

京都大学工学部 学生員 熊谷 憲二
正員 宗宮 功
鹿島建設 小池 勝則

1. はじめに 高次処理としての砂ろ過法の目的は有機性固形物の除去であるが、上水フロックと性状が異なるため、本研究ではプラント実験を通じて、生物フロックの圧密性ならびに粒度分布をろ過モデルに導入することを試みた。まずろ層厚15cmの均一ろ層（以下小ろ層と記す）を用いた実験により、ろ速、ろ材径およびろ過方向におけるろ過モデルのパラメータを決定し、さらに多層ろ過理論を導入し若干の修正を加えたモデルをろ層厚60cmの成層ろ層に対して適用した。

2. 実験条件・方法

活性汚泥法の終末流出水を混合槽に貯留し、SS濃度を30mg/l前後に調整してろ過原水とした。ろ過方式は上向流および下向流重力式定速ろ過とし、使用したろ過筒は内径10cm、高さ250cmの透明塩ビ製で、小ろ層実験では砂層表面から25cm間隔、成層ろ層実験では5~10cm間隔でサンプリングタップおよびマノメータタップを取り付けた。上向流では幅1cmの塩ビ製十字形のろ層押えでろ過砂の浮上を防止した。測定項目は濁度、損失水頭および流量とし、30分~1時間毎に測定した。ろ層構成は表-1に示す。

表-1 ろ層構成

ろ速	200, 300, 400	1/day
小ろ材径	1.00~1.19	1.19~1.41
d	1.41~1.68	1.68~2.00
ろ層厚	2.00~2.36	mm
成層ろ層厚	15 cm	
ろ材径	1.00~2.36 mm	均等係数
有効径	1.12 mm	1.63
ろ層厚	60 cm	
砂層空隙率	0.42	
支持砂層	粒径 5~10 mm	層厚 15 cm

3. 実験結果ならびに砂ろ過プロセスのモデル化

i) 均一小ろ層におけるモデル化 重量濃度で表わした単位ろ層体積当りの抑留量の増大に対し、阻止率が単調減少の傾向を示したことから、抑留パターンは毛細管モデルで記述できると考えた。抑留汚泥の圧密過程を考察するため、ろ層間隙が多く毛細管で構成されると仮定して Kogeny-Carman式を変形した $\frac{\partial H}{\partial x} = \left(\frac{\partial H}{\partial x}\right)_0 \cdot \left(\frac{f_0}{f_0 - \sigma}\right)^2 \dots (1)$ に初期空隙率 f_0 、初期損失水頭 $\left(\frac{\partial H}{\partial x}\right)_0$ 、ならびに実験値 $\frac{\partial H}{\partial x}$ を与えて抑留物の体積濃度 σ を計算した。つぎに $r = \sigma/\rho_s \dots (2)$ で定義する比体積（密度の逆数）を時間に対してプロットし、汚泥の圧密速度式 $-\frac{dr}{dt} = k(r - r_\infty) \dots (3)$ を積分した次式 $r = r_0 + (r_0 - r_\infty) \cdot e^{-kt} \dots (4)$ により圧密の経時変化をモデル化した。ここに k ：圧密係数、 r_0 ：初期比体積、 r_∞ ：圧密完了時の比体積で実験値の外挿により求まる。計算結果は表-2、図-1に示すように、下向流の方が、またろ速の大きい方が圧密は大きくなる。

表-2 比体積と圧密係数

	v (m^3/day)	r_0 (cm^3/g)	k ($1/hr$)	r_∞ (cm^3/g)
上向流	400	65.0	0.12	22.6
	300	70.0	0.11	
	200	90.0	0.11	
下向流	400	47.5	0.090	10.4
	300	54.6	0.092	
	200	74.7	0.097	

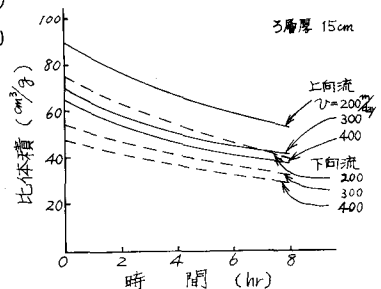


図-1 比体積の経時変化

ここに重量濃度 σ が体積濃度 σ に変換されたので、阻止率は次式 $\lambda = \lambda_0 \cdot \left(1 - \frac{\sigma}{f_0}\right)^Y \cdot \left(1 - \frac{\sigma}{\sigma_u}\right)^Z \dots (5)$ で記述できる。ろ過条件の違いは毛細管モデル項 $\left(1 - \frac{\sigma}{f_0}\right)^Y$ で示され、間隙流速項 $\left(1 - \frac{\sigma}{\sigma_u}\right)^Z$ は限界抑留量 σ_u を導入するための付加的な項とみなし、 $Z = 1$ を与えた。なお実験値の外挿により、 $\sigma_u = 0.37$ ($v = 400$ 1/day), 0.38 (300 1/day), 0.39 (200 1/day) とした。実験値を(5)式に回帰させて Y および λ_0 を求め、さらにろ速、ろ材径による定量化を行なうために、 $Y = a_1 v^{m_1} d^{n_1}$ (a_1, m_1, n_1 ；定数) $\dots (6)$ で重回帰し、上向流： $Y = 15.8 v^{-0.51} d^{-1.18}$ (相関係数 0.69)、下向流： $Y = 40.0 v^{-0.81} d^{-1.11}$ (相関係数 0.57) を得た。これより、本実験のろ層では上向流の方が、またろ速、ろ材径とも小さくなるに従って Y は大きくなる傾向が見られた。いずれのろ過方向においても、阻止率に

及ぼす影響はろ材径の方が卓越し、とくに上向流でその傾向が強い。

阻止率に及ぼす濁質粒度分布の影響は、原水中の粒度分布の変化をその濁度に対応させて考察した。ろ層厚を2.5 cm に区切ったろ層の初期空疎率 λ_0 とそのろ層への流入濃度 C_0 との関係の一例を図-2に示す。図より λ_0 と C_0 とは線形関係にあり、その直線の傾き α は単位濁度変化当りの λ_0 の変化量を表わすので、ろ速毎に α とろ材径 d との関係を求め、図-3に一例を示す。多少のばらつきはあるが、上向流と下向流とで注目すべき違いは見られないので、ろ速毎に $\alpha = m_3 d + n_3 \dots (7)$ で回帰し、400 %day: $\alpha = 0.25d - 0.06$, 300 %day: $\alpha = 0.12d + 0.11$, 200 %day: $\alpha = -0.32d + 0.90$ を得た。一方、流入濁度の基準値として20 %を採用し、図-2に一例を示したような図からそのときの初期阻止率 λ_0^{20} を求め、 $\lambda_0^{20} = a_2 v^{m_2} d^{n_2} \dots (8)$ で重回帰して、上向流: $\lambda_0^{20} = 2525 v^{-0.87} d^{-1.27}$ (相関係数 0.89), 下向流: $\lambda_0^{20} = 2598 v^{-0.86} d^{-1.46}$ (相関係数 0.98) を得た。先述の γ と同様、 λ_0^{20} についてもろ材径の影響が卓越している。(7)、(8)式および $\lambda_0 = \lambda_0^{20} + \alpha(C - 20)$ (C : 濁度) $\dots (9)$ を組み合わせると、深さ方向の初期阻止率の減少が記述できる。

(1)~(9)式(3)式を除く)ならびに水質変化式 $\frac{\partial C}{\partial x} = -\lambda C$, 連続式 $\frac{\partial C}{\partial x} = -\frac{1}{v} \frac{\partial C}{\partial t}$ を用いて行なった小ろ層に関する計算結果は、実験値とよく一致した。ただろ材径が小さい場合には、時間の経過に伴い実験値との差が大きくなる傾向が見られた。これは、圧密を深さ方向に一定であると評価したこと起因するものと考えられる。

ii) 成層ろ層におけるモデル化とシミュレーション 均一ろ層におけるろ過モデルを成層ろ層に適用するため、60 cmのろ層を深さ方向に4分し、幾何平均径で各層を代表させて各モデル式の係数を与えた。さらに2つの補正を加えた。実際のろ層ではろ材径の偏在が見られ、ろ過運転時の流れは大粒径ろ材の部分に片寄るために阻止率は予想されるより低くなると思われる。その補正係数を ξ (< 1) とすると、(5)式は修正されて $\lambda = \xi \cdot \lambda_0 \cdot (1 - \frac{C}{C_0})^{\gamma} \cdot (1 - \frac{C}{C_0}) \dots (10)$ 。もう一つは圧密係数 k に関するものである。小ろ層においてはろ層が急速に閉塞するから抑留汚泥の圧密も急速に進み、従って小ろ層の実験値より小さな値を与える必要がある。試行錯誤により ξ , k の値を推定した結果、 $\xi = 0.8$ および上向流: $k = 0.10 \text{ 1/hr}$ ($v = 400 \text{ %day}$), 0.09 1/hr (300, 200 %day), 下向流: $k = 0.08 \text{ 1/hr}$ ($v = 400, 300 \text{ %day}$), 0.09 1/hr (200 %day) を得た。この値を用いた計算結果は、上向流 400, 300 %dayにおいてよく現象を説明しているが、200 %dayでは損失水頭のパターンがかなり異なり、圧密を一樣に評価した影響があらわれている。また下向流においては、実験値ではろ過初期に一時阻止率の向上が見られ、毛細管モデルによる説明には限界があると考えられる。

さらに修正したろ過モデルに基づくシミュレーションにより、上向流におけるろ層厚の影響を考察してみた。流入SS濃度30 %、ろ層の有効径と均等係数は成層実験と同一とした。その結果を図-4に示すが水質、損失水頭の両面、とくに水質面での改善が著しい。これは、上向流ではろ層全体が有効に使用されるためろ層厚の増大に伴い抑留容量がふえること、ならびに中層、下層部で抑留量がふえ上層の負荷が緩和されるためと考えられる。

4. おわりに 本研究では細部にいくつかの問題点はあるが、二次処理水の砂ろ過が上述の一連のモデルにより記述できること、ならびに各係数に関する重回帰式や線形回帰式の妥当性が実験的に確認された。

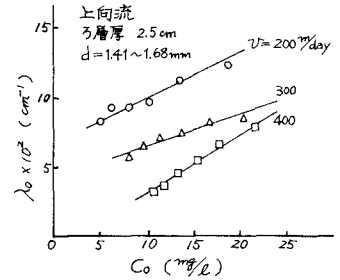


図-2 流入濁度による λ_0 の変化

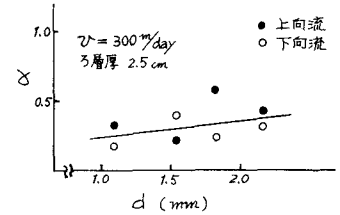


図-3 α vs. d

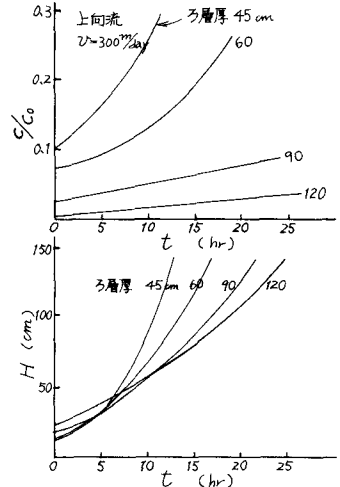


図-4 ろ層厚に関するシミュレーション