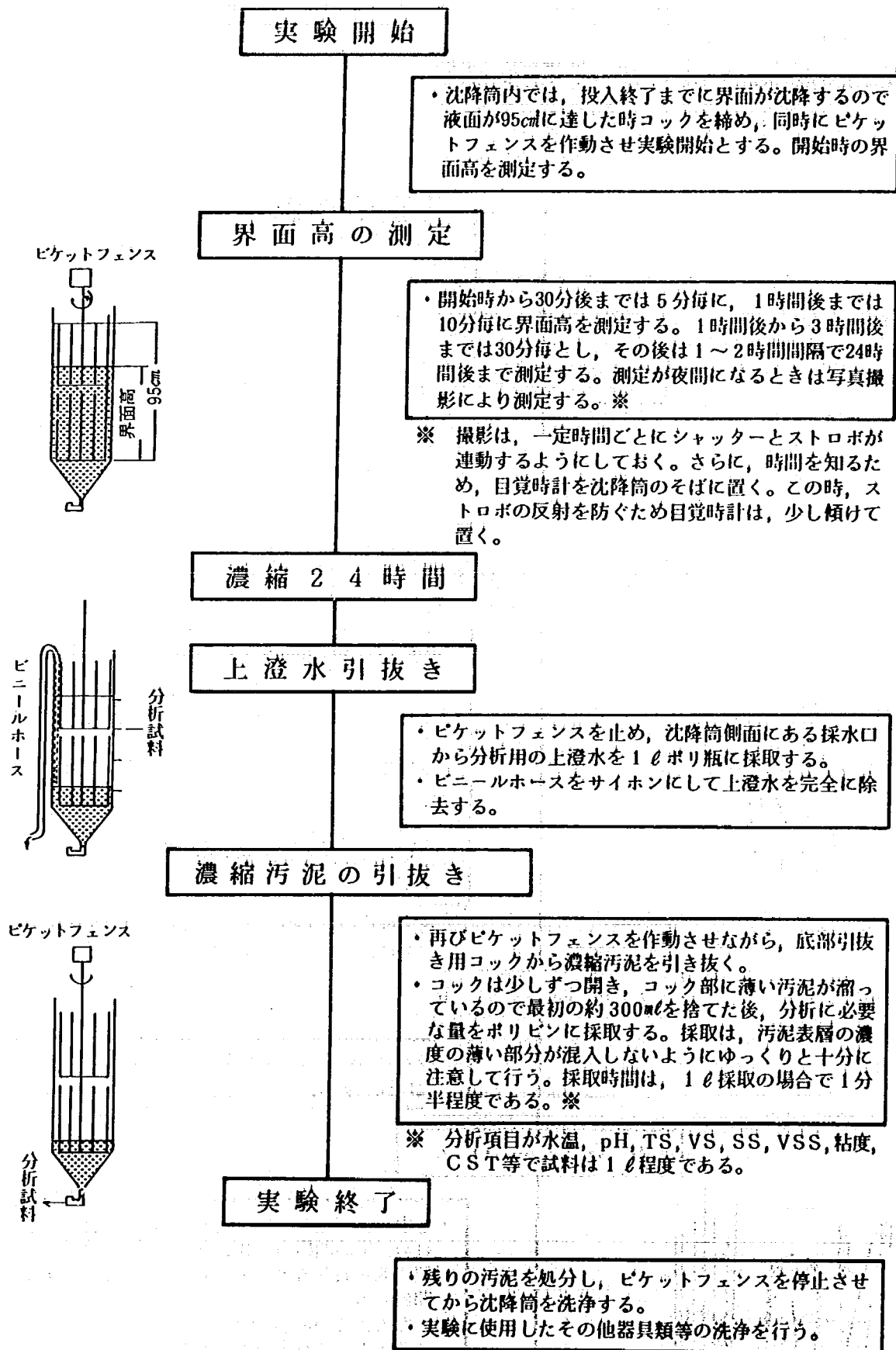


図-3.1.4 沈降実験フローチャート

(3) 実験データの整理及び解析手法

沈降実験の結果から沈降速度を得るには、まずグラフに界面高データをプロットして沈降曲線を求める。その曲線の直線部を判断し、直線の傾きを等速沈降速度として求めるわけである。傾きの求め方として、①直線の傾きを直接グラフ上の目盛りで読んで算出する方法、②グラフで直線となる数点（3～4）の組合せを選び、最小二乗法によって傾きを算出してこの傾きが最大となる値を沈降速度とする方法、の2つが考えられる。一連の実験を同一手法に統一すればどちらでも良いと考えられる。

ただし、前者の場合、5章で述べる様に、①その作業にたずさわる人による差や②グラフのスケールなどによる誤差が生じやすいので、一連の実験では同一人物が同一のグラフスケールのものを用いてこの作業を行う必要がある。グラフの様式例を図-3.1.3に示す。

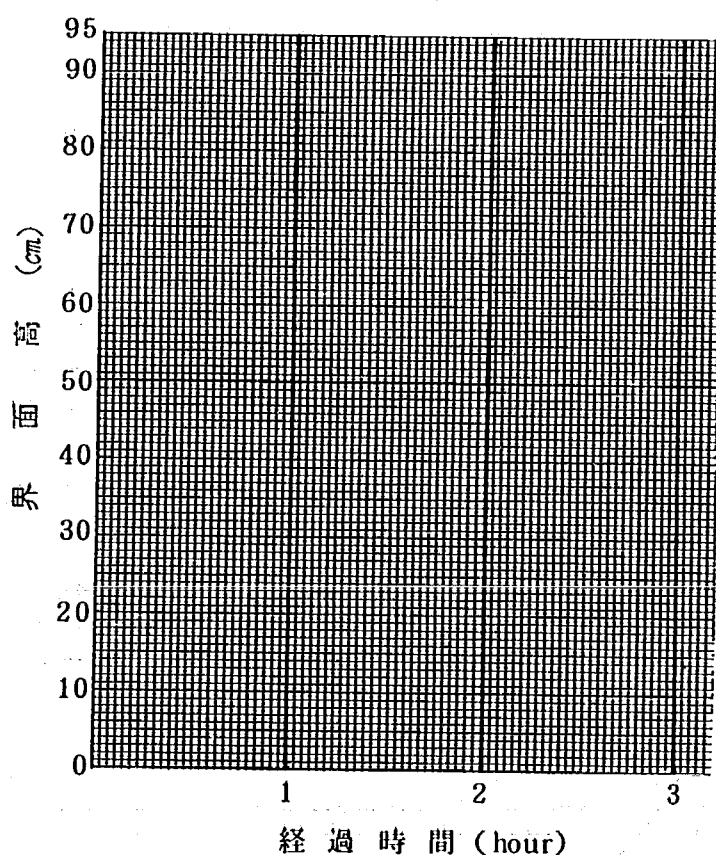


図-3.1.3 沈降速度算出用グラフ

3.2 濃縮性評価手法の実施例

以下、3.1 で述べた器具及び手順によって当研究室で実施した例を示す。

実験に供した余剰汚泥（返送汚泥）の界面沈降曲線及び投入・濃縮汚泥濃度を、それぞれ図-3.2.1、表-3.2.1に示す。

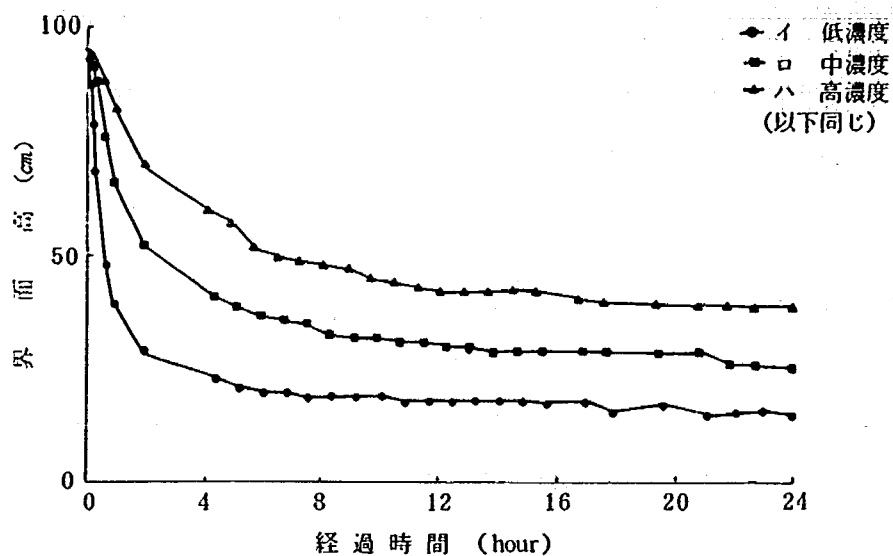


図-3.2.1(a) 界面沈降曲線 (第1回) - A 処理場-

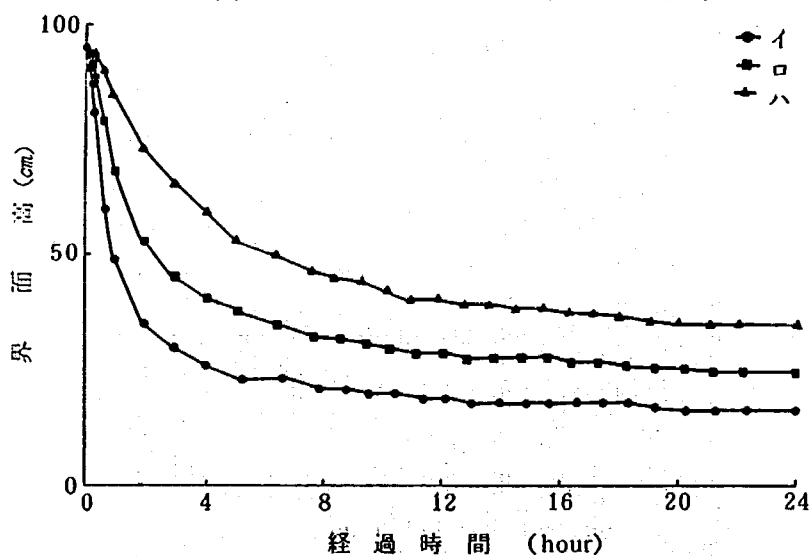


図-3.2.1(b) 界面沈降曲線 (第2回) - A 処理場-

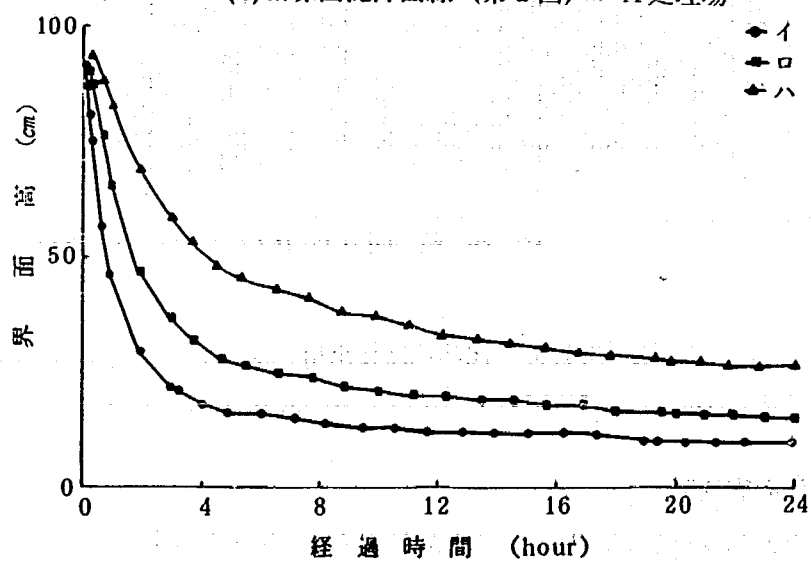


図-3.2.1(c) 界面沈降曲線 (第3回) - A 処理場-

表-3.2.1 沈降実験結果

実験ケース	投入濃度 (mg/l)	濃縮濃度 (mg/l)	沈降速度 (cm/分)
第 1 回	6 2 7 0	3 3 1 0 0	1. 8 8
	9 5 9 0	3 7 7 0 0	0. 5 6
	1 2 4 0 0	3 5 9 0 0	0. 2 7
第 2 回	5 9 5 0	3 3 0 0 0	1. 0 7
	8 1 7 0	3 3 3 0 0	0. 5 1
	1 0 5 0 0	3 3 2 0 0	0. 2 2
第 3 回	4 4 6 0	2 8 2 0 0	1. 1 9
	6 2 0 0	3 1 9 0 0	0. 5 6
	8 8 8 0	3 6 1 0 0	0. 2 7

(1) 汚泥濃縮特性値の算出

① 沈降速度の算出及び回帰直線の計算

沈降曲線から沈降速度を計算する (図-3.2.2 参照)。なお、算出における注意事項は、5章に記述する。この場合の算出結果を表-3.2.1中の沈降速度欄に示す。

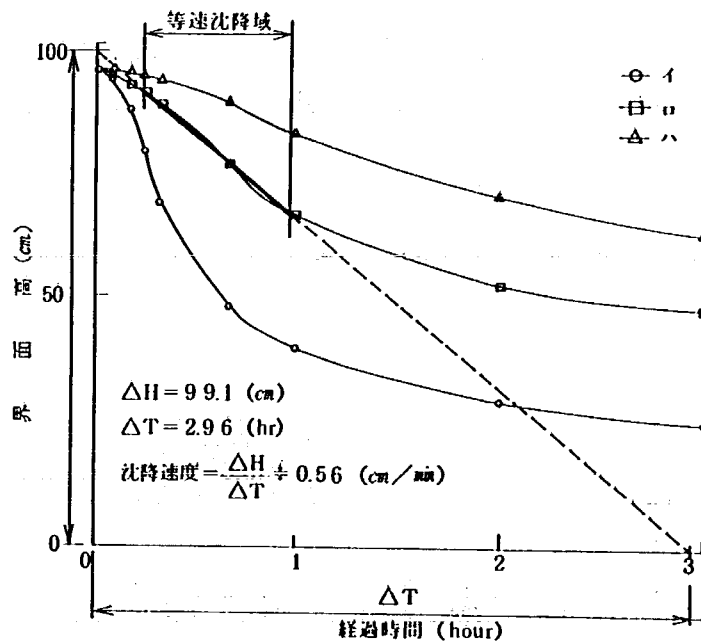


図-3.2.2 界面沈降曲線 (第1回)

沈降速度と投入汚泥濃度との関係を図-3.2.3に示す。

次に投入汚泥濃度に影響されない沈降速度の特性値を求める。

沈降速度を投入汚泥の関数であるとする Vesilind の式 $V = V_0 e^{-Kc}$ で回帰する。実測値及び回帰式を沈降速度軸を対数とした図-3.2.4に示す。また、回帰式の係数 V_0, K の値を表-3.2.2に示す。

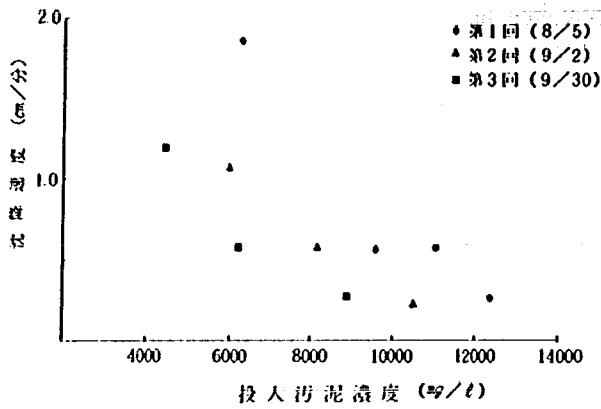


図-3.2.3 投入汚泥濃度と沈降速度の関係
- A 処理場 -

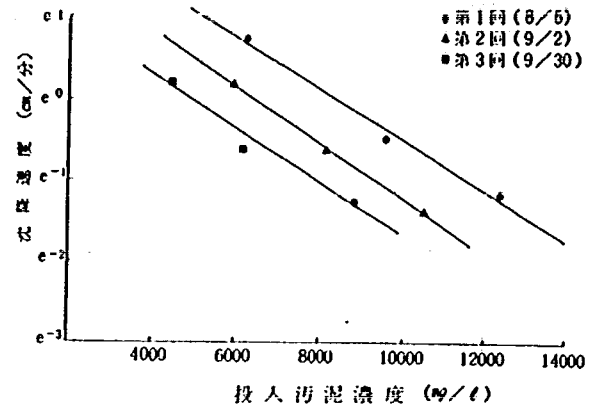


図-3.2.4 投入汚泥濃度と沈降速度の関係
- A 処理場 -

表-3.2.2 汚泥の沈降特性値

実験回数	$K (\times 10^{-4})$	$V_0 (\text{cm}/\text{分})$
第1回	3.21	13.5
第2回	3.48	8.58
第3回	3.32	4.90

② 投入固形物に影響されない最高濃縮汚泥濃度の算出

投入固形物量と濃縮汚泥濃度との関係を図-3.2.5に示す。最高濃縮汚泥濃度は、図-2.3.3中の△印のような測定値であると、読み取り易いが、図-3.2.5中の■印のようであると判断しにくい。

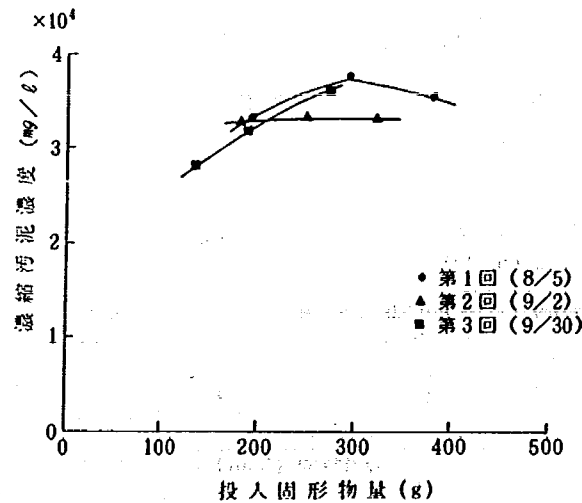


図-3.2.5 投入固形物量と濃縮汚泥濃度の関係

この3回の沈降実験を合わせて判断すると、最高濃縮汚泥濃度は、35,000mg/l程度と読み取れる。それぞれに読むと、1回目 36,000mg/l、2回目 34,000mg/l、3回目は難しいが強いて読み取ると36,000mg/l程度となろう。

(2) 濃縮タンクの維持管理手法としての利用

同一汚泥について回分実験及び実施設での挙動の相似則が明確でないので、濃縮タンクの維持管理に、回分実験の数値の直接使用は難しいが、維持管理のための一つの目安としては使用できると考えられる。

このような目的としては次の2方法が提案できる。

① 清澄条件から判断する方法

固形物負荷 G ($\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{日}$) をパラメータとし、濃度 C (mg/ℓ) と沈降速度 V ($\text{cm}/\text{分}$) の関係を片対数にプロットすると図-3.2.6となり、これをスケールとして用い、以下に述べる様な方法で維持管理に利用する。

$$G [\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{日}] = C [\text{mg}/\ell] \times V [\text{cm}/\text{分}] \times 1,440 \times 10^{-2} \quad (3.2.1)$$

これと前に示した図-3.2.4を重ねると図-3.2.7が得られる。濃縮タンクが連続的に一定の負荷がかかる場合、固形物負荷 G_1 で操作する場合、 $G = G_1$ の曲線を上回る範囲で濃縮操作をしなければ、投入した汚泥粒子が越流してしまう。

図-3.2.7から固形物負荷 $G = 30 \text{ kg}/\text{m}^2 \cdot \text{日}$ で運転する場合、濃度約 $10,000 \text{ mg}/\ell$ 以下で汚泥を投入しなければならない。

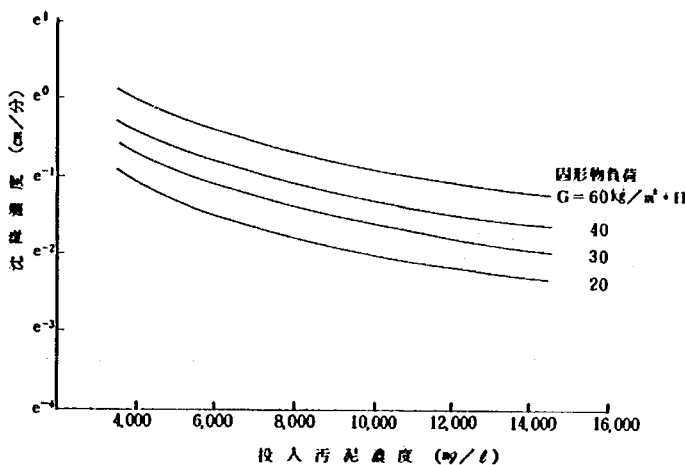


図-3.2.6 濃度と沈降速度の関係
(固形物負荷をパラメータとする)

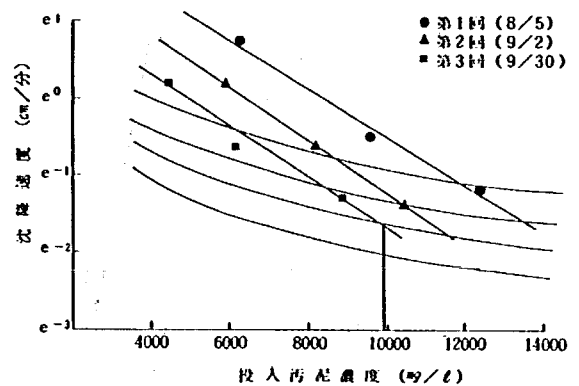


図-3.2.7 維持管理手法への利用
(清澄条件から判断する方法)

また、これとは逆に投入汚泥濃度が決まれば、それを許容できる固形物負荷で操作しなければならない。

実際の濃縮タンクでは、連続投入ではなく断続的な投入で運転されているのがほとんどである。このような場合には、前述の数値よりさらに余裕を見込んだ運転をする必要がある。

② フラックス・カーブにより濃縮条件を定める方法

実験により得られたフラックス・カーブを利用して固形物負荷の決定や引抜汚泥濃度を推測する方法が考えられる。一般的に、沈降速度を測定した濃度範囲を越えた領域における推測となるので、その算出値は参考程度にとどめるべきであろう。

図-3.2.8に実験で得られた表-3.2.1の沈降速度式から計算したフラックス・カーブを示す。

フラックス G は、濃度 C とそのときの沈降速度 V から式 (3.2.1) により計算される。

1.2 で述べた吉岡らの方法で検討を行う。

- ① 固形物負荷を仮定し、フラックス・カーブと接するように直線を引く。
- ② その直線と濃度軸の交点が引抜き汚泥濃度である。
- ③ この作業を繰り返し、固形物負荷と引抜き汚泥濃度の組合せを算出し、その汚泥に対する最適な運転条件を明らかにする。

一例として、図-3.2.8中に3回目のフラックス・カーブについて、固形物負荷 $20, 30, 40 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{日}$ における引抜き汚泥（予測）濃度、 (C_{20}, C_{30}, C_{40}) を求めた場合を示す。

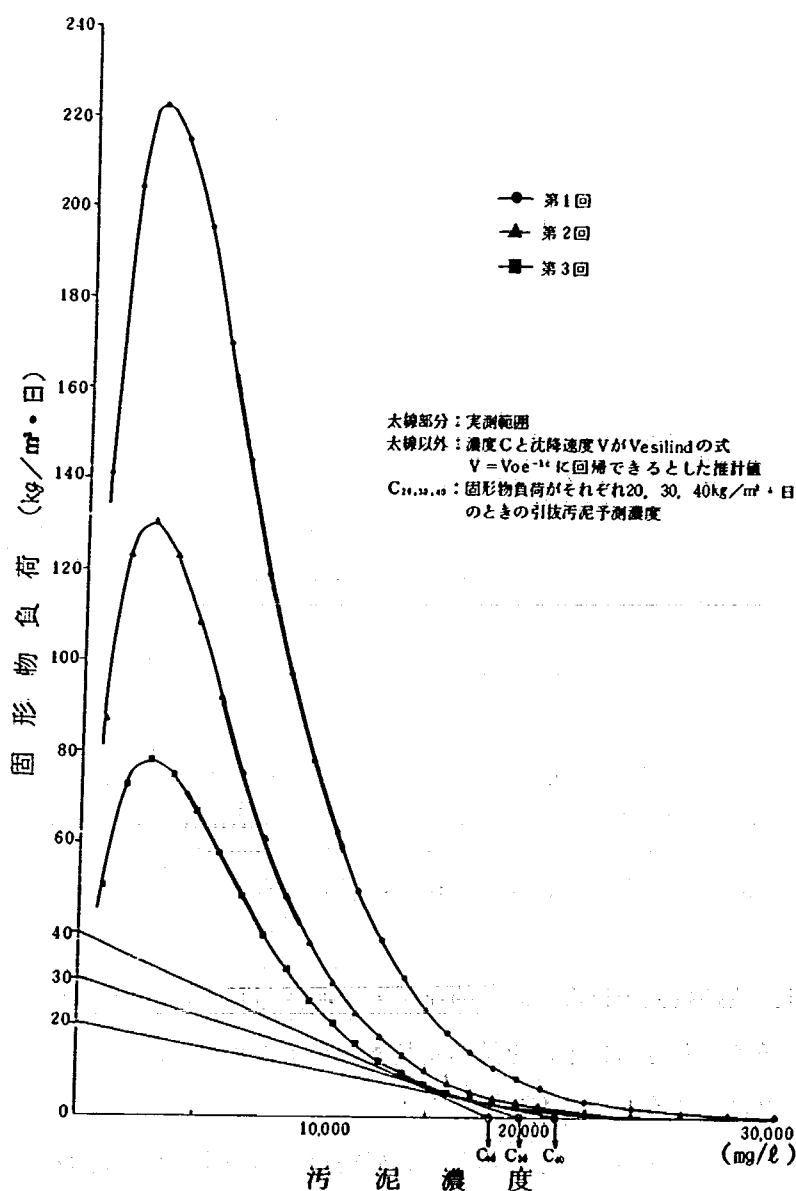


図-3.2.8 フラックスカーブ (A 処理場)

4. 回分実験装置の形状の考え方

下水汚泥の回分実験の目的は、実濃縮タンクで示す下水汚泥の挙動を推測することである。しかし、回分実験においては、回分であること以外に実験装置の形状や大きさが影響し、下水汚泥本来の特性を歪めて推定することが懸念される。

そのため、ここでは影響が大きいと考えられる次の3点について検討する。

- ①シリンダーの直径
- ②シリンダーの深さ
- ③ビケットフェンス

4.1 シリンダーの直径

シリンダーの直径の影響としては、次の2つが指摘¹⁾されている。

第1は、チャンネルリングと呼ばれ、シリンダーの底部に残留している分離水が、抵抗の多い汚泥層を避け、壁面を伝わって上昇するもので、直径の小さいシリンダーほどこの効果は高くなり見かけ上、汚泥の沈降速度が大きく測定される。

第2は、ブリッジングと呼ばれ、この現象もまた、小口径のシリンダーテストにおいて特に顕著に生じる。この現象は、高濃度汚泥に見られ、沈降層や圧密層でシリンダーの壁にアーチ状に汚泥が引掛り濃縮作用を妨げるので、見かけ上、濃縮性が低く評価される。

直径の異なるシリンダーによる沈降速度の実測例を、図-4.1.1、図-4.1.2に示す。

前者において、小口径のシリンダーでは高濃度汚泥のブリッジング現象が明確に表われているが、図-4.1.2ではこの現象が表われていない。これらに共通する現象は、小口径において、汚泥の沈降速度が大きくなるというチャンネルリング現象である。ただし高濃度(8,000mg/ℓ以上)領域になると、図-4.1.2においては、両作用が拮抗するのか、口径による見かけ上の差は生じていない。

図-4.1.1と図-4.1.2で現象が違うように、これらの現象は汚泥の種類(発生状況)によって大きく異なる。同一下水処理場の汚泥でも、図-4.1.2に示すように汚泥濃度がほぼ同じでも、口径の影響の大きさは異なる。

このようなことから実験に用いる濃縮実験のシリンダーの口径としては、大きければ大きいほどよいことになるが、本研究室ではシリンダー口径を20cmとしている。これは、図-4.1.2においては、濃度3,000mg/ℓ以上では口径20cm以上では一定の沈降速度に収束しており、図-4.1.1においても8 inch (20 cm) になると大口径のものと比べて大きな差はないことから、妥当であろうと考えられる。

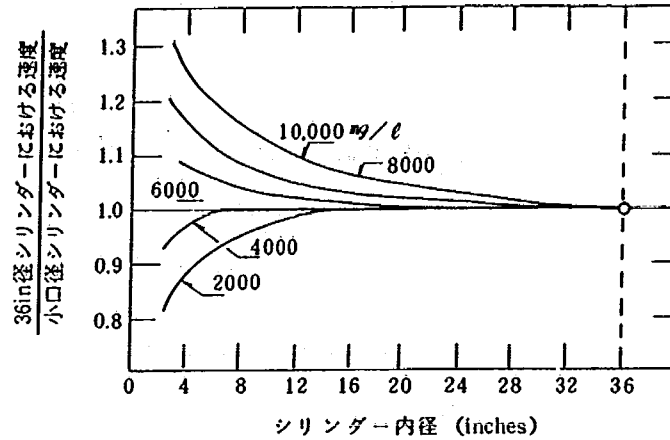


図-4.1.1 シリンダー径の沈降速度に及ぼす影響¹⁾

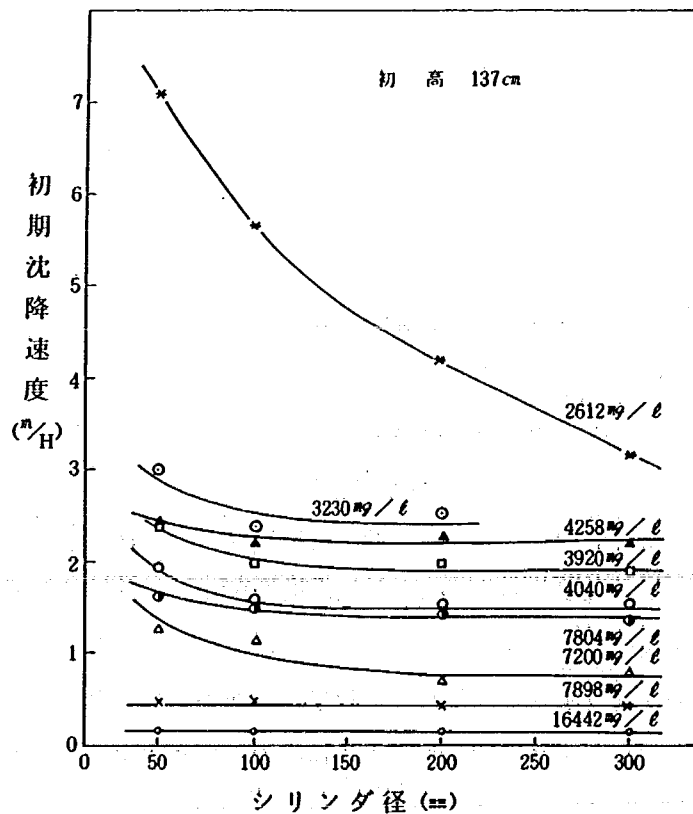


図-4.1.2 シリンダー径の沈降速度に及ぼす影響²⁾

4.2 シリンダーの深さ (初期汚泥深)

シリンダーの深さ、実際としては沈降実験開始をしたときの汚泥界面高さ (汚泥深) は、沈降速度及び濃縮濃度に大きな影響を及ぼす。

沈降速度への影響の例を、図-4.2.1、図-4.2.2に示す。

汚泥深が大きくなるにしたがって影響が小さくなっている。図-4.2.1において、濃度3,856mg/lの汚泥の沈降速度は、汚泥深の小さい方が大きい。これは、同図の他の汚泥及び図-4.2.1と異なっている。

汚泥深が沈降速度に影響を与える機構は、次のように考えられる。

汚泥深が50cmの場合でも、汚泥ブロックの大きさは、その汚泥深に比べて、数百分の1のオーダーであり、ブロックの沈降速度に影響を与えるとは考えられない。ただ、沈降速度は先に述べたように、汚泥界面が等速で沈降しているとみなせる区間から算出している。さらに、汚泥が濃縮するときには、底部から濃度が高くなって来る（図-1.1.3参照）。この高濃度部分の成長速度は、汚泥深に関係なく一定と考えられる。このため、汚泥深が小さいものでは、十分な等速沈降の時間が得られないうちに圧縮沈降になる。この沈降曲線から沈降速度を求めるので、小さな値になると考えられる。

両図によると、汚泥深1 m程度ではほぼその影響はなくなっている。

濃縮汚泥濃度への影響は、濃縮が圧密現象であり、上部汚泥重量が大きいほど一般的には濃度が高くなる。そのためには、汚泥深が大きいほど、つまり深降筒の高さは、高いほどよいことになる。

しかし、実験装置を実験（恒温）室内に設けること、及びピケットフェンスの駆動部分のスペースとを考え併せ当研究室では側深を1 m程度としている。

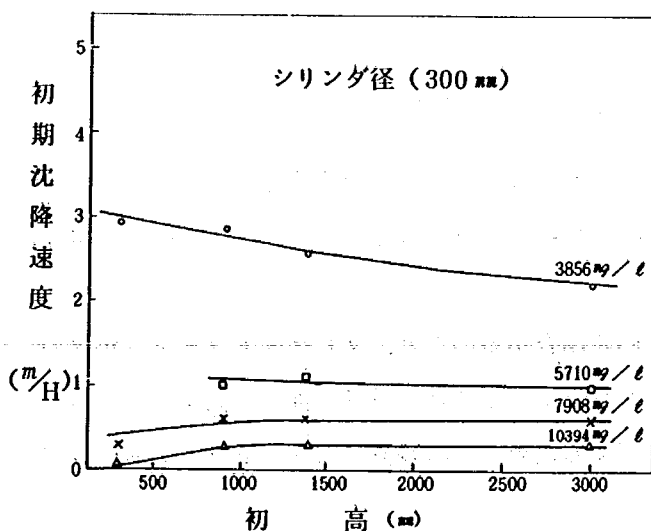


図-4.2.1 初期汚泥深と沈降速度との関係²⁾

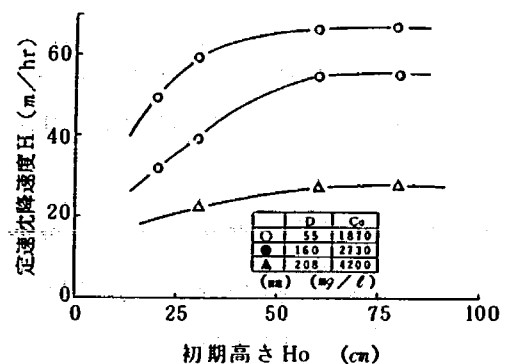


図-4.2.2 定速沈降領域におけるRに及ぼすH₀の影響³⁾

4.3 ピケットフェンス

ピケットフェンスの効果としては、

- ①攪拌翼により、汚泥積層中に水分が上方に移動する間隙を生じさせ、圧密作用を促進させること、
 - ②汚泥中に発生したガスを離脱させ、汚泥の浮上を防止又は濃縮性を改善すること、
- などがある。

ピケットフェンスの有無が汚泥の沈降性に及ぼす影響例を図-4.3.1に示す。

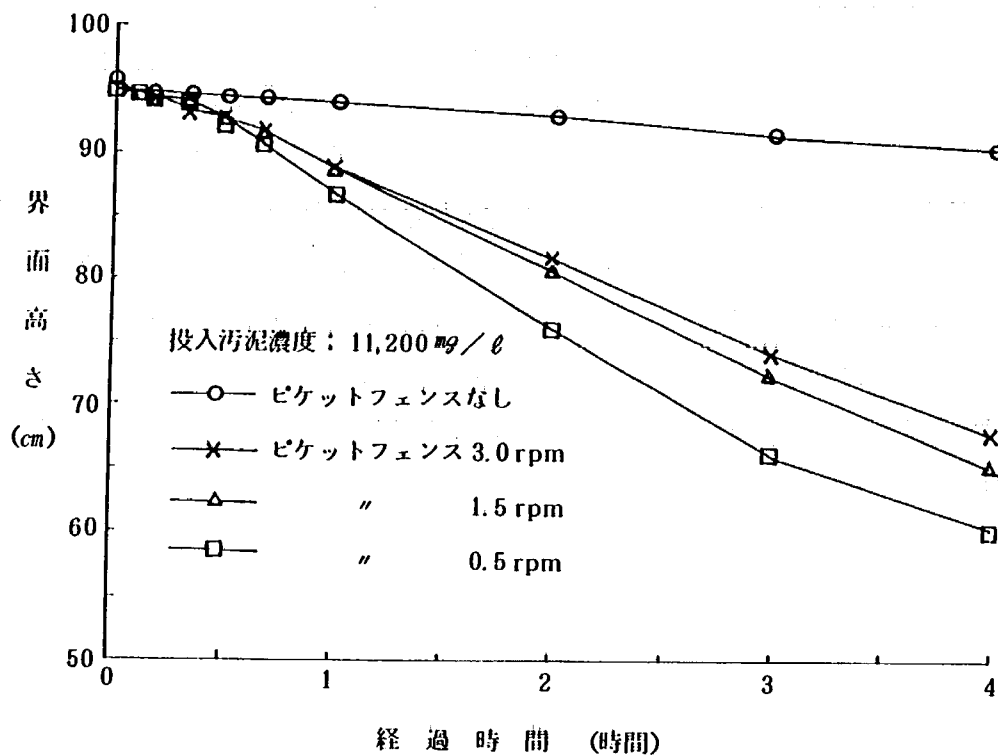


図-4.3.1 沈降速度に及ぼすピケットフェンスの影響

- ①ピケットフェンスが無いものに比べ、ピケットフェンスが有るものの方が速く沈降する
- ②ピケットフェンスの回転数の影響は、0.5, 1.5, 3.0rpm の範囲では大きくはないが、0.5rpmが一番速くなっている。

実濃縮タンクでは、ピケットフェンスが設けられている場合が多いこと、又ピケットフェンスがない場合でも、汚泥かき寄せ機のアームが何らかの攪拌力を与えていること、及び汚泥から発生した付着ガスの影響を除き、できるだけ汚泥そのものの性状を把握するため、実験装置にピケットフェンスを設けている。

参考文献

- 1) A.R.ベシリンド：下廃水汚泥の処理技術，公害対策技術同友会
- 2) 大阪市水道局：下水汚泥の濃縮に関する実験報告書，昭和54年4月
- 3) 柴崎和夫ら：活性汚泥の回分沈降特性，第17回下水道研究発表会講演集，P.269～271，昭和55年度，日本下水道協会

5. 実験データの整理及び解析手法

3章で述べたように沈降実験の結果から沈降速度を得る方法には、①直線の傾きを直接グラフ上の目盛りで読んで算出する方法、②グラフで直線となる数点（3～4）の組合せを目測で選び、最小二乗法によって傾きを算出し、この傾きが最大となる値を沈降速度とする方法、の2つが考えられる。

それぞれの算出方法の妥当性及び使用上の注意を述べる。

5.1 グラフから直接読取する方法

(1) 誤差の要因

本方法は、簡便であるが人為誤差が入りやすく、またグラフのスケールによって求まる沈降速度が異なってしまう可能性がある。そこで本方法で得られる沈降速度のばらつきを調べるため、投入濃度が低い（沈降速度が速い）、中間（同中間）、高い（同遅い）という異なる3つの沈降曲線についてポイント数A（2通り）、点の大きさB（3通り）、時間スケールC（3通り）、算出者D（6通り）を変えて沈降速度を算出した。図-5.1.1～3にポイント数および時間スケールを変えた例を示す。

算出結果を表-5.1.1～3のそれぞれaに示す。得られた沈降速度のばらつきをわかり易くするため、全平均値から σ 、 2σ を超える値にそれぞれ印を付けた。また、算出結果を要因毎に集計して表-5.1.1～3のbに示す。さらに、それぞれの要因の効果を判定するための四元配置法による分散分析の結果を表-5.1.1～3のcに示す。

分散分析¹⁾は、全体のデータの示すばらつきを各要因の効果によるばらつきと実験誤差とに分解し、この誤差に対して要因の効果が無視できるかできないかを検定するものである。方法は、各要因の平方和Sと要因間変動の自由度 Φ から求めた不偏分散Vを誤差の不偏分散で割って分散比F₀を求める。この値についてF検定を行って“要因Aの効果はない”という帰無仮説を判定するもので、F₀がF(Φ_a , Φ_e ; α)より大きい場合、帰無仮説を棄却する即ち要因の効果があると判定する。ここで、F(Φ_a , Φ_e ; α)は要因の自由度 Φ_a 、誤差の自由度 Φ_e 、帰無仮説が棄却される確率 α からF分布表から与えられる数値である。5%有意よりも1%のほう要因の効果がある可能性が高くなる。

沈降曲線毎に、各要因の変動が沈降速度算出値へ及ぼす影響を検討する。

1) 沈降曲線その1

沈降速度の値は、算出者によって高めに出たり、低めに出る傾向があって算出者間のばらつきが非常に大きい。F₀も大きな値となり1%有意となった。その他には時間スケールが単独で、また点の数と算出者、点の大きさと算出者が複合作用で5%の有意となった。沈降曲線その1は、沈降速度が大きいため、グラフ上の傾きが急になり、時間スケールに左右されやすいものと考えられる。また複合作用でみると、算出者によって点の数や点の大きさが変わると直線を引く際に影響を受けるものと考えられる。

2) 沈降曲線その2

他の2つよりも全体の変動が小さかった。算出者のF₀も小さく5%でしか要因の効果可能性がある

表-5.1.1(a) 沈降速度の算出-その1-

算 出 者	時間 スケール	点の大きさ 2 箇所		点の大きさ 1.5 箇所		点の大きさ 1 箇所	
		8 点	11 点	8 点	11 点	8 点	11 点
A	2 cm/h	1.19	1.21	1.17	1.22	△1.31	1.21
	1.5 cm/h	△1.34	1.19	△1.34	1.23	△1.31	1.20
	1 cm/h	1.13	▽1.03	1.24	1.16	1.23	1.18
B	2 cm/h	1.21	1.18	1.09	1.11	1.13	▲1.35
	1.5 cm/h	1.25	△1.34	1.27	1.17	1.12	1.23
	1 cm/h	1.20	1.25	1.27	1.23	1.07	1.18
C	2 cm/h	1.20	1.21	1.21	1.16	1.09	1.08
	1.5 cm/h	1.18	1.23	1.25	1.19	1.12	1.09
	1 cm/h	1.27	1.18	1.18	△1.28	1.18	1.17
D	2 cm/h	1.26	1.24	1.27	1.16	1.26	1.15
	1.5 cm/h	1.22	1.13	1.16	1.25	1.22	△1.30
	1 cm/h	1.12	▽1.05	1.19	△1.28	1.11	1.17
E	2 cm/h	▽0.998	1.17	▽0.997	1.12	1.15	1.17
	1.5 cm/h	1.09	1.17	▽1.05	1.16	1.08	1.11
	1 cm/h	▽1.06	1.08	▽1.05	1.10	▽0.993	▽1.06
F	2 cm/h	▽1.04	▽0.993	▽1.06	1.11	▽1.05	▽0.991
	1.5 cm/h	▽1.04	1.13	▽1.03	▽0.992	▽1.02	▽1.05
	1 cm/h	1.14	1.18	1.10	▽0.965	▽0.979	▽1.00

▲平均 + 2σ 以上 △ + σ 以上 ▽ - σ 以上 ▼ - 2σ 以上

表-5.1.1(b) 算出方法集計結果-その1-

フ ァ ク タ ー		最 大	最 小	平均値	標準偏差	変動係数
ポ イ ン ト 数	8 点	1.34	0.979	1.15	0.096	8.3
	11 点	1.35	0.965	1.16	0.087	7.5
点 の 大 き さ	2 箇所	1.34	0.993	1.16	0.087	7.5
	1.5 箇所	1.34	0.965	1.16	0.091	7.8
	1 箇所	1.35	0.979	1.14	0.095	8.3
時 間 ス ケ ー ル	2 cm/h	1.35	0.991	1.15	0.089	7.7
	1.5 cm/h	1.34	0.992	1.17	0.095	8.1
	1 cm/h	1.28	0.965	1.14	0.088	7.7
算 出 者	A	1.34	1.03	1.22	0.074	6.1
	B	1.35	1.07	1.20	0.078	6.5
	C	1.28	1.08	1.18	0.057	4.8
	D	1.30	1.05	1.20	0.067	5.6
	E	1.17	0.993	1.09	0.058	5.3
	F	1.18	0.965	1.05	0.060	5.7
全 体		1.35	0.965	1.16	0.092	7.9

表-5.1.1(c) 分散分析結果-その1-

原 因	水準数	平方和	自由度	不偏分散	F。	F (0.05)	F (0.01)
A:点の数	2	0.000597	1	0.000597	0.215	4.35	8.10
B:点の大きさ	3	0.010370	2	0.005185	1.87	3.49	5.85
C:時間スケール	3	0.020174	2	0.010087	* 3.64	3.49	5.85
D:算出者	6	0.434707	5	0.086942	※24.4	2.71	4.10
A × B	—	0.001474	2	0.000737	0.266	3.49	5.85
A × C	—	0.000194	2	0.000097	0.035	3.49	5.85
B × C	—	0.023612	4	0.005903	2.12	2.87	4.43
A × B × C	—	0.006904	4	0.001726	0.622	2.87	4.43
A × D	—	0.057746	5	0.011549	* 4.16	2.71	5.85
B × D	—	0.068921	10	0.006892	* 2.49	2.35	3.37
A × B × D	—	0.038806	10	0.003881	1.40	2.35	3.37
C × D	—	0.058476	10	0.005848	2.11	2.34	3.37
A × C × D	—	0.027368	10	0.002737	0.987	2.34	3.37
B × C × D	—	0.102860	20	0.005143	1.85	2.12	2.94
誤 差	—	0.055462	20	0.002773	—	—	—
合 計	—	0.907670	107	—	—	—	—

※: 1%有意であるもの。 *: 5%有意であるもの。

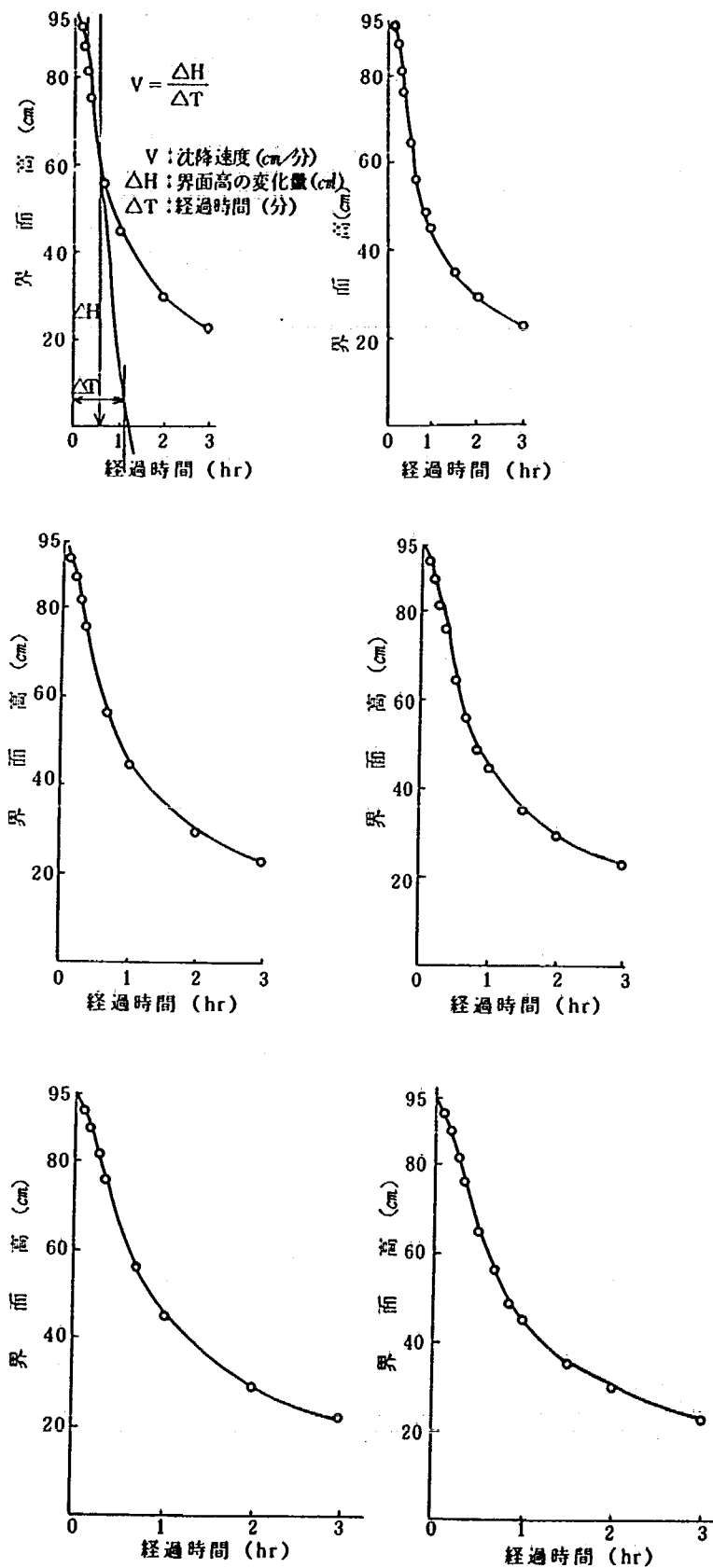


図-5.1.1 界面沈降曲線 (投入濃度：低い) - B 処理場 3 回目 -

表-5.1.2(a) 沈降速度の算出-その2-

算 出 者	時間 スケール	点の大きさ 2 期		点の大きさ 1.5 期		点の大きさ 1 期	
		8 点	11 点	8 点	11 点	8 点	11 点
A	2 cm/h	0.586	0.592	0.585	0.581	0.589	0.587
	1.5 cm/h	0.589	0.596	0.587	0.584	0.590	0.594
	1 cm/h	0.593	0.585	0.594	0.601	0.592	0.594
B	2 cm/h	0.586	0.599	0.583	0.582	0.581	0.587
	1.5 cm/h	0.581	△0.617	0.594	0.590	0.602	0.596
	1 cm/h	0.588	0.605	0.596	0.593	0.596	0.582
C	2 cm/h	△0.608	△0.615	0.593	0.602	0.584	0.598
	1.5 cm/h	0.589	0.595	0.600	0.598	0.584	0.600
	1 cm/h	0.586	0.600	▲0.625	0.589	0.600	0.582
D	2 cm/h	0.602	▲0.640	0.595	0.594	0.602	△0.617
	1.5 cm/h	0.588	0.592	△0.618	▽0.571	0.598	0.586
	1 cm/h	△0.612	▼0.543	0.596	0.583	△0.616	0.603
E	2 cm/h	0.587	0.578	0.582	▽0.571	▽0.574	0.593
	1.5 cm/h	0.582	0.577	0.589	0.594	0.581	▽0.566
	1 cm/h	△0.608	▼0.559	0.598	▼0.543	0.588	△0.609
F	2 cm/h	▽0.563	△0.616	▽0.575	▲0.632	▽0.575	△0.612
	1.5 cm/h	0.581	0.607	0.589	0.604	▽0.566	△0.610
	1 cm/h	0.580	0.580	0.594	0.590	0.588	△0.613

▲平均 + 2σ 以上 △ + σ 以上 ▽ - σ 以上 ▼ - 2σ 以上

表-5.1.2(b) 算出方法集計結果-その2-

ファクター		最大	最小	平均値	標準偏差	変動係数
ポイント数	8 点	0.625	0.563	0.591	0.012	2.0
	11 点	0.640	0.543	0.593	0.018	3.0
点の大きさ	2 期	0.617	0.543	0.592	0.018	3.0
	1.5 期	0.632	0.543	0.592	0.015	2.5
	1 期	0.617	0.566	0.593	0.012	2.0
時間スケール	2 cm/h	0.640	0.563	0.593	0.016	2.7
	1.5 cm/h	0.618	0.566	0.591	0.012	2.0
	1 cm/h	0.625	0.543	0.592	0.017	2.9
算 出 者	A	0.601	0.581	0.589	0.005	0.8
	B	0.617	0.581	0.592	0.009	1.5
	C	0.625	0.582	0.597	0.010	1.7
	D	0.640	0.571	0.598	0.020	3.3
	E	0.609	0.543	0.582	0.016	2.7
	F	0.632	0.563	0.593	0.019	3.2
全 体		0.640	0.543	0.592	0.015	2.5

表-5.1.2(c) 分散分析結果-その2-

要 因	水準数	平方和	自由度	不偏分散	F。	F (0.05)	F (0.01)
A:点の数	2	0.000131	1	0.000131	0.673	4.35	8.10
B:点の大きさ	3	0.000024	2	0.000012	0.613	3.49	5.85
C:時間スケール	3	0.000054	2	0.000027	0.139	3.49	5.85
D:算出者	6	0.002863	5	0.000573	*2.94	2.71	4.10
A × B	-	0.000729	2	0.000365	1.87	3.49	5.85
A × C	-	0.002749	2	0.001375	※7.05	3.49	5.85
B × C	-	0.001127	4	0.000282	1.45	2.87	4.43
A × B × C	-	0.000521	4	0.000130	0.668	2.87	4.43
A × D	-	0.004621	5	0.000924	*4.74	2.71	5.85
B × D	-	0.001194	10	0.000119	0.613	2.35	3.37
A × B × D	-	0.001408	10	0.000141	0.723	2.35	3.37
C × D	-	0.001651	10	0.000165	0.848	2.34	3.37
A × C × D	-	0.001684	10	0.000168	0.864	2.34	3.37
B × C × D	-	0.002540	20	0.000127	0.652	2.12	2.94
誤 差	-	0.003897	20	0.000195	-	-	-
合 計	-	0.025193	107	-	-	-	-

※: 1%有意であるもの。 *: 5%有意であるもの。

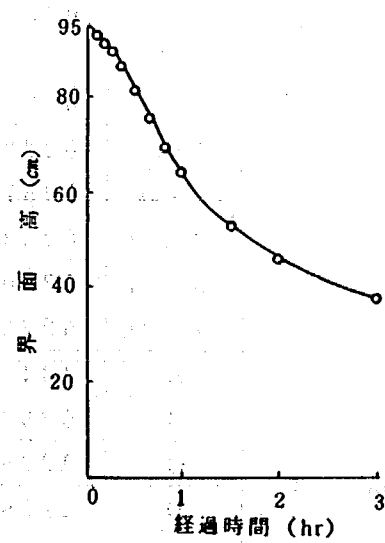
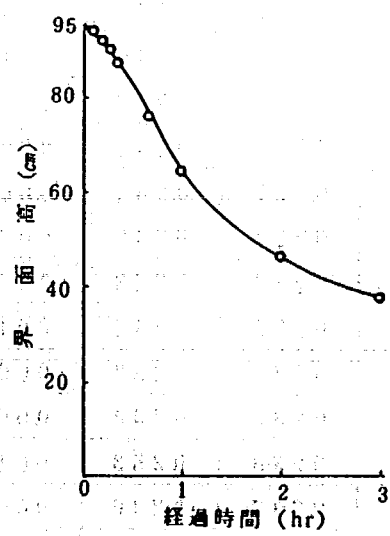
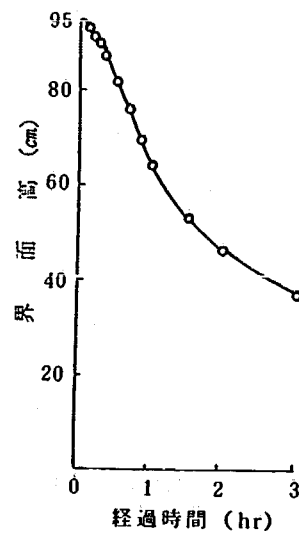
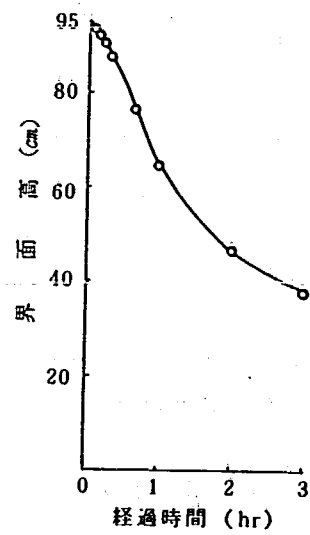
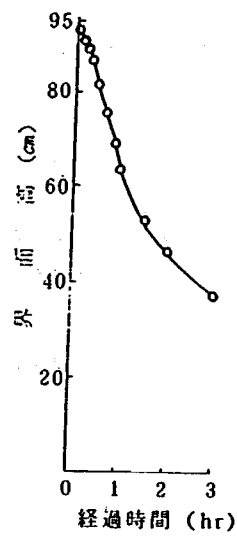
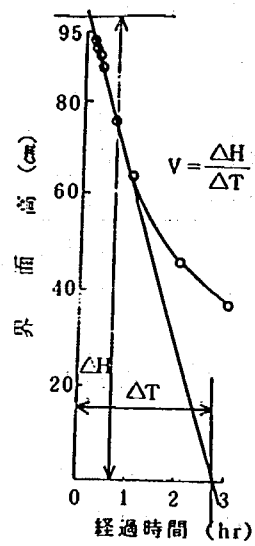


圖-5.1.2 界面沈降曲線 (投入濃度: 中間) - B 处理場 3 回目 -

表-5.1.3(a) 沈降速度の算出-その3-

算出者	時間 スケール	点の大きさ 2 mm		点の大きさ 1.5 mm		点の大きさ 1 mm	
		8 点	11 点	8 点	11 点	8 点	11 点
A	2 cm/h	0.235	0.242	0.237	0.237	0.236	0.240
	1.5 cm/h	0.234	0.235	0.235	0.237	0.237	0.239
	1 cm/h	0.234	0.235	0.235	0.240	0.241	0.238
B	2 cm/h	0.240	0.244	△0.255	0.240	0.237	0.235
	1.5 cm/h	0.242	0.240	0.244	0.240	0.236	△0.257
	1 cm/h	0.245	0.251	0.243	0.245	0.250	△0.256
C	2 cm/h	0.246	△0.257	0.247	△0.258	0.238	0.249
	1.5 cm/h	△0.255	0.242	0.246	△0.253	0.244	△0.252
	1 cm/h	0.251	▲0.275	△0.257	▲0.272	0.249	▲0.267
D	2 cm/h	0.245	△0.259	0.239	0.247	0.239	0.238
	1.5 cm/h	0.241	0.251	0.239	△0.255	0.247	0.246
	1 cm/h	0.245	△0.252	0.246	0.247	0.237	△0.259
E	2 cm/h	▽0.231	0.235	0.235	0.236	▽0.232	0.237
	1.5 cm/h	▽0.232	0.234	0.239	0.238	0.240	0.241
	1 cm/h	0.239	0.237	0.234	0.241	▽0.232	0.234
F	2 cm/h	0.235	△0.257	0.246	0.244	▽0.227	0.245
	1.5 cm/h	0.238	0.243	0.241	△0.260	0.240	△0.258
	1 cm/h	0.236	0.237	▽0.232	0.240	0.238	0.237

▲平均 + 2σ 以上 △ + σ 以上 ▽ - σ 以上 ▼ - 2σ 以上

表-5.1.3(b) 算出方法集計結果-その3-

ファクター		最大	最小	平均値	標準偏差	変動係数
ポイント数	8 点	0.257	0.227	0.240	0.006	2.5
	11 点	0.275	0.234	0.246	0.010	4.1
点の大きさ	2 mm	0.275	0.231	0.243	0.009	3.7
	1.5 mm	0.272	0.232	0.244	0.009	3.7
	1 mm	0.267	0.227	0.242	0.009	3.7
時間スケール	2 cm/h	0.258	0.227	0.242	0.008	3.3
	1.5 cm/h	0.260	0.232	0.243	0.007	2.9
	1 cm/h	0.275	0.232	0.245	0.011	4.5
算出者	A	0.241	0.234	0.237	0.002	0.8
	B	0.257	0.235	0.244	0.007	2.9
	C	0.275	0.238	0.253	0.010	4.0
	D	0.259	0.237	0.246	0.007	2.8
	E	0.241	0.231	0.236	0.003	1.3
	F	0.260	0.227	0.242	0.009	3.7
全 体		0.275	0.227	0.243	0.009	3.7

表-5.1.3(c) 分散分析結果-その3-

要 因	水準数	平方和	自由度	不偏分散	F。	F (0.05)	F (0.01)
A:点の数	2	0.000890	1	0.000890	※29.6	4.35	8.10
B:点の大きさ	3	0.000038	2	0.000019	0.630	3.49	5.85
C:時間スケール	3	0.000159	2	0.000080	2.65	3.49	5.85
D:算出者	6	0.003658	5	0.000732	※24.3	2.71	4.10
A × B	-	0.000032	2	0.000016	0.534	3.49	5.85
A × C	-	0.000011	2	0.000006	0.189	3.49	5.85
B × C	-	0.000358	4	0.000089	* 2.98	2.87	4.43
A × B × C	-	0.000213	4	0.000053	1.77	2.87	4.43
A × D	-	0.000386	5	0.000077	2.57	2.71	5.85
B × D	-	0.000216	10	0.000022	0.720	2.35	3.37
A × B × D	-	0.000160	10	0.000016	0.533	2.35	3.37
C × D	-	0.001019	10	0.000102	* 3.39	2.34	3.37
A × C × D	-	0.000459	10	0.000046	1.53	2.34	3.37
B × C × D	-	0.000353	20	0.000018	0.588	2.12	2.94
誤 差	-	0.000601	20	0.000030	-	-	-
合 計	-	0.008554	107	-	-	-	-

※： 1%有意であるもの。 *： 5%有意であるもの。

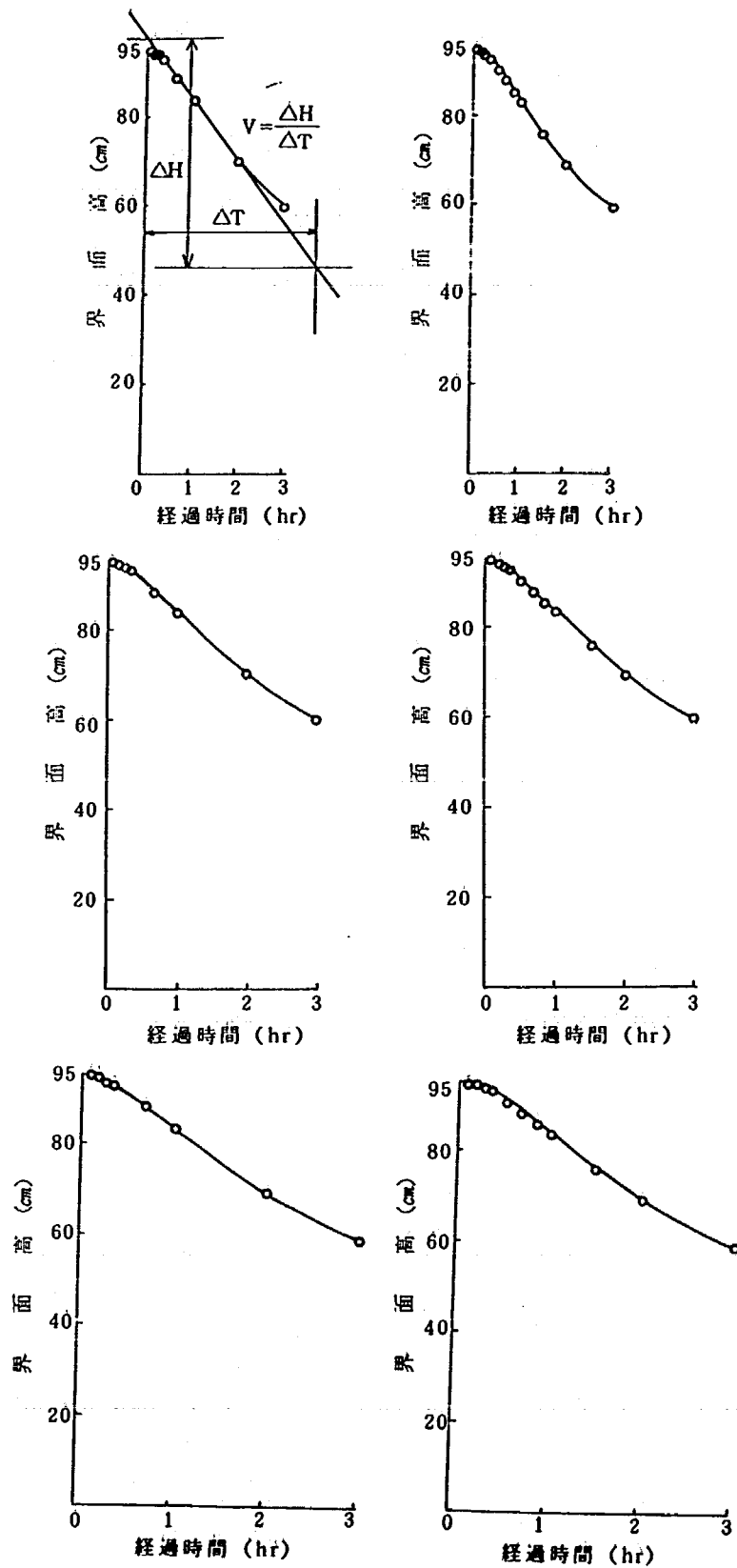


図-5.1.3 界面沈降曲線 (投入濃度: 高い) - B処理場 3回目 -

という判定が下せなかった。これは、その2の沈降速度を算出したのが他の2つの算出よりも後であったため、算出者が慣れていたせいであるか、あるいは、この沈降曲線の直線部分の傾きがグラフ上から ΔH と、 ΔT を読みとる際に最もバランスが良く誤差が出にくくなるといういずれかの理由によるものと考えられる。その2において1%有意となったのは、点の数と時間スケールの複合作用である。これはグラフを見ると50分後の界面高の値が低めであるため時間スケールが変わった場合に、この点を入れるのといれないので差が生じるためと考えられる。その他には、点の数と算出者の複合作用も5%有意となっている。これも、50分後の界面高の値が影響しているものと考えられる。

3) 沈降曲線その3

その1と同様、算出者間のばらつきが大きくF₀の値も大きく1%有意となった。また、点の数も1%有意となり8点に比べ、11点の変動が大きくなっている。これは、30分及び1時間半の界面高のデータが、直線を引く際に大きく影響するものと考えられる。複合作用では、時間スケールと算出者の組み合わせが1%有意、点の大きさと時間スケールが5%有意となった。

(2) 使用における注意事項

以上の結果をまとめるとグラフから直接読みとる算出方法では、次のようなことを注意する必要がある。

- a. 沈降速度を求める際には、算出者の及ぼす要因がかなり大きく、できるだけ同一の慣れた人間が算出することが望ましい。
- b. 沈降速度により直線となる区間が異なり、それに合わせて界面高を測定する時間を変えることが望ましいが、予め沈降速度を予想することは難しく、さらに一度に3ケースの汚泥濃度の実験をする際、それぞれ違う時間間隔で界面高を測定することは非常に煩雑である。そこで、測定時間間隔としては30分までは5分間隔で、その後1時間までは10分間隔、その後3時間までは30分間隔で測定するようにすれば大体の沈降速度をカバーできると考えられる。なお、3時間以降は1時間間隔とする。
- c. グラフに実験結果をプロットして沈降速度を求める際、時間軸のスケールを固定して沈降曲線を画くと、沈降速度がかなり大きい場合は ΔH に比べ ΔT が非常に小さくなる。逆に、沈降速度が極めて小さい場合は、 ΔH が ΔT に比べ非常に小さくなる。したがって、これらの場合には、直線を引く際の僅かな傾きの違いでも片方の値が相対的に大きく変動すること、及び最小目盛未満で目測する部分の重みが大きくなることなどから沈降速度はばらつき易くなる。

これらの沈降曲線を同一グラフ上に整理する場合、時間軸の一目盛当りの時間を小さくとると、目測のときの誤差が大きくなるので、なるべく一目盛当りの時間を大きくすることが必要である。

一方、時間軸を余り大きくすると、各点の間隔が大きくなり開いてしまうため、直線部分の判別が難しくなり、算出値のばらつきが生じる(表-5.1.4参照)。

表-5.1.4 沈降速度算出結果 (算出者同一5回繰り返し)

沈降曲線	最大値	最小値	平均値	標準偏差	変動係数
その1	1.21	1.17	1.19	0.013	1.1%
その2	0.598	0.585	0.590	0.005	0.8%
その3	0.250	0.237	0.244	0.005	2.0%
その1※	1.18	1.13	1.16	0.017	1.5%
その3※	0.261	0.232	0.248	0.010	3.8%

※グラフの時間スケールを変えてその2と同程度の傾きにして算出した。

界面高の測定の最小単位は5分であるため、時間軸スケールは、5分/1mmの倍数であると使い易いと思われる。さらに、界面高軸とのバランスも考えるとグラフの書式は界面高1mをグラフ上で10cmとした場合、時間5分を2mmすなわち時間を2.4cmとするのが適当であろう。

5.2 最小二乗法による算出方法

本法での算出方法は次のとおりである。

- ①沈降曲線から等速沈降と見なせる区間を選び、その区間内の3点ないし4点の組合せを選ぶ。
- ②それぞれ最小二乗法により傾きを算出する。これが沈降速度である。
- ③上記組合せのうち沈降速度が最大となるものが等速沈降速度である。

本法は、傾きの最大となる数点の組み合わせを選択するために、数回の計算を繰り返さなければならないが、算出者の違いによる人為的な誤差を少なくすることができる利点がある。沈降実験Aについて本法により算出した沈降速度の結果を表-5.2.1に示す。計算に使用する点の数を2、3、4点に変えて算出した。

3点と4点の値は、だいたい一致しており、B下水処理場の第3回目の結果を用いて検討した①の算出方法による全体の平均値と近い値となった。A下水処理場第1回目の投入汚泥濃度6,270mg/ℓのケースでは3点と4点でかなり差が出ているが、このケースは全ケース中で最も大きい沈降速度となっていることから、直線が立ち過ぎて実験での測定間隔では3点以上の点が直線範囲に入らなかったためと考えられる。

したがって、界面高測定の時間間隔を適当に選べば、最小二乗法自体はそれほど難しい計算ではないので、3点ないし4点を採用して本法で沈降速度を算出することにより人為誤差の少ない値が得られるものと考えられる。

表-5.2.1 汚泥の沈降速度

処理場名	実験回数	投入SS濃度 (mg/l)	沈降速度 (cm / 分)		
			2 点	3 点	4 点
A	第 1 回	6 2 7 0	2.08 (15→20)	1.88 (10→20)	1.65 (5→20)
		9 5 9 0	0.615 (20→40)	0.558 (20→60)	0.557 (15→60)
		1 2 4 0 0	0.310 (40→60)	0.265 (20→60)	0.251 (15→60)
	第 2 回	5 9 5 0	1.20 (15→20)	1.07 (15→40)	1.04 (10→40)
		8 1 7 0	0.545 (40→60)	0.508 (20→60)	0.508 (15→60)
		1 0 5 0 0	0.250 (40→60)	0.220 (20→60)	0.206 (20→120)
	第 3 回	4 4 6 0	1.24 (10→15)	1.99 (10→20)	1.11 (5→20)
		6 2 0 0	0.620 (10→15)	0.560 (10→20)	0.556 (10→40)
		8 8 8 0	0.280 (40→60)	0.268 (20→60)	0.248 (20→120)
B	第 1 回	7 9 5 0	0.260 (40→60)	0.249 (40→120)	0.240 (20→120)
		1 0 3 0 0	0.127 (60→120)	0.121 (60→190)	0.121 (40→190)
		1 5 4 0 0	0.037 (120→180)	0.033 (60→180)	0.032 (60→240)
	第 2 回	4 9 1 0	0.660 (20→40)	0.640 (20→60)	0.630 (15→60)
		6 6 6 0	0.260 (60→120)	0.258 (40→120)	0.254 (20→120)
		8 9 8 0	0.145 (40→60)	0.141 (40→120)	0.132 (40→180)
	第 3 回	3 0 9 0	1.16 (10→15)	1.16 (10→20)	1.04 (5→20)
		4 2 5 0	0.590 (40→60)	0.580 (20→60)	0.576 (15→60)
		6 1 9 0	0.240 (40→60)	0.237 (40→120)	0.236 (20→120)

備考) 沈降速度の算出は、以下の通りに行った。

2 点; 最大速度となる 2 点を選び算出する。

3 点; 直線となる 3 点を選び最小二乗法で算出する。

4 点; 直線となる 4 点を選び最小二乗法で算出する。

*この表は 30 分, 50 分, 1 時間半後の界面高測定がないものを用いている。

参考文献

- 1) 外島 忍著: 要説 品質・管理, 日本規格協会

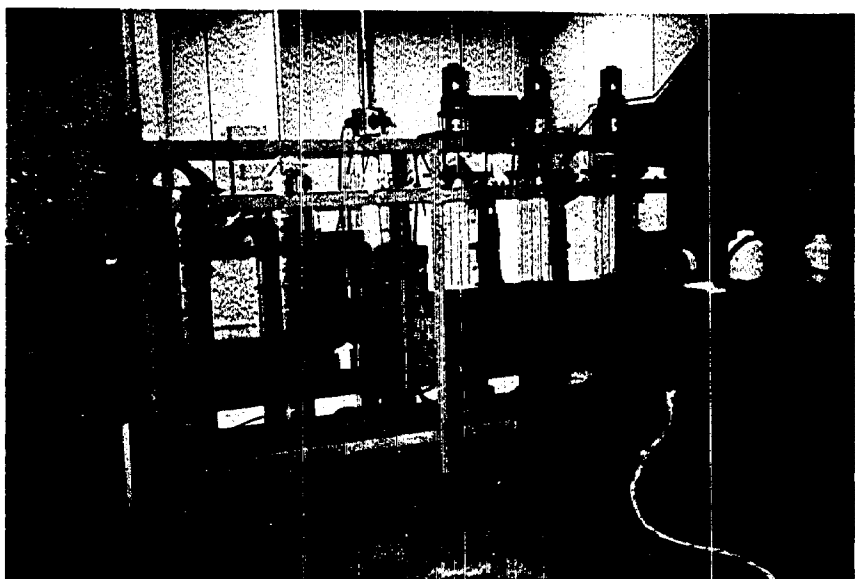


初 期

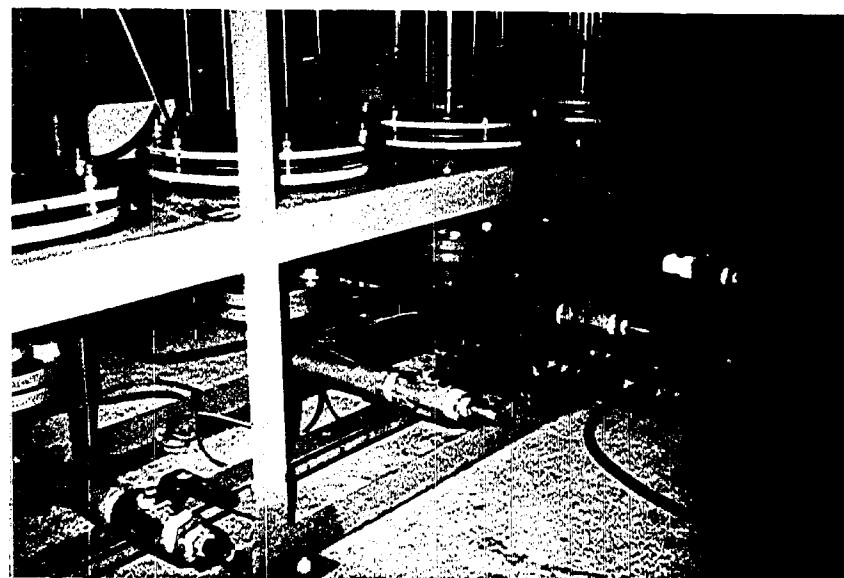


終 期

—— 沈降実験例 ——



全 景



汚泥投入・引抜用コック

—— 沈降実験装置 ——

汚泥性状の改善に関する調査報告書(Ⅰ)
—汚泥濃縮性評価のための実験手法の提案—

ISSN 0386-5878
上研資料第2334号
昭和61年3月(1986)

要 旨

濃縮は汚泥の含水率を低下させ、汚泥容積を減少させる操作である。濃縮工程は、消化、脱水あるいは汚泥処分の前処理と位置づけられ、濃縮の成否はそれ以降のプロセスの施設容量や経費に大きな影響を与える。本調査は、汚泥の濃縮性とそれに係わる汚泥性状を明らかにし、ひいては汚泥濃縮性改善のための汚泥性状改善手法を明らかにしようとするものである。

本報告書は、その前段として汚泥の性状と重力濃縮性の関連を検討するにあたって必要な沈降速度や濃縮汚泥濃度を回分沈降実験により求める手法についてとりまとめたものである。

なお、この実験手法は重力式汚泥濃縮タンクの管理手法としても使用できる。

キーワード：下水汚泥、重力濃縮、汚泥性状、濃縮性、沈降速度、濃縮汚泥濃度



郵便はがき

四十円切手
をはって下
さい。

305-□□

茨城県筑波郡豊里町大字旭一番地

建設省土木研究所

汚泥研究室 御中

No. _____

No. _____

配布先氏名

配布先住所



土木研究所資料第2334号 部

上記のとおり受領しました。

所 属 (住所)

氏 名

印