

砂ろ過処理能力の弾力性に関する基礎研究

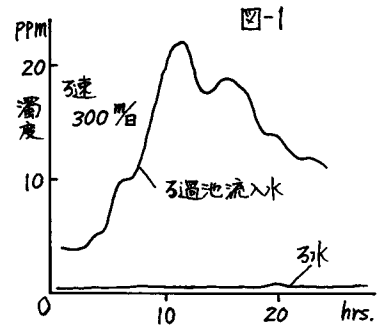
京都大学工学部 正会員 工博 末石昌太郎, 同 〇住友 恒

1. はじめに

各種水処理装置では設計基準あるいは管理基準として設定された諸条件がある程度変化しても所定の能力を弾力的に維持しうることが少なくない。流入水の水量・水質に変動がある場合にも処理水としての流出水に必ずしもそれに対応した変動応答があるとは限らない。この種の弾力的な能力は余裕能力として従来特にはえりみられることが少なかったけれども、筆者らは近年これらの微小変量の応答分析を重視して、そこから新たな諸特性を見い出しうることおよび対象システムの最適性に言及しうることを示してきた。¹⁾ 分析法としてはすでに微小変量分析あるいは限界量分析などを示し、設計・管理における弾力性の取扱い法についても示唆してある。^{2), 3)} ところで、これらとさらに具体化するためには個々の単位操作を対象に諸現象に立脚した応答分析が不可欠となる。⁴⁾ また一方、問題を処理施設に限らず、上水道システム全体の計画合理化を目的とする場合には、施設の弾力性分析に加え、水源能力および需要の弾力性⁵⁾をも同様に取扱ってゆくことにより多くの効果を期待しうる。以上の研究の一環として、本文では以下急速砂ろ過現象における弾力的な処理能力を分析対象とするが、周知のようにろ過の浄化機構に関する理論も未確立である上にろ過池は微小な水量変動に極度に不安定といわれている。したがって、ここでは砂層における水の流動に関する基本的な検討をまず重視する。ただ、流入水の質的な変動についてはすでに図-1に示す実際系水を対象とした実験例⁶⁾からみられるようにかなりの弾力的な処理能力を期待しうるようである。この質的な能力と量的な能力を結合し、今後段階を追って総合的なろ過処理能力の弾力性を定量化してゆくことを本文の究極の目的とする。

2. ろ過機構の考察と砂層 Channel のモデル化

従来砂ろ過に関する研究は数多いが、浄化機構などろ過現象そのものを本格的に基本原理から検討した例は比較的少ない。損失水頭を主要指標として現象説明を試みたものとして、(1)式のように Darcy 公式を考慮した Navier-Stokes 公式を運動の式とし、(2)式の水量連続の式との連立のもとに理論展開した合田⁷⁾の研究がある。一方、砂層内水質挙動に関する研究としては砂層内における濁質の減少を基本的には一次反応過程と同様にとらえこれを理論展開した岩崎⁸⁾の研究が知られている。後者は(3)式のように砂層深さ方向に一般型として表示される水質に関する連続の式の一つの近似表示といえる。



$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial z} = g\lambda - \frac{1}{\rho} \lambda \frac{\partial p}{\partial z} - \mu \frac{\lambda}{\tau} u \quad (1)$$

$$\frac{\partial \lambda}{\partial t} + \frac{\partial \lambda u}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial c\lambda}{\partial t} + \frac{\partial cu\lambda}{\partial z} = \phi \quad (3)$$

こゝでの各値は砂層深さ z 、時間 t における値を示し、 λ は空間的なものが平面的有効量に等しいと近似された空隙量⁷⁾、 u は空隙内 z 方向平均流速、 c は水質、 ϕ は空隙内浄化作用(増減量)を一括した総量、 g 、 ρ 、 ν 、 ϵ はそれぞれ水重力加速度、 λ にのみ有効に働く圧力、動粘性係数、透水係数。

一般に各式の理論展開としてはろ過機構に関する微視的考察から ϕ 値などをいかに具体化するかによって分かれるので、砂層内の微視的な諸現象の把握が不可欠となる。そこでカオリン系水による急速ろ過実験と行ない顕微鏡を用いて砂層内の濁質追跡を行ないてみた。⁹⁾ 砂層各部より滴々のサンプル液を白血球測定用メランジュールを用いて攪拌し、トーマ計算盤にてカオリン粒子数を実測した。本文の目的からその詳細については省略するが、結論として砂層 Channel 論¹⁰⁾を指摘した。1964年に至り Camp および Stain は砂層内粒子挙動も高速カメラで実測し、同様に Channel 成長を指摘¹¹⁾、図-2に示すような成長過程の概念図を示している。これらの一致から以下の考察を Channel 論によって進めることにするが、Channel 成長を砂層内ろ膜部における現象説明に限定するのと Camp が試みているように全砂層に拡大適用する2つの方向がある。後者の場合、ろ膜にとられず、微視的な砂粒子間の空隙流を Channel 流とみなし、精度を犠牲にしても空隙流としての諸特性を Channel 流に置換することに相当する。ここでは後者の立場になち、以下ろ過の浄化機構に考察を加えつつ、砂層内水流の取扱いに新たな一つの方法を提示したい。

ろ層内の Channel 流では流体中の懸濁物が Channel 壁に衝突合着、吸着などを伴うと同時に Channel 壁から付着物はく離を伴うのが特徴である。この特性を考慮してろ層内 Channel を表示する場合、図-3に示すように機能上被層流に分割することの効果的であろう。

図-3(b)のように Channel は中心部の単なる流水層と砂表面上の付着物層および衝突吸着はく離現象の卓越する境界層^{*}に分割することと考えられる。流体部のみを取り上げれば図-3(a)のように流水層と境界層を考へる。Camp が指摘するようにろ過における直接の浄化現象は壁面上に限定されるものと考え、上記境界層を流水層とは性格を異にし、浄化に直接関与する部分として特徴づけることも可能であろう。当然流水層と境界層の水量・水質交換を考慮する必要がある。

図-3(a)にも示されるように、Channel 内流水層の水理学的な特性は横から流入入を伴う水流¹²⁾として特徴づけることができるので興味深い。ただ、砂層内水流は微視的にみれば、Channel の分割・統合あるいは大きな径変化など一括して取り扱い難い多くの問題がある。しかし、本文の主な目的である弾力の処理能力の総括的な定量化のためには流動特性さえ実験的に検証できれば、一つの特性置換として精度上特に問題は残らないものと思える。

* (脚注) 未検討事項を残すので以下 Prandtl の定義する境界層とは一致しない。

図-2

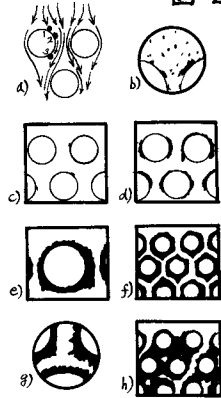
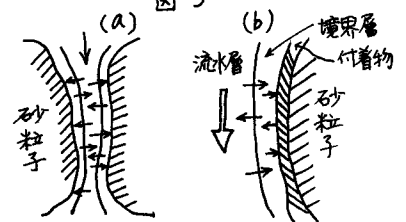
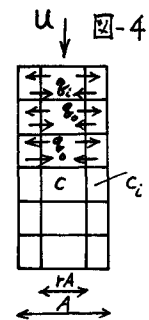


図-3



したがって、CampがChannel論を終局的には砂層全体の説明に拡大展開しているように、以上砂粒子間複層流の考え方を3層全体に拡大することも可能と考える。つぎに二の場合の(1)、(2)、(3)式の取り扱いを具体化するが、現時点の3層技術では流速が変化する場合には定水頭3層を採用し、コントローラによる自動3層調整が行なわれているのが一般的である。この技術を前提に砂層内水質を追跡する場合、(1)式の運動の式をここに特に取り上げなくても処理水量を初期条件として(2)、(3)式に設定してゆけば十分であろう。そこでこれから述べるChannel論を採用する場合の(2)、(3)式の具体化を以下に示しておく。図-3に示すChannel流動をモデル表示すれば、時間 t 、3層深さ方向 z 、によってそれぞれ異なるChannelのうち、同一 z とみなしうる部分については図-4のように表わしうる。Channelの断面積を A 、流水層の断面率を τ と表わせば流水層断面積は τA 、境界層断面積は $(1-\tau)A$ 、と表わされる。ろ過浄化の過程を図-4上で追跡すれば、まず濁水は上部より流水層を平均流速 u で流下してくる。流下濁水の一部 q_0 は境界層に入り残りは流下をつづける。境界層に流入した q_0 は壁面への衝突など浄化作用を受ける。 q_0 の移行と同時に境界層の一部水量 q_1 が流水層に出、流水層の流れとしては流出入を伴ないつづつ順次流下するものと考えられる。したがって流水層境界層それぞれに対しての水量および水質の連続条件が成り立つ。

合田理論によれば、3層層では空間的な空隙率と平面的な空隙率を近似的に等しくみなしうるところから、Channelの断面積 A を立体的な砂層空隙率 λ で表わし、上記 q_0 、 q_1 を考慮して流水層の水量・水質の連続の式を求めれば、(2)、(3)式よりそれぞれ次式をえる。



$$\frac{\partial \tau \lambda}{\partial t} + \frac{\partial \tau \lambda u}{\partial z} = q_0 - q_1 \quad (4)$$

$$\frac{\partial \tau \lambda C}{\partial t} + \frac{\partial \tau \lambda u C}{\partial z} = C_i q_0 - C q_1 \quad (5)$$

τA 一定とみなしうる範囲で上式より次式をえる。

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial z} = (C_i - C) q_0 / \tau \lambda \quad (6)$$

これより、 $\frac{dz}{dt} = u$, $\frac{dC}{dt} = (C_i - C) q_0 / \tau \lambda$ (7)

同様に境界層については浄化作用・はく離などの水質変化を考慮して次式をえる。

$$\frac{dC_i}{dt} = (C - C_i) q_0 / (1-\tau) \lambda - m C_i + \phi' \quad (8)$$

(8)式右辺第2項の $-m C_i$ は境界層における水質浄化を表わす項で、岩崎理論を拡大解釈して水質変化は一次反発的に C_i の値に比例するものとみなし、 m はその比例定数とする。それ以外のはく離などに由来する水質変化を ϕ' にて一括表示しているが、平常時を対象にする場合、 $\phi' = 0$ とみなし、あらゆる水質変化を m 値にて一括表示することも可能であろう。

さて、(7)、(8)式を用いて非定常な水質濃度を追跡する場合、(7)式の $\frac{dz}{dt} = u$ をもとに特性曲線群を作成し、刻々の初期条件、境界条件を用いて図解的に C 、 C_i 値を算定してもよいが、電子計算機に

て数値解析してもよい。⁴⁾

3. 砂層内水流実験と Channel 論の検証

これまで Channel の想定のもとに砂層内水流のモデル化を試みたが、それとも明らかのように Channel 流に断面率 Γ で表わされる広範の短絡流が存在すれば、それだけでも過飽にある程度の変動に対する緩衝能力を期待しうる。⁴⁾ 過飽処理能力に潜在する弾力性の定量化の第1歩としては、まず Channel 流動に短絡を想定する仮説自体を実験的にも検証しておく必要である。この仮説の検証に目的をしばり、流動の追跡を主目的とすれば、必ずしも閉塞進行を伴う従来一般に行われる過飽実験を行わなくても、まず過飽水流実験を行なうことにより特性を十分に把握しうる。

実験方法としては図-5に示す内径 2.8 cm に急速な過砂 (均等係数 1.67, 有効径 0.6 mm) を厚さ 55 cm 充填し、砂層内 Channel 流内に想定しうる短絡流を NaCl トレーサを用いて流入水質の応答を調べる。水質測定としては白金電極を用い連続自動記録する。通水方法は急速な過飽操作におけると同様、砂表面上を一定に保ちつつ水道水を流す。流速調整は下流端でピンコックを用いて行なう。種々の流速条件下での流入流出 NaCl 濃度の応答実験結果の一例を図-6から図-9に示す。流速によつて応答特性に明確な差が認められる。流速の大きい場合は流入水質パターンがそのまま一定時間後に流出する傾向が強い反面、流速が小さくなるにつれて過飽内に濃度滞留の影響が出現し、流入水質はならされ徐々に長

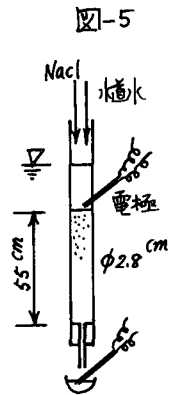


図-6

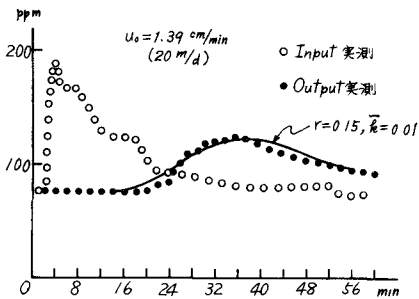


図-7

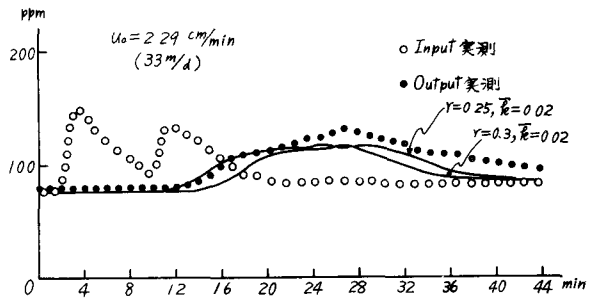


図-8

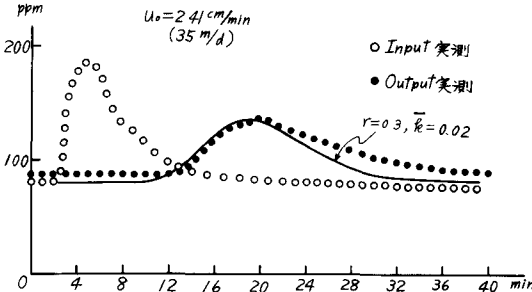
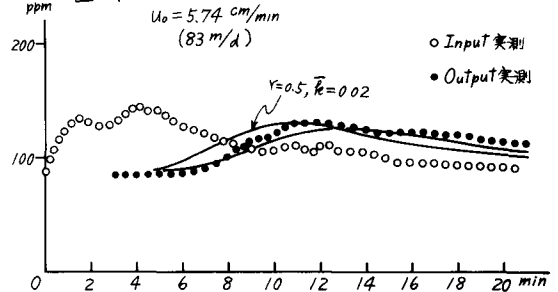
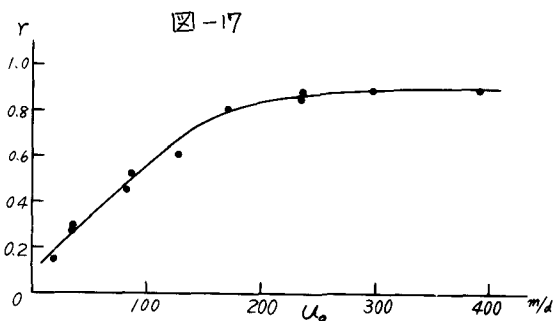
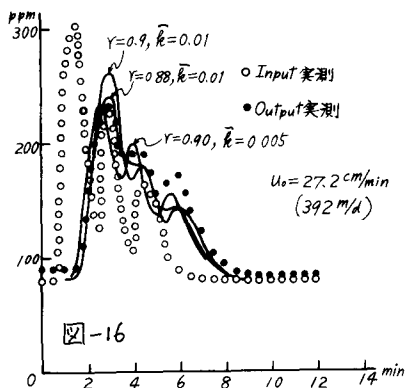
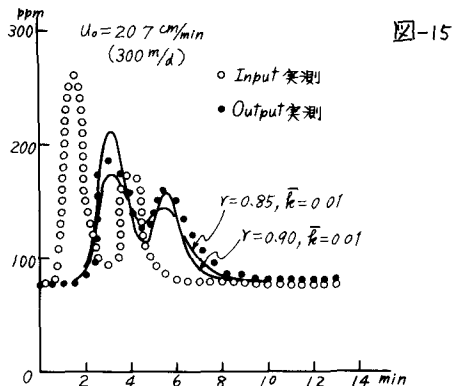
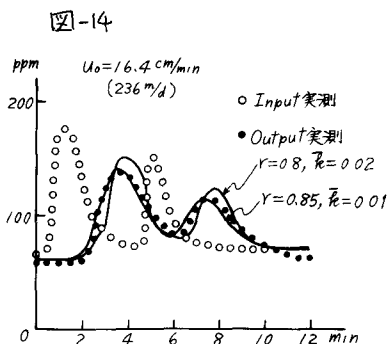
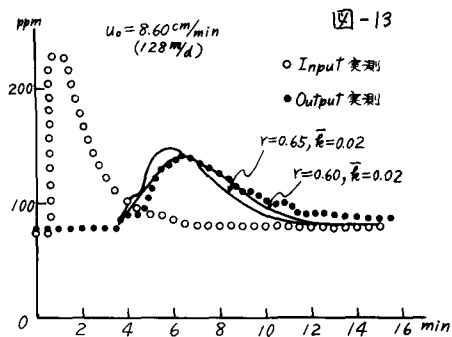
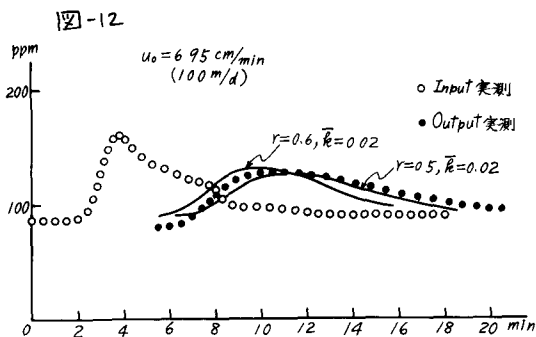
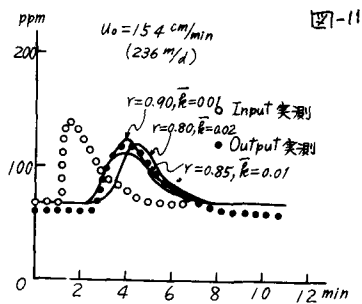
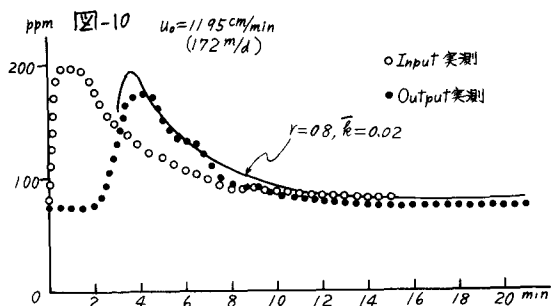


図-9

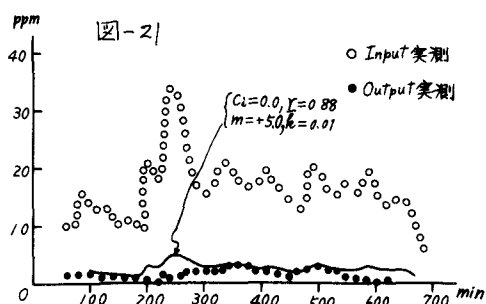
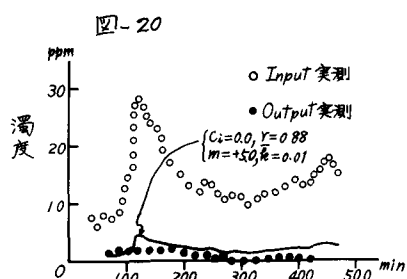
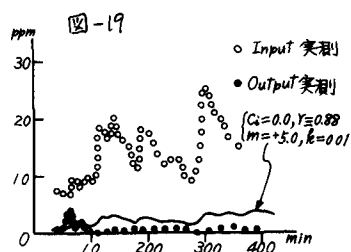
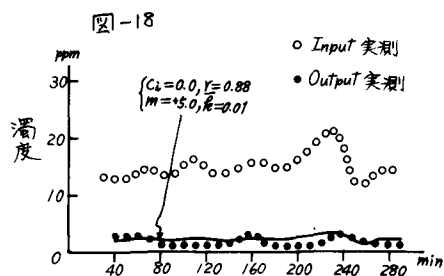




時間になつて流出する傾向が強まる。これらの流入流出水質応答を先に示した(7)、(8)式にて追跡した理論曲線を各図中に併記し、実測値との適合度から、 β_1 , β_2 の値を決定してゆく。この実験解析にあたって ϕ' , m 両値はともに0, λ については砂層各部の空隙率を各部粒径値より算定した値を初期条件として与えておく。各図中白丸印で表わすInput実測水質値も刻々境界条件として与える。 β_1 , β_2 としてはひとまず次式のように近似して、 τ と同様つぎの $\bar{t}$ 値をパラメータにして理論曲線と実測値の適合度から各当座値を探る。

$$\beta_0 = \beta_1 = \bar{t} \cdot U \quad (9)$$

以上の検討結果のまとめとして、Channel流内における流水層の断面率 τ の変化をる過速度(U 値から算定)を基準に表示したのが図-17である。図からわかるように3速がほぼ160 μ /日までは τ は3速に比例的に増大し、境界層は比例的に小さくなり、200 μ /日を超えると τ にあまり大きな変化がみられなくなることをわかる。Channel内の境界層が大きいほど水質低播の緩衝効果があるものと考えるときから、3速が大きくなるにつれて処理能力の弾力性はほぼ比例的に減少するものと推論しうる。200 μ /日を超えてさらに3速が増大する場合は弾力性にあまり顕著な変化はみられないようで、これより砂層内水流にほぼ固有の限界境界層を想定しうる。ここでの限界境界層とは砂粒子表面に流速が早くなくても密着する膜状の水の層を指し、ほぼ砂層空隙の10%を占めることがわかる。従来、急速砂3速における3速の設計値をほぼ180 μ /日以下にするのが一般的とされているが、これは一定の浄化率を期待するばかりでなく、さらに浄化能に弾力性を持たせる結果となっているようである。特に意図されたことではないようであるが、経験的に180 μ /日以下に保つ方が安全性は高いと判断されたものと思われる。この判断が一応科学的な根拠を有するものであることを明らかにすることができた。同時に、3速を180 μ /日以上に高める場合の新しい対策を以上の検討から徐々に明らかにしてゆけるものと期待できる。ただ、図-17の精度については未だ十分なものとはいえず、今後の問題を残す。たとえば理論曲線と実測曲線の各合致度および $\bar{t}$ 値の0.05から0.02におよぶ分散の問題で、特に後者についてはこれまでの検討が β と $\bar{t}$ の両値をパラメータとしているので、 $\bar{t}$ 値の分散の影響が当然の精度に及んでいるものと考えられる。しかし、以上の実験から、精度上若干の問題を残しながらも、砂層内水流パターンに関する種々の仮想事項が十分妥当なものであることを証明したものと考える。そこでつぎに、一般の過池におけると同様、原水が凝集処理され砂層に浄化能力が発揮される場合すなわち(8)式にて m 値が0でない場合についても同様の検討を加えてみる。筆者らの研究室における室内3速実験では一例として図-18から図-21に示すような水質応答の実測値をえている。^{(13),(14)}河床泥を水道水で希釈した濁水をバンド処理した上で沈殿処理し、その流出水を過原水としている。3速筒は直径40cm、3材は先の実験におけると同値で厚さ66cmとし、砂上水深50cmを維持しつつ平均321 μ /日の速度で減衰3速したものである。理論値追跡法は流動実験の場合とやや異なり、(8)式中の m 値を新たにパラメータ化するとともに、境界層から流水層に戻る β_2 の水質値を常に0と近似した。これは実測値の理論追跡を行なったところ結果的にえられる近似で、境界層での浄化力が大きくその浄化後水は非常に清潔にされているものとみられていることを指す。理論曲線を結果のみ各図中に併記しておく。また、ここでの $\bar{t}$ 値は先の結果からひとまず0.01に設定してある。

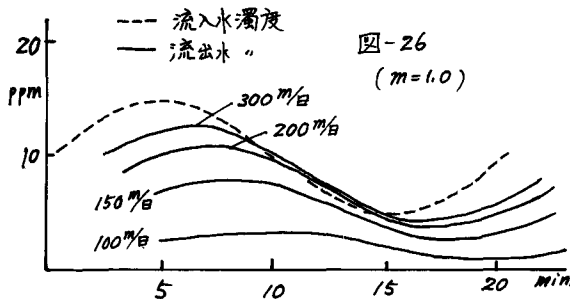
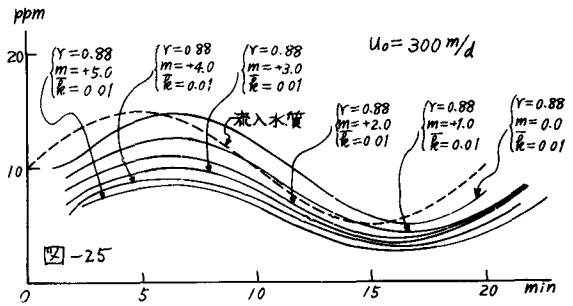
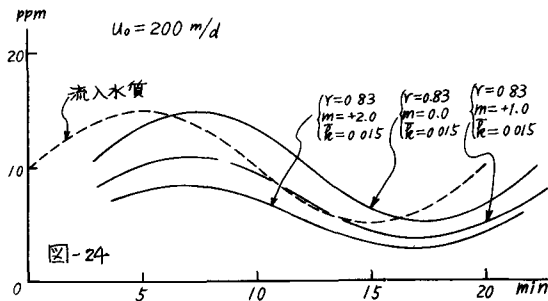
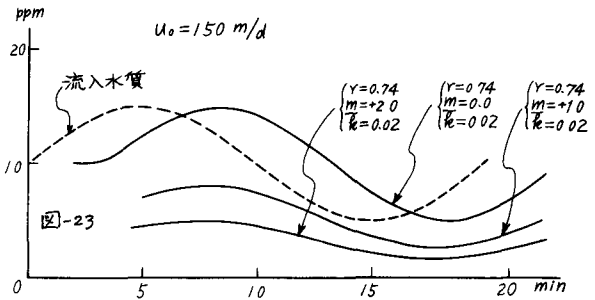
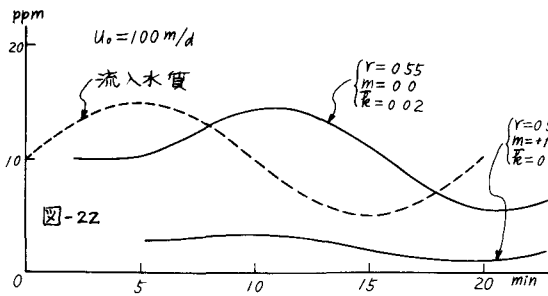


さて、理論値の適用結果も総括的に展望すれば、先の流動分析の場合に比べ合致度に低下がみられる。その最大の原因はフロク自体の不安定性および砂層内でのフロク除去(濁質除去)現象の不確実性によるものといえよう。また、図18から図21では層流下(通過)時間が相対的にきつめ、短時間であることに留意しなくてはならない。各図にみられる流入水質変動は比較的長時間にわたるにもかかわらず、その水質の処理は数分単位で刻々流出しているはずで、先の流動分析で指摘した砂層内貯留の効果がこれらの長時間変動においても有意な影響を及ぼしているとは限らない。むしろここでは長時間にわたる砂層の濁質浄化性能をなら濁質の滞留・はく離などが長時間にわたる流入水の変動にいかに対応するかより重要な問題となる。いふことは、長時間にわたる通過処理能力の弾力性はChannelモデルにおける境界層の容量に依存するというよりはむしろ境界層内での浄化性能の対流能力に依存するといえる。(8)式上へいえば、短期的な通過能力の弾力性は r 値に大きく依存するが、長期的な弾力性はむしろ m 値や ϕ' 値に左右されるものといえる。しるに、以上の実験のみから m 値の流入条件変動に対する詳細な挙動を論ずることはできないので、これらの厳密な分析は今後の課題として残さざるを得ない。

以上の実験結果をまとめておくと、1) Channel論の仮説も一応検証した。2) Channel内の流水層と境界層の構成は流速によってかわることを定量的にも明らかにした。3) これらの結果から流速が小さい程、諸変動に対し過池が安定で、短期的には弾力的な処理能力を期待しうることとを指摘した。さらに、4) 長期的な弾力性については砂層内流動条件よりも浄化性能の分析が必要であることを明らかにし、今後の研究方向を明らかにした。

4. 3過処理能力の短期弾力性について

3過継続時間に対処するような長時間にわたる3過処理能力の弾力性を定量化するためには浄化残能に関する今後の研究をさらに必要とするが、砂層流過時間に対処するような短時間にわたる3過処理能力の弾力性は以上の実験結果からある程度定量化できる。図-17に得られた結果をもとに、3過池への流入水質が変動する場合の処理水への応答を(7)、(8)式を用いて算定した一例を図-22から図-25に示す。図-26にまとめるように、一例として半時間にわたる流入水質の変動^(に付随する)はそのときの流速によってかなり変化することがわかる。言い換えれば、弾力的な処理能力はそのときの通水量に依存する。図は m 値がすべてに共通して1.0のときの数値例にすぎず、あらゆる場合の処理能力の弾力性を普遍的に定量化するには至らないが、短期的な弾力性については同様の検討を積み重ねてゆくことによって定量化が可能になったものと考ええる。これらの弾力性値の実際面への活用は浄水場の設計、管理面にあたり数少ないが、たとえば図-26 だけからでも流入水質の変動を事前に予知した場合いかに3過速度をコントロールしてゆけばよいかわかりうる。



5. おわりに

以上、3過機構の考察から Channel 論を採択し、さらに砂層内 Channel 流動には流速分布があり、ミクロに短絡流が存在することも実証した。Channel 流中、流速の小さい（あるいは静止している）短絡外部流はほとんど砂表面（あるいは抑留フロック表面）に膜状に密着する層とも考えられ、これを量的にも究明することができた。したがって沈殿能力におよぼす短絡構造流の緩衝効果⁴⁾と同様、3過の処理能力にもいくらか弾力性を期待しうることを明らかにした。しかし、今日一般の3過速度および砂層厚さを考えるとき、上記の層内の短絡外部流（境界層）が容量的にかなり小さいと3からその緩衝効果に大きな限界を伴うことが明らかにあった。したがって層内流動に伴う3過能力の弾力性は、従来の3過方式を採用する限りかなり短期的流入条件変動に対する場合に限り有意な効果を期待しうることを指摘した。この効果をさらに拡大するためには3過速度低下させるほか、砂層厚を増大するなどいふれにしろ砂表面に密着する水膜量の相対的拡大に努めなければならぬことはいうまでもない。長期的流入条件変動に対し弾力的3過処理能力を期待する場合は、流動に伴う弾力性をあまり期待しえないので、それだけ濁質除去現象にその原因を求めなければならぬ。つまり、除去・抑留・はく離現象に弾力性を求めなければならぬ。この現象解明については今後の課題として残すことにしたので、本文の成果としては3過能力の短期的弾力性を砂層内流動面から言及しえた点にあるといえる。

最後に、本研究に当りる3過理論について合田健教授より多くの助言をえたことおよび疑案3過実験については森屋宗俊、坂本弘道両氏に負う莫大の大きいことを記し、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。
- 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42回学術講演会講演概要集、昭44。
- 3) 末石、住友、弾力的処理能力を考慮した施設設計について、同上、昭45。
- 4) 末石、住友、短絡流による沈殿処理能力の弾力性について、土木学会、第6回衛生工学シンポジウム講演論文集、昭45。
- 5) 住友、都市における上水需要量の変動特性について、土木学会論文集、158号、昭43。
- 6) 森屋、未発表（大阪市水道局）
- 7) 合田、砂3過水理に関する基礎的研究、土木学会誌、37-1、昭27。
- 8) 岩崎、3過阻止率の計算、土木学会誌、8、9、昭13。
- 9) 住友、急速砂3過に関する基礎的研究、京都大学学術論文、昭37。
- 10) Baylis、Experience in Filtration, JAWWA, Vol.29, 1937。
- 11) Camp、Theory of Water Filtration, J. of Sanitary Eng. Div., ASCE, 84, Aug. 1964。
- 12) 森屋、浄水場の水質管理に関する基礎的研究、京都大学修士論文、昭40。
- 13) 坂本、浄水操作と処理水質応答に関する実験的研究、京都大学学術論文、昭40。
- 14) 岩恒、末石、横かき一様な流入のある開水路の不定流について、土木学会誌、昭29、39、11。