

京都大学工学部 工修 正会員 ○住 友 恒
同 工博 同 末石富太郎

1. は じ め に

水質など水源条件の変動は浄水施設に種々の負荷を与えるのが一般的である。需要の時間変動も大きくなってくれば配水池能力のみでこれに対処することもできなくなり、浄水施設に何らかの影響を及ぼすようになる。したがって近い将来、浄水施設にも動的な設計・管理が不可欠になってくるものと推察できる。筆者らは動的設計・管理の第一歩として浄・配水施設における微少な条件変動にいかに対処するか、いいかえれば施設の弾力的設計・管理の可能性について研究してきた。¹⁾²⁾

本文ではこれらの研究に連して特に沈殿池を取りあげ、流入条件に変動がある場合に処理能力の弾力性がどのようにして発揮されるかを検討してみる。沈殿池には一般に短絡流が存在することが多く、これは池内に平常十分活用されていない部分が存在することでもある。しかし、流入条件に変動がある場合には、この効果を発揮していない部分が逆に意外な緩衝効果を発揮することが考えられる。そこで以下、沈殿池における短絡流の取扱いを中心に、短絡流が存在する場合の沈殿除去能について、考察を加えてみる。

2. 短絡流動と水質挙動に関する理論的考察

沈殿池における除去能力の変動を池内流動と関連づけて考察した研究はすでに数多く、たとえば Dobbins³⁾ や合田⁴⁻⁵⁾ が注目すべき成果を得ている。

一方、池内水流には一般に大きな流速分布を伴うことが多く、図-1に示すように流速分布に仮想的な境界を考慮して区分することができれば、流速の大きい部分を広義の短絡流の存在とみなすことができる。さらに全般的にはこの短絡流と隣接流との相対的な関連を議論することによって、問題が簡略化しうる。沈殿池に短絡流の存在が認められるとき、観点をかえて、短絡流を中心に沈殿池水流を論ずることも可能になる。また任意の短絡流を取りあげてその水流特性に注目し、短絡流の隣接流との水量・水質交換を主要な特徴として指摘することもできる。末石はばつ気槽の場合について、このような取扱いが池内混合をうまく表現することを実験的に示している⁶⁾。このような流れを模式化すると、図-2に示すような横から流出入を伴う非定常流となる。

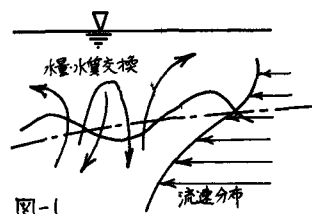


図-1

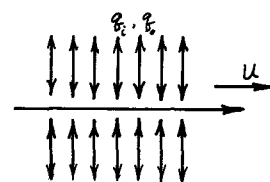


図-2

さて、短絡流を中心に沈殿池における水質伝播を考察する場合、水流については末石らの研究⁷⁾を、水質について前記合田らの研究を参考にすると、以下のように展開することができる。

図-3を参照し、摩擦、密度流、吹送流、不安定性など多くの要因にもとづくはずの短絡流の原因

力 (Driving Force) をひとまず単位長当り f と表わせば、短絡流に関する運動の式は次のようになる。

$$\frac{\partial}{\partial x}(\alpha u^2 A) + \frac{\partial}{\partial t}(UA) = f/\rho \quad \text{----- (1)}$$

ここで、 u は平均流速、 α は流速分布に対する運動量の補正係数、 A は短絡流断面積、 ρ は水の比重、 x は流下方向距離、 t は時間である。同様に、連続の式は次のように表わされる。

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(UA) = q_i - q_o \quad \text{----- (2)}$$

ここで、 Q は流量、 q_i は短絡流への単位長さより流入水量、 q_o は同流出水量である。さらに水質の連続の式は乱流拡散を無視した場合、次のように表わされる。

$$\frac{\partial}{\partial t}(cA) + \frac{\partial}{\partial x}(cAU) = v \frac{\partial}{\partial z}(cA) + (c_i q_i - c q_o) \quad \text{----- (3)}$$

ここで、 v は浮遊物沈降速度、 z は鉛直上向き距離、 c_i は短絡流への流入水質で、いいかえれば隣接流の水質である。以上3式が短絡部の流動および水質挙動に関する基礎式となり、隣接する流れについても同様の基礎式を得る。各式中の u 、 A 、 f 、 c 、 c_i 、 q_i 、 q_o 、 v などから、個々の相関を想定するなどして未知変数を式数に合致させてゆけば、 A 、 c 、 c_i など短絡流内外の諸現象を追跡できる。同様に、沈殿池内水流を任意に区分すればそれぞれの流れに上記と同様に3基礎式をえるので、この場合、結局これら全式を連立して解けばよい。本文では近似的に、式(1)で f を総括的に取り扱い、式(3)では拡散項を無視しているが、これらを厳密化しても同様の考察は可能である。

つぎに解法について簡単に述べておく。まず流動について式(1)および式(2)より次式をえる。

$$I_{\pm} ; \quad \frac{dx}{dt} = \left\{ \alpha \mp \sqrt{\alpha(\alpha-1)} \right\} u \quad \text{----- (4)}$$

$$II_{\pm} ; \quad -\left\{ (\alpha-1) \pm \sqrt{\alpha(\alpha-1)} \right\} u \frac{dA}{dt} + A \frac{du}{dt} = \pm u (q_i - q_o) \left\{ \sqrt{\alpha(\alpha-1)} \pm \alpha \right\} - f/\rho \quad \text{---- (5)}$$

近似的に、 $\alpha \cong 1.0$ とみなしうるとき、上式は次のように簡単になる。

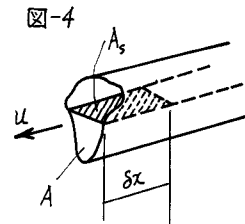
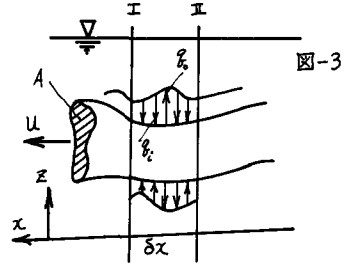
$$I_{\pm} ; \quad \frac{dx}{dt} = u \quad \text{----- (4)'}$$

$$II_{\pm} ; \quad A \frac{du}{dt} = u (q_i - q_o) - f/\rho \quad \text{----- (5)'}$$

水質については式(3)における右辺第1項を近似的に次のようにみなすことも可能である。

$$v \frac{\partial}{\partial z}(cA) \cong v (C - c_i) A_s \quad \text{----- (6)}$$

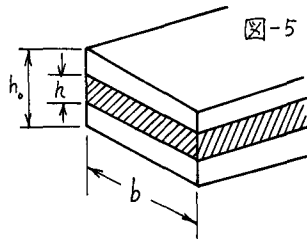
ただし、 A_s は図-4に示すような流れ方向単位長当り沈降面積である。このとき、式(2)および式(3)から次の関係をえる。



$$\frac{dc}{dt} \cong \frac{q_i}{A}(c_i - c) - \frac{1}{A} \{ v A_s (c - c_i) \} \text{ ----- (7)}$$

矩形沈殿池で図-5に示すような全幅にわたる短絡流が存在するとき、 q を速度表示すれば簡単に次の関係を与える。

$$\left. \begin{aligned} h \frac{du}{dt} &= u(q_i - q) - \frac{1}{b}(f/p) \\ \frac{dc}{dt} &= \frac{q_i}{h}(c_i - c) - \frac{v}{h}(c - c_i) \\ \frac{dc_i}{dt} &= \frac{q_i}{h_0 - h}(c - c_i) - \frac{v}{h_0 - h}(2c_i - c) \\ \frac{dx}{dt} &= u \end{aligned} \right\} \text{ ----- (8)}$$



ただし、 h_0 , b はそれぞれ矩形沈殿池の水深、巾、 h は短絡部の厚さである。なお、式(8)は短絡流外部の水流流動に関する式を含んでいない。

さて、最も簡単には短絡流と隣接流の水量水質交換を式(9)のように簡略化し、 f に関する項をひとまず(10)のように定数化することを考えてみる。

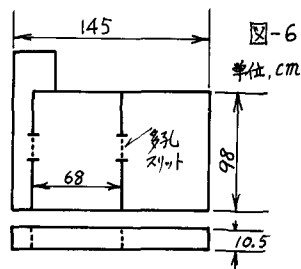
$$q = q_i = q_e = ku \quad , \quad [L/T] \quad \text{----- (9)}$$

$$p = -\frac{1}{b}(f/p) = \text{const.} \quad , \quad [L^2/T^2] \quad \text{----- (10)}$$

結局、水質の追跡法としては、式(9)、(10)などを用いて、式(8)の特性曲線表示に従って微小時間 Δt 間隔ごとに c 、 c_i の変化量 Δc 、 Δc_i を図から求める方法とか、図式化の代りにコンピュータなどにより数値計算にて追跡すればよい。なお、解析のために式(8)のように特性曲線表示を用いたのは、負荷条件変動などの特性変化に対応する応答あるいは除去の安定性などを論ずるのの一つの近似法として取扱いに簡便なことによる。

3. 沈殿池流動実験

以上の理論的考察ではいくつかの仮定条件を含むので、それぞれの妥当性が問われる。しかしここでは個々の仮定条件を取りあげずに、沈殿池流入出水質の理論と実際の適合度のみから総括的に以上の理論的考察を検証してみる。まず流動に伴う水流特性から想定モデルの妥当性を調べることができるので、図-6に示す模型槽にて、沈降速度 $v=0$ のときの実験を行なう。すなわち、流入スリット部に均等にNaCl溶液を注入し、流下スリットでの濃度伝播を電極によって実測し、自動記録計に結果を記録する。流下方向に直角な断面の槽断面積に対する短絡部断面積の比率を r と表わし、槽内にスリットの r と同一 r の短絡流が発



生しているものと想定する。 $r = 0.04, 0.17, 0.33$ および 0.58 にした場合の実測 NaCl 濃度を図-7から図-14に示す図中、式(8)に基く理論濃度曲線を p 値を -2.0 と想定し、 k 値をパラメータ表示した場合につき併記している。

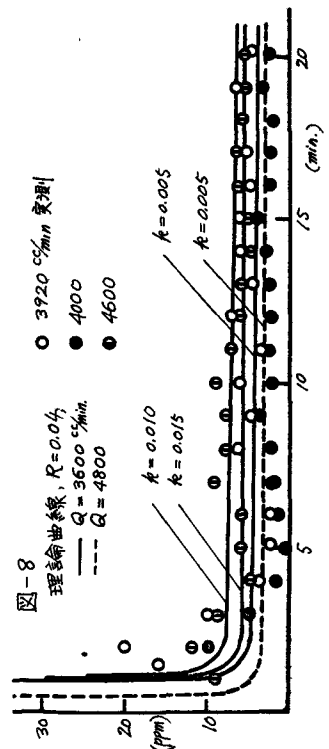
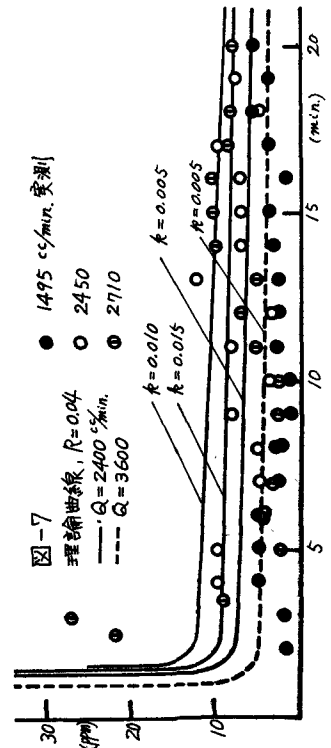
$r = 0.04$ の一連の場合の結果をみれば、水量負荷量が小さいときは短絡流モデルの成立を認めうるにもかかわらず、水量負荷量が大きくなるにつれて適用限界が出てくることが判る。実験で平均滞留時間が 10 分を下まわる水量負荷では流下 NaCl 濃度が時間的に分散する傾向が現われる。つまり、初期流達時に流出する実測濃度は理論値より小さく、池内にとどまる濃度の存在がわかる。初期流達時に池内にとどまっている濃度はその後徐々に流出して理論値より高濃度を示す。

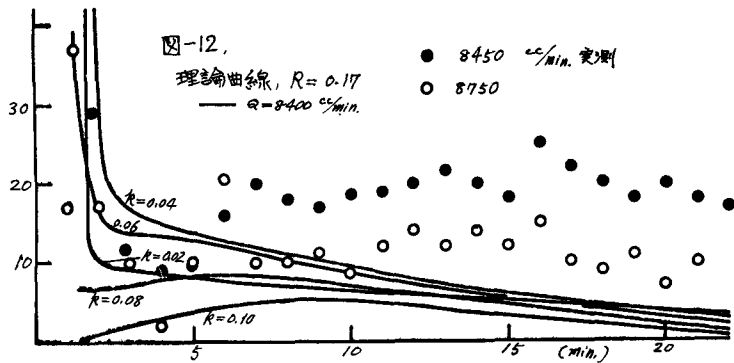
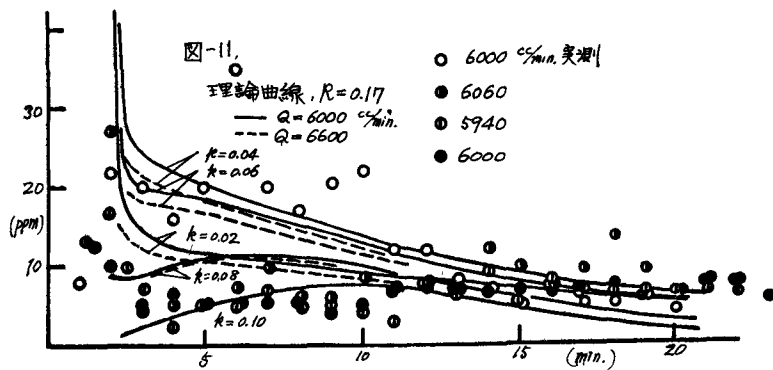
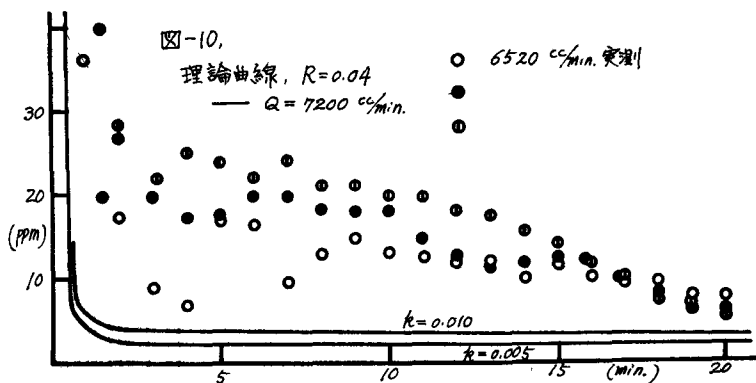
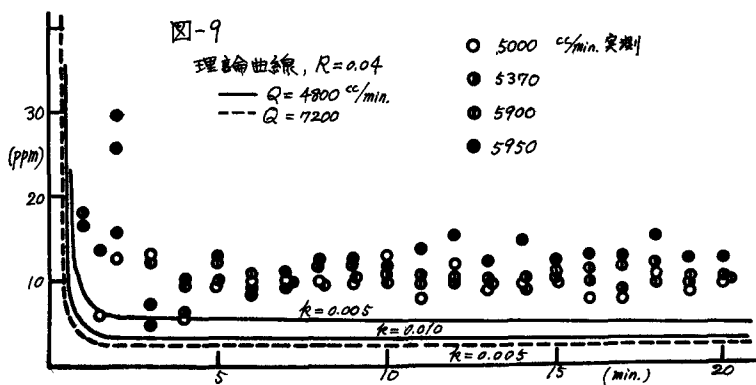
こうして本文の目的とする処理能の弾力性が池内流動自体からも期待できることを示唆する。なお適用限界を越える場合は、循環流モデル⁸⁾に移行するべきであろう。

$r = 0.17$ の場合についてもほぼ同様の結果をえている。そこで、 $r = 0.33$ および $r = 0.58$ の場合の実験としては平均滞留時間が 10 分を上まわる水量負荷の比較的小さい場合について実測を行なっている。結果は結論的にいって、循環流の発生は認められない代りにこれら短絡流断面が大きくなる場合は図-15に示すような複層短絡流が認められる。つまり、短絡流内流速を単に u_m と均一化しえない程の分布発生が認められる。これは理論流達時間よりも実測流達時間が早まる事実から明確に指摘できる。

以上、一応理想的な水流調節の可能な小規模実験槽に入為的な既知の短絡流を発生させ、その特性を実験的に検討したが、さらに検証を深めるために実験的検討を続行することにし、次は人為的でない短絡流を対象にする。図-16に示す京都大学衛生工学教室設置の浄水実験プラントは実験装置としての規模も大きく、理想流動と実際施設流動との中間的特性を持つ。沈殿槽では偏流あるいは短絡流の存在も十分予測できるので、本施設を用いて自然発生的短絡流につき実験を發展する。ただ、短絡流の発生を明確にするために流動追跡トレーサとして NaCl を用いる。 NaCl 溶液は比重が水よりやや重く、短絡流発生を助長する。

沈殿池流入側に NaCl を注入し、流入 NaCl 濃度を先の実験





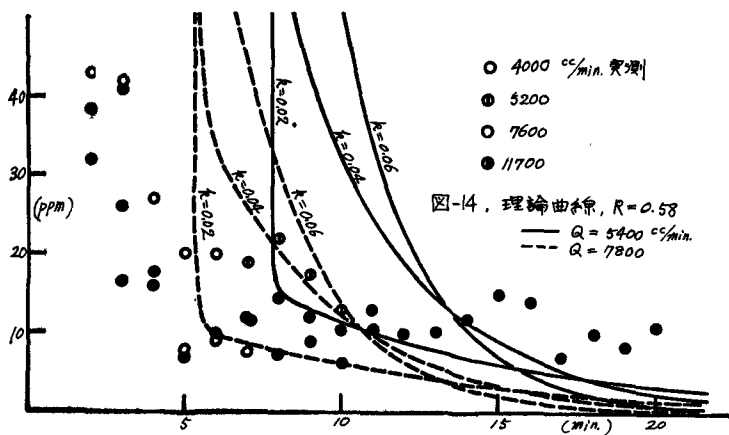


図-14, 理論曲線, $R=0.58$
 — $Q=5400$ cc/min.
 --- $Q=7800$

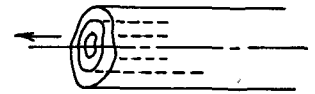


図-15, 複円短絡流

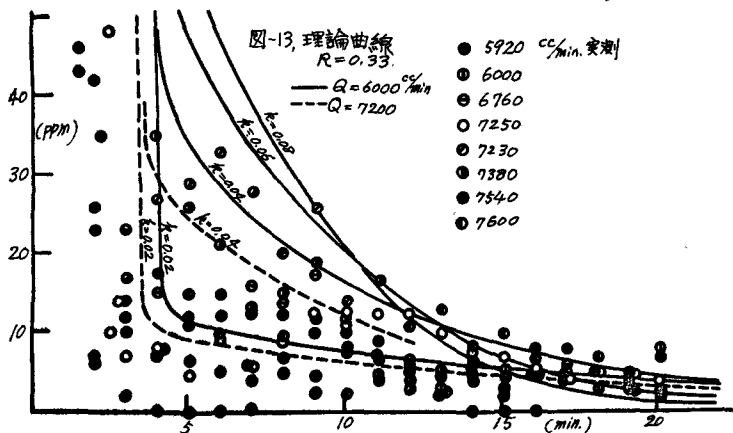


図-13, 理論曲線
 $R=0.33$
 — $Q=6000$ cc/min.
 --- $Q=7200$

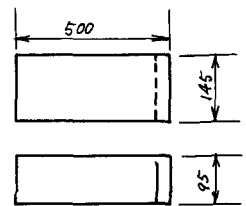
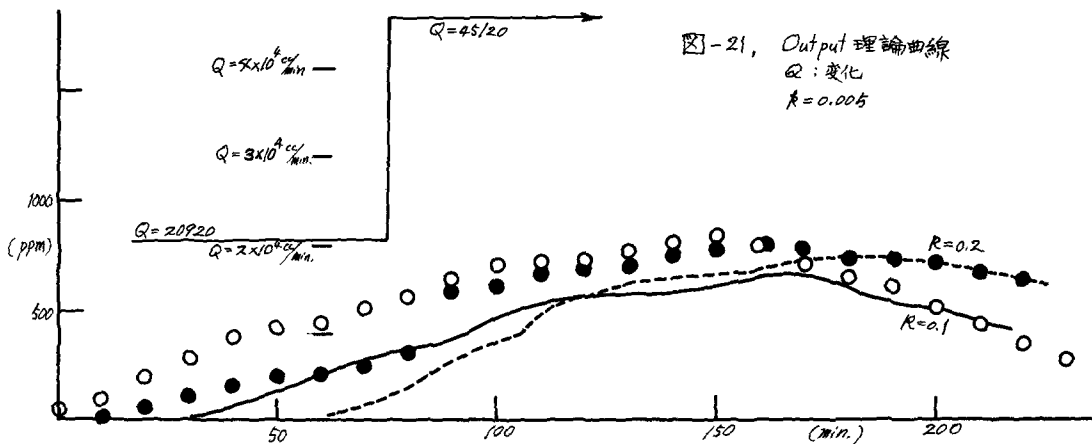
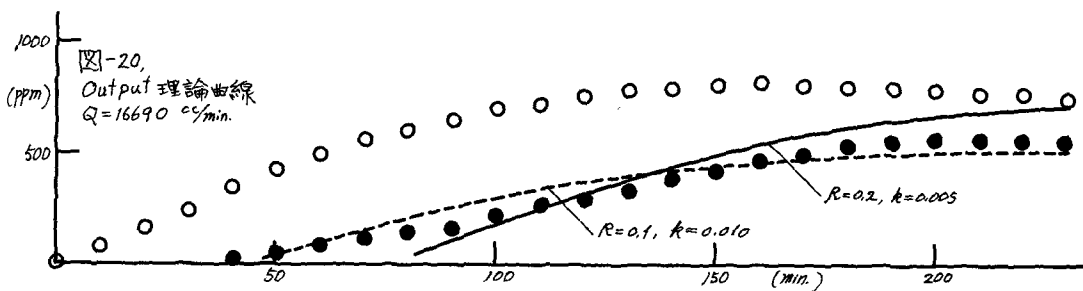
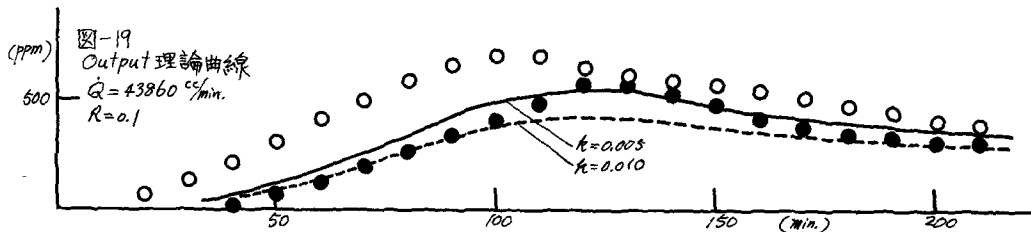
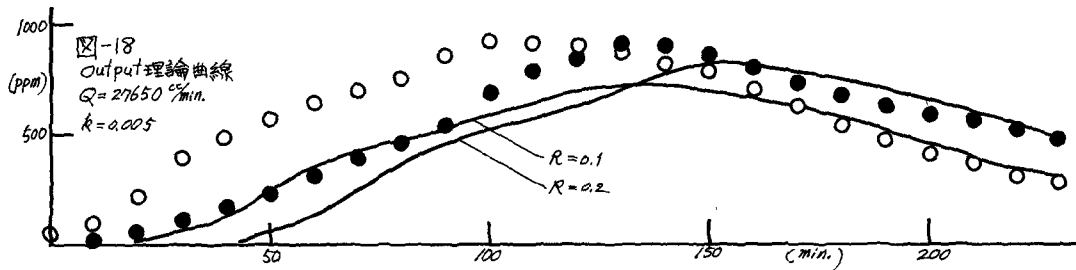
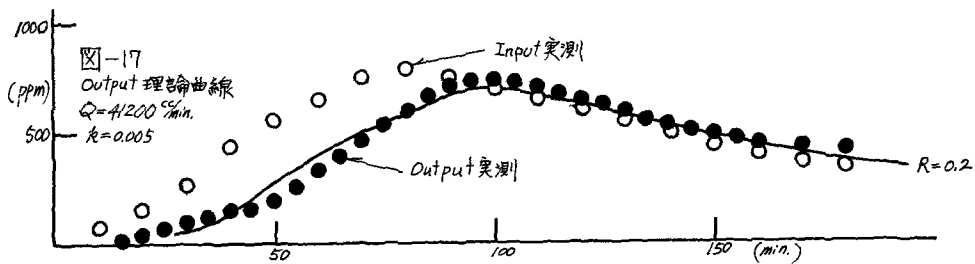


図-16 単位cm

と同様電極法で実測し、沈殿池流出液のNaCl濃度を同時に追跡する。実測結果の一例が図-17から図-20に示す。本実験では短絡流の相対的大きさ r が未知であるので、 r をパラメーターとした理論曲線を図中に併記した。理論値が実測値を忠実に追跡するにはいたらないが、短絡流モデルが本研究で取りあげている浄化能の弾力性を総括的に把握するのに十分効果的であることを確認できた。

さらに、沈殿能力の弾力性を論ずる場合は、水量負荷変動に伴う沈殿能力変動がきわめて重要な問題となる。当実験に一連して、水量負荷変動が発生した場合に沈殿池流動はいかに影響を受けるか実験を続行している。変動パターンが無数に考えられるので十分定量的結論を得るには至っていないが、結果の一例を図-21に示す。最も危険側である階段的流量変動について実験したもので、流量を瞬間的に2倍以上に増大させている。この結果から判断する限りでは、池内流動あるいは水質への影響はあまり大きくない。この理論的定量を行なうために、以上に示したと同じく式(8)を用いて流量変化時の境界条件を変えつつ追跡してみた結果を図中に併記しているが、流量変化直後は池内に乱れが発生するもようで、理論曲線と実測値に差が生ずる。流量変動の影響で、しばらくの間実測値は理論値より悪化し、その後水流が安定すれば再度理論式で追跡しうるのである。このとき、短絡流断面が流量増によって成長し大きくなっていることもわかり興味深い。この水量負荷変動に伴う池内流動への諸影響の定量については未だ推論の域を脱しえず、今後究明すべき問題として残す。

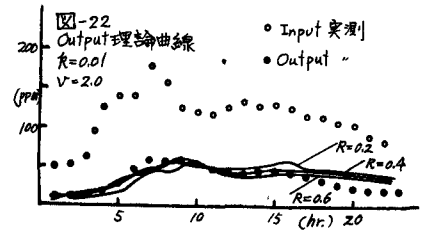


4. お わ り に

以上，沈殿池処理能の弾力性について検討し，短絡流を考慮する場合沈内流動条件のみによっても処理能が弾力化されることを示した。浮遊物が同伴する場合 ($v \neq 0$) の実験結果についても全く同様である。たとえば，大阪市浄水場での沈殿池流入濁度実測値⁹⁾を上述理論（フロック沈降速度 $v = 2.0 \text{ m/hr}$ と仮定）によって図-22に示すように十分追跡することができた。

以上に示した総括的な手法を活用すれば，今後大いに予測される沈殿池流入負荷変動に対しに弾力的な処理能を期待しうるかを定量できるとともに，負荷変動対策としての設計・管理条件も明らかにすることができよう。より精度の高い弾力的処理能の定量化あるいは上記設計・管理条件の確立については目下研究続行中である。

なお，本研究諸段階において合田健教授より種々有益な助言を得たことを附記し謝意表する。さらに本文に示したプラント実験実施に当っては，柴田善久，森田治良両氏の協力をえたので，ここに感謝の意を表わす。



参 考 文 献

- 1) 末石，住友；弾力性概念による需要水量と浄水場設計の分析について，土木学会，第5回衛生工学シンポジウム講演論文集，昭44.1
- 2) 末石，住友；需要増に対する弾力的給水管理について，土木学会，第24回年次学術講演会講演進，昭44
- 3) Dobbins；Effect of Turbulence on Sedimentation, Proc. ASCE, vol. 69, No. 2, 1943
- 4) 合田；開水路における浮遊流砂の分布について，土木学会誌，35-10，昭25.10
- 5) 合田；沈着物の浄化効率について，土木学会論文集，6，昭26.8
- 6) 末石；ばう気槽内の旋回流と混合特性に関する2，3の考察，土木学会第20回年次学術講演会講演集，昭40
- 7) 岩垣・末石；横から一様な流入あるいは開水路の不定流について，土木学会誌，39-11，昭29.11
- 8) 高松，内藤；Effects of Flow Conditions on the Efficiency of a Sedimentation Vessel, Jour. of International Association on Water Pollution Research, 1-12, 1967
- 9) 森尾；未発表