



浮上濃縮技術

平井孝明 環境装置事業部
環境本部
技術部
第4グループ
グループ長
工学博士

まえがき

浮上分離法は懸濁粒子に気泡を付着させて見掛けの比重を液相のものより小さくすることにより分離濃縮する方法で、産業排水や下水の処理法として広く活用されている。

浮上濃縮法については、実験的なものが多く、理論的なものは非常に少ない。特に、下水処理汚泥の浮上濃縮に関しては、実験的な研究がほとんどで浮上濃縮機構が十分解明されているとは言えない。これは、浮上濃縮過程においては、気相・固相・液相の三相間の相対運動や多数の因子が複雑に相互作用するため、特定の因子の作用範囲または影響範囲を実験的に求め難いためである。こうした問題に対処するため当社では、浮上濃縮機構に関与する因子を理論的考察のもとモデル化し、数値シミュレーションをおこなうことにより、複雑に相互作用する因子のうち真に浮上濃縮性能に影響を与える因子等について検討をおこなっている。本編ではそれらについて概説する。

1. モデル化^{1)~3) 他}

濃縮機構を固相（湿潤状態での汚泥）、気相（気泡）、および液相の三相から構成される混合流体の運動であるとし、作用する力として、汚泥粒子（固相）の水中重量、汚泥粒子の接触による有効応力、汚泥粒子にはさまれている気泡の変形分による有効応力の代替的伝達分、気相による浮力、間隙水が固相に対して相対運動するときに固相に作用する流体

粘性力、間隙水が気相に対して相対運動するときに気相に作用する流体粘性力、気相が固相に対して相対運動するときに固相に作用する応力の総和がゼロになる、とした考え方をもとに連続の式および運動方程式を求め、それらをもとにモデル式を導くと以下の式となる。

$$V_s = \varepsilon_s \int_0^w \frac{1}{\varepsilon_s \rho_{sw}} \frac{RT}{P_a + P_o} g(t') dw - \frac{K}{\mu} (\varepsilon_s + \varepsilon_g) \left[\varepsilon_s \rho_{sw} \frac{\partial P_s}{\partial w} + \beta \varepsilon_s (\rho_{sw} - \rho_l) g + (1 - \gamma) \varepsilon_g (\rho_g - \rho_l) g \right] \quad (1)$$

$$\frac{1}{\rho_{sw}} \frac{\partial \varepsilon_s}{\partial t} + \varepsilon_s^2 \frac{\partial}{\partial w} \left(\frac{V_s}{\varepsilon_s} \right) = 0 \quad (2)$$

ここで、 V : 体積速度、 ε : 体積分率、 w : 質量、 t, t' : 時間、添字 s, l, g : それぞれ固相、液相、気相を示す。

モデル式(1)、(2)式を差分化し、数値計算をおこなうことにより、浮上濃縮機構に複雑に相互作用する各因子がそれぞれにおよぼす影響について解析が可能となる。浮上濃縮機構に作用する因子をまとめて整理すると、次のようになる。

(1) 固定（既知）値として扱ってよい因子

動粘性係数	: μ	[$\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$]
気体定数	: R	[$\text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$]
重力加速度	: g	[$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$]
大気圧	: P_{ao}	[Pa]
表面張力 (大気圧下)	: P_{σ}	[Pa]
水の密度	: ρ_1	[$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]
空気の密度	: ρ_g	[$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]

(2) 操作因子

固形物負荷	: L_s	[$\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$]
気固比	: A/S	[$\text{kgAir} \cdot \text{kgSS}^{-1}$]

(3) 汚泥性状に係る因子

1) 汚泥の性状に起因する因子

透水係数	: K	[m^{-2}]
有効応力	: P_s	[Pa]
応力の伝達率	: β, γ	[—]
ガス発生 (消費)速度	: $g(t')$	[$\text{kgAir} \cdot \text{kgSS}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$]

2) 汚泥物性

汚泥湿潤密度	: ρ_{sw}	[$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]
汚泥乾燥密度	: ρ_{sd}	[$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]
汚泥の湿潤時 と乾燥時の体積比	: α	[—]

(4) フロス搔取因子

フロスの搔取 の時間間隔	: T_f	[s]
フロス厚	: H	[m]

2. 計算結果

他の因子を一定としてある特定の因子のみが変化した場合における濃縮固形物（フロスと称す）濃度（ C_s ）との関係を以下に示す。

1) 操作因子^{4), 5)}

第1, 2図に示す。

2) 汚泥性状に係る因子

汚泥の性状に起因する因子を第3~6図に示す。汚泥物性⁵⁾を第3~7図に示す。

3) フロス搔取因子⁶⁾

第8, 9図に示す。

3. まとめ

フロス濃度に影響を与える因子としては、操作因子（固形物負荷、気固比）および汚泥の物性等が挙げられる。固形物負荷を大きくすると濃度は低下するが概ね50~60 $\text{kg}/\text{m}^2/\text{d}$ 以上となると実測値計算値共濃度の低下率は低くなる。また、気固比を大きくすると濃度は増加するが、気固比0.04 kg/kg 以上に

なると濃度の増加率は小さくなり、ほぼ横バイとなる。

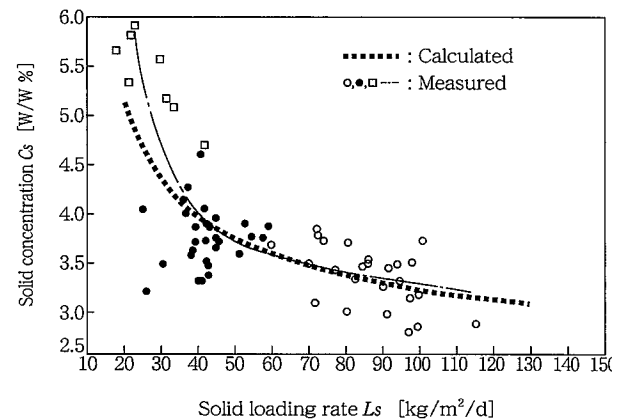
第7図は、汚泥の物性を代表してSVIにて示したもので、SVIもフロス濃度に大きく関与していることが解る。なお、SVIと汚泥物性には、以下の関係⁷⁾がある。

$$\rho_{sw} = 10.39 - 0.028(SVI) \quad (3)$$

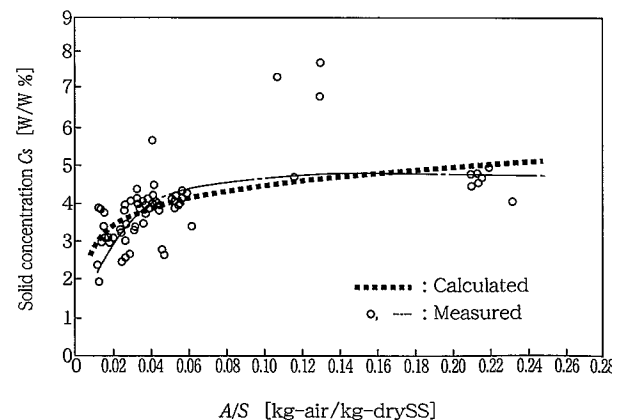
$$\alpha = 15.46 + 0.0223(SVI) \quad (4)$$

$$\rho_{sw} - \rho_1 = \frac{1}{\alpha}(\rho_{sd} - \rho_1) \quad (5)$$

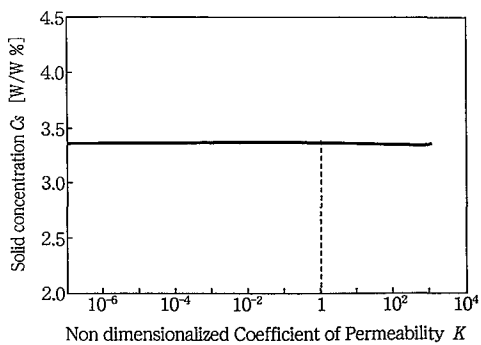
第10図は、フロスの鉛直方向の固相分率を示したもので、計算結果では上方に従い圧密が進行し、固相分率が増加しているのに対し、実測値では上部において低下している。これは、フロスの搔取りによ



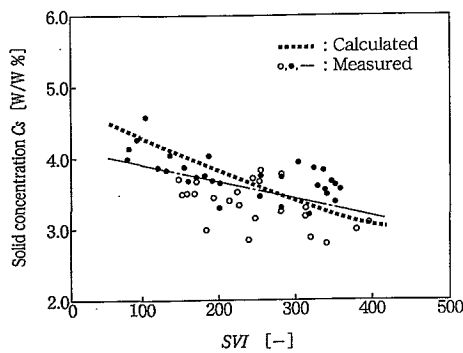
第1図 固形物負荷とフロス濃度との関係
Fig. 1 Relationship between L_s and C_s



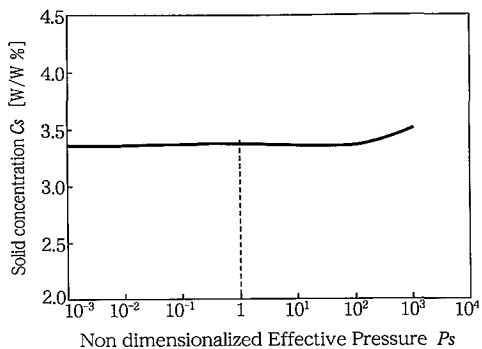
第2図 気固比とフロス濃度との関係
Fig. 2 Relationship between A/S and C_s



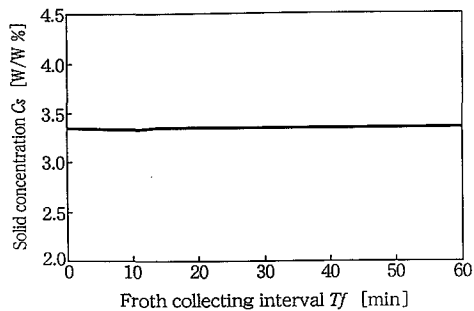
第3図 透水係数とフロス濃度との関係
Fig. 3 Relationship between K and C_s



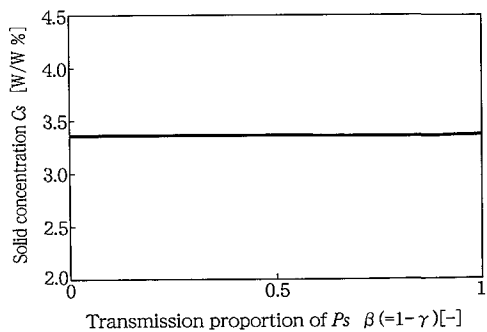
第7図 SVIとフロス濃度との関係
Fig. 7 Relationship between SVI and C_s



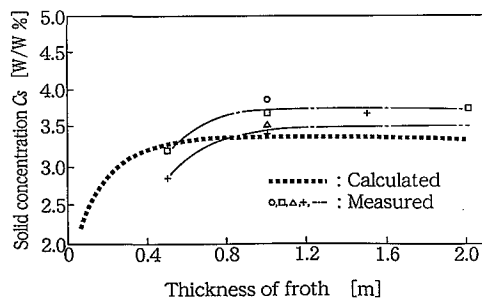
第4図 有効応力とフロス濃度との関係
Fig. 4 Relationship between P_s and C_s



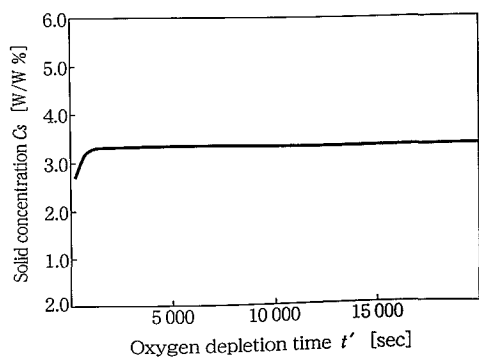
第8図 掻取時間間隔とフロス濃度との関係
Fig. 8 Relationship between T_f and C_s



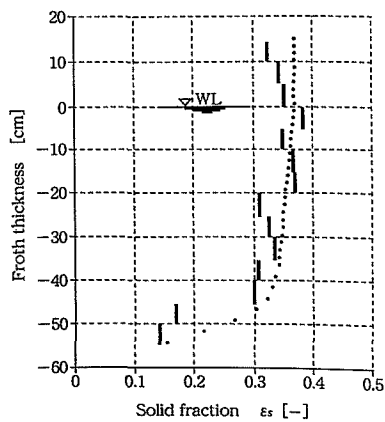
第5図 応力伝達率とフロス濃度との関係
Fig. 5 Relationship between $\beta(=1-\gamma)$ and C_s



第9図 フロス厚とフロス濃度との関係
Fig. 9 Relationship between thickness of froth and C_s



第6図 酸素消費速度とフロス濃度との関係
Fig. 6 Relationship between t' and C_s



第10図 固相分率のフロス鉛直分布
Fig. 10 Vertical distribution of solid fraction

る攪乱によるものと考えられる。固相分率の低下は、最終的にはフロスの濃度の低下となるため、実設備ではフロスの掻取り方法（装置の掻取り効率）および掻取間隔についてもフロスの濃度に影響を与える因子となる。また第9図が示す様に、計算結果ではフロス厚が概ね0.4 mで圧密が完了するのに対し、実装置では0.8~1.0 mを要している。このことも、フロスの掻取りによる攪乱の影響と考えられる。

む す び

シミュレーションをおこなうことにより、実験では求め難い特定因子の影響範囲等を明確にすることができ、さらに、浮上濃縮設備についての改善点の模索および構成装置等の定量的な性能評価をおこなうことができる。

当社では、実績データおよびシミュレーションによる計算結果をもとに、浮上濃縮設備のさらなる高性能化および高効率化に取り組んでいる。

[参考文献]

- 1) 楠田哲也, 平井孝明: 下水道協会誌論文集 (浮上濃縮のモデル化とシミュレーション), No.18, Vol.1, No.419, (1997), p.76
- 2) 楠田哲也, 平井孝明: 下水道協会誌論文集 (浮上濃縮汚泥濃度の予測と向上に関する研究), No.18, Vol.1, No.419, (1997), p.89
- 3) 楠田哲也, 張 満良, 平井孝明: 下水道協会誌論文集 (フロス内気泡の形状から見た浮力の有効性), No. Vol.28, No.334, (1979), p.54
- 4) EPA: Process Design Manual for Sludge Treatment and Disposal (1979)
- 5) 建設省都市局下水道部, 日本下水道事業団: 汚泥処理手法の改善に関する調査報告書, (1983), p.43
- 6) 日本下水道事業団技術開発部編: 効率的な汚泥濃縮法の評価に関する第3次報告書-浮上濃縮法について- (1994)
- 7) 楠田哲也, 張 満良, 平井孝明: 下水道協会誌論文集 (下水余剰汚泥浮上濃縮時の濃度予測指標に関する実験的研究), No.1, Vol.27, No.316, (1990), p.88