

1. はじめに

降雨の流出予測については、古くから多くのすぐれた研究がある。特に、流出初期の洪水流出については、防災上の必要から多角的に研究されてきた。ところで、それらの多くは地層内水流について、大胆な仮定を採用することが多く、その流出機構を簡単なモデルで記述することが多い。現象の複雑さと、予測流出量が正確に定量化できれば良いという研究目的から考えて、簡単なモデルで十分な場合も多い。しかし、いずれにしろ、現象を支配する基礎式の数と解明せんとする未知数の数が一致するよう、モデルの構成と、観測項目が決定されている。さて、筆者らは過去数年にわたり、流出水の水質を計測して流出予測の精度をさらに一段高揚することを試みてきたが¹⁾、端的にいえば、観測項目を増やし、解明しうる未知数をさらに増大し、流出機構を少しでも明らかにしようという意図によるものである。ただ、現実には、観測項目を増やし、これを支配する基礎式を増やしたときに、新たな未知量が発生し、従来の未知数をいぜん解きえず、問題を複雑にするだけという結果に終ることも少なくない。本文では、研究意図を再整理するとともに、これまでに明らかになった問題点、さらには今後の展望を最近のデータをも加味してまとめておく。

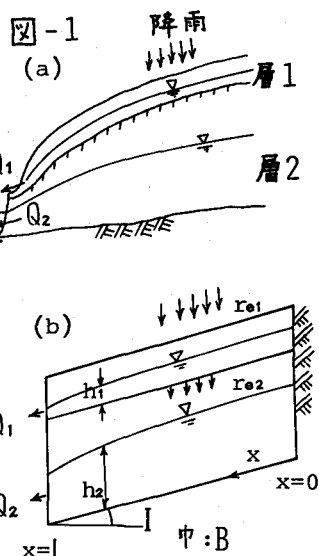
2. 現象のモデル化と研究目的

流出現象を決定論的に記述する場合、図-1(b)のようなモデル表示を試みることが多い²⁾。地表流を一部含むいわゆる活性層内の流れ（以下サフィックス1で表わす）と不被圧地下水流（以下サフィックス2で表わす）で区分する。ここでの流動に関する基礎式は簡単にはつぎのように表わされる。

$$\left. \begin{aligned} u_1 &= k_1 \left(I - \frac{\partial h_1}{\partial x} \right), \quad u_2 = k_2 \left(I - \frac{\partial h_2}{\partial x} \right) \\ \lambda_1 \frac{\partial h_1}{\partial t} + \frac{\partial u_1 h_1}{\partial x} &= r_{e1} - r_{e2} \\ \lambda_2 \frac{\partial h_2}{\partial t} + \frac{\partial u_2 h_2}{\partial x} &= r_{e2} \\ Q_0 &= Q_1 + Q_2 = B(u_1 h_1 + u_2 h_2) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ここで、 λ は空隙率、 k は透水係数、 Q は流量、サフィックス0は河川水を目指す。上記5式により、解明せんとする未知変量は $h_1, h_2, u_1, u_2, r_{e2}$

で、 $k_{1,2}, \lambda_{1,2}$ を設定しうる場合、原則として、問題を解きうることはいうまでもない。しかし、これらの設定は必ずしも容易でない。そこで計測可能な水質指標を考慮して、上記設定値の1つでも多くを未知変量化して、現象をより忠実に解こうとするのが本研究の基本的な目的である。そこで、各層から独自に流出する水質指標について考えてみる。たとえば、濁質は空隙の大きい層1のみから流出し、層2からは流出しないことなどを考慮し、それぞれを c_1, c_2 と表わす。したがって、水質流について次式をえる。



$$\lambda_1 \frac{\partial h_1 c_1}{\partial t} + \frac{\partial u_1 h_1 c_1}{\partial x} = \phi_1, \quad \lambda_2 \frac{\partial h_2 c_2}{\partial t} + \frac{\partial u_2 h_2 c_2}{\partial x} = \phi_2 \quad (2)$$

ϕ_1, ϕ_2 はそれぞれ c_1, c_2 の発生量。また、 c_1, c_2 は各層独自の水質と考えているので、 r_{e1}, r_{e2} に伴う水質移動量をここでは無視している。また、河川水として次式がある。

$$Q_0 \cdot c_{10} = Q_1 \cdot c_1, \quad Q_0 \cdot c_{20} = Q_2 \cdot c_2 \quad (3)$$

すなわち、 Q_0, c_{10}, c_{20} はそれぞれ観測可能なので、 c_1, c_2 は既知量となる。したがって ϕ_1, ϕ_2 が既知のとき、式(2)、(3)を式(1)に追加すれば、さらに λ_1, λ_2 あるいは k_1, k_2 が解きうることになる。上記以外のモデルであっても、水質の計測によって、従来設定値あるいは仮定値として扱われてきた数値を未知変量として解き、流出機構をそれだけ明解にしようというのが、本研究の一貫した基本的な考え方である。なお、流出機構を図-1に示すより多層に取り扱っても、全く同様に考えうる。

3. 明らかになった問題点

上記考え方に従って、方法論を具体化する際に生ずる種々の問題点として主なものは、つぎの2点であることが、これまでの研究・調査で明らかになっている。1つは、人為汚濁の影響をあまり受けない水質指標として、 c_1, c_2 にいかなる水質項目をとればよいか、他はいかにして ϕ_1, ϕ_2 を既知量化しうるかである。前者は、適切な水質項目が見い出せない場合でも、水質監視地点を比較的上流に設置することもできるので、本質的な障害にはなりえないにしても、後者の ϕ_1, ϕ_2 の定量化は必ずしも容易でない。上層1に関し、濁質を取り上げる場合は Wash load の研究などである程度定量化されつつあるが、下層の c_2 として取り上げる水質によっては、地球化学的な検討も不可欠となる³⁾。また、流域ごとに大巾にその値が変化することも考えられる。このように考えれば、むしろ式(1)の $\lambda_{1,2}$ や $k_{1,2}$ などの特性値の別途計測の方が容易であるという結論にもなりかねない。したがって、本研究を進める上での重要なポイントは、この ϕ の精度をどのように考えるかにあり、地球化学的に厳密であればあるほど研究目的自体が否定されることになる。一方、複雑な地層に導入される一定の k や λ という値の特性、いいかえれば、総括的なみかけの値として、この ϕ を取り上げる場合に限りさらに検討の余地があるものと考えている。いうまでもなく、このみかけの ϕ が定性的にでも地球化学的な現象論で説明しうるものであればなお好都合である。したがって、以下に取り上げる ϕ は上記のような考え方に立脚するものである。かつ、現段階ではこの ϕ の定量化を最大の課題としている。

4. 総括的な ϕ の定量について

4・1. 定量法の一考察

総括的な値を念頭に置く場合、式(1)、(2)を x 方向に平均化して次式で検討することもできる。

$$\lambda_1 BL \frac{d\bar{h}_1}{dt} = -Q_1 + BL(r_{e1} - r_{e2}), \quad \lambda_2 BL \frac{d\bar{h}_2}{dt} = -Q_2 + BL(r_{e2}) \quad (1')$$

$$\lambda_1 BL \frac{d\bar{h}_1 \cdot \bar{c}_1}{dt} = -Q_1 \cdot \bar{c}_1 + \bar{\phi}_1, \quad \lambda_2 BL \frac{d\bar{h}_2 \cdot \bar{c}_2}{dt} = -Q_2 \cdot \bar{c}_2 + \bar{\phi}_2 \quad (2')$$

ここで、各上つきバーの記号は流下方向の平均値を指す。(Dupuit-Forchheimer の仮定の成立する場合などに有効)。近似的に $BL(r_{e1} - r_{e2}) \cong \beta_1 Q_1$, $BL r_{e2} = \beta_2 Q_2$ と考え、 u_1, u_2 が一定値とみなしうる期間については次式をうる。

$$\left. \begin{aligned} h_i &= h_{i0} \cdot e^{-s_i t}, \quad s_i = \frac{-(1-\beta_i)u_i}{\lambda_i \cdot L} = \text{定数}, \quad i=1, 2 \\ Q_i &= B u_i h_{i0} \cdot e^{-s_i t}, \quad h_{i0} \text{ は } h_i \text{ の初期値} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

一方、式(2)' は $c_i = Q_0 Q_{i0} / Q_i$ と式(4)の関係を用いて次式のようなになる。

$$\bar{\phi}_i = (Q_0 \cdot c_{i0}) + \frac{\lambda_i L}{u_i} \left\{ s_i (Q_0 c_{i0}) + \frac{d}{dt} (Q_0 c_{i0}) \right\} - \frac{\lambda_i L s_i}{u_i} (Q_0 c_{i0}) \quad (5)$$

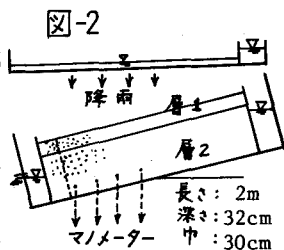
上式は総括的な $\bar{\phi}_i$ が下流端における河川水質の負荷量 ($Q_0 c_{i0}$) から定量化できることを示している。なお、上式の右辺第2項は dc_i/dt 項に係る項で、地中で c_i が飽和値に達するときなど、この項は消去できるので、 $\bar{\phi}_i$ は次式から定量化することができる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{dc_i}{dt} \cong 0 \text{ のとき, } \bar{\phi}_i &= \left(1 - \frac{\lambda_i L s_i}{u_i}\right) \cdot (Q_0 \cdot c_{i0}) \\ \frac{dc_i}{dt} \neq 0 \text{ のとき, } \bar{\phi}_i &= (Q_0 \cdot c_{i0}) + \frac{\lambda_i L}{u_i} \cdot \frac{d}{dt} (Q_0 c_{i0}) \end{aligned} \right\} \quad (5)'$$

なお、 s_i は Q_i を片対数表示 (横軸, 時間 t) するときの直線勾配値として求める。

4・2, 室内実験による $\bar{\phi}_2$ の定量例

図-2に示すような長さ2m, 深さ32cm, 巾30cmの水路状の地下水模型に, 砂を充填し, その下流端24cmの部分の砂を取り出し, 炭酸カルシウムと混合した上で再充填する。しかる後, 上部より模型降雨を降らせ, 模型内の流動状況と流出炭酸カルシウム量の定量化を試みた。水位はマンメータにて測定し, カルシウム濃度は原子吸光で計測した。実験条件の詳細は省略するが, 定性的に, たとえば図-3に示すような流出結果を得る。流量の増大に対し, 水質値は若干低減するが, 図-4に示すように水質の低減特性はほぼ流量に支配されていることがわかる。いいかえれば, 流量の増大によって水質は希釈されるのではなく, 一定の濃度を維持するよう流出することが特徴である (炭酸塩イオンの平衡理論から考えても一応合理的と考えられる)。したがって, $\bar{\phi}$ は式(5)'の上式で定量化されることがわかる。これによって定量化した結果の一例を図-5に示す。参考のために, 式(5)'の下式で定量化した図-6を示しておくが, きわめてばらつきが多くなり, 実験室規模での炭酸カルシウムの流出特性は, 流量の増減あるいは水位の増減に支配されていることがわかる。



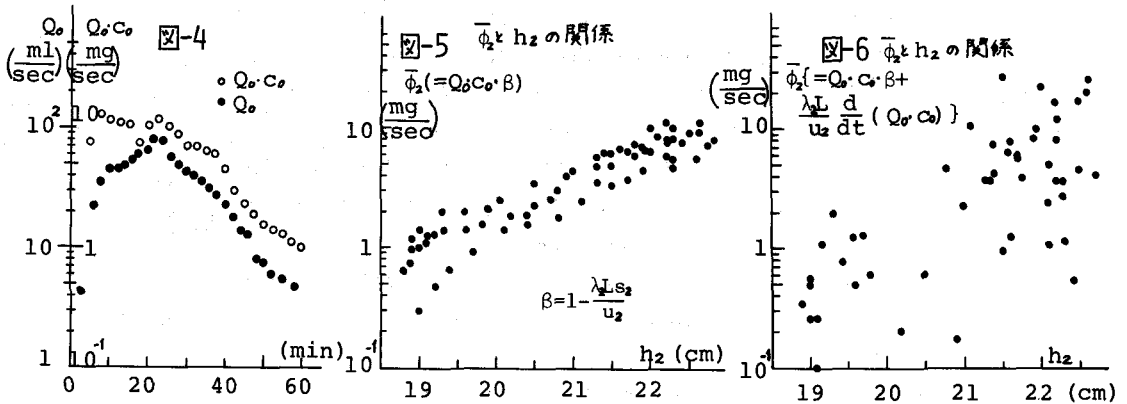
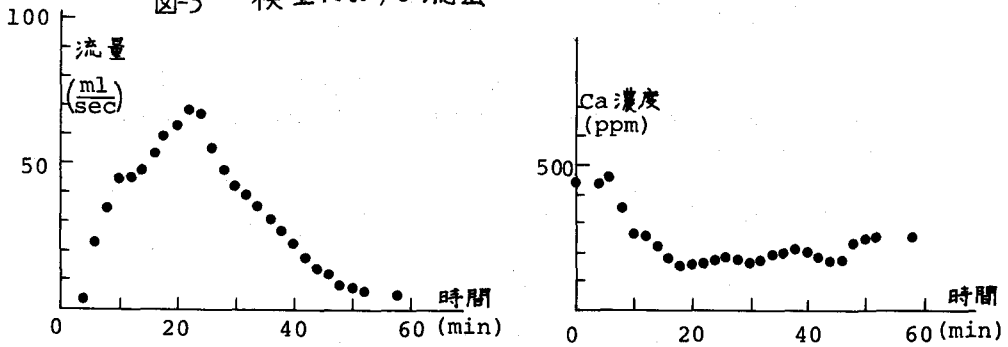
4・3, 山地実測による $\bar{\phi}$ の定量例

室内実験の結果にみられる定性的な結果が実際の山間部の地下水流にも同様に認められれば, $\bar{\phi}_2$ の定量化は比較的容易となる。地層内での複雑な化学条件の中で, いかなる機構によって水質物質が流出するかは別にしても, 流出期間中に, 流量の増減にかかわらずほぼ一定の水質濃度を維持するように水質物質が流出するならば, $\bar{\phi}_2$ の定量化は容易である。そこで, 昭和47年以来, 昭和50年に至る間に実測してきた木津川支流の和東川流域における流出データを同様の観点から分析してみた。図-7から図-10が結果の一例である。室内実験の結果と対比して, カルシウムイオンの場合, 同様に式(5)'の上式よりも下式の方が一定の傾向を示しうる。いいかえれば, カルシウムイオンの場合, 実際の流域でも水質はほぼ一定に保たれ, $\bar{\phi}_2$ は $Q_0 C_{02}$ で定量化する方が望ましいようである。一方, 図-9, 図-10からもわかるようにマグネシウムイオンの場合, カルシウムイオンよりは明確な傾向を認めうる。このように, 水質指標自体についても今後さらに検討を要することがわかる。

5, $\bar{\phi}$ の活用例

図-5や図-8に示すような, $\bar{\phi}_i$ と水深 h_i との対応について定量化が進めば, その結果を活用することによって, 下流の Q_0, c_{i0} から容易に h_i を推定しうるようになる。たとえば, 下流河川での流量と濁度, マグネシウムあるいはカルシウムイオンの濃度を計測することによって, 地層1, 2それぞれにおける流量を予測するなどである。またさらに $\bar{\phi}_i$ の定量化が進めば, 流下方向の平均値としての $\bar{\phi}_i$ や $\bar{h}_i$ としてではなく, $x=x, t=t$ における h_i に対応する式(2)の ϕ_i の定量化も可能となろう。この場合, つぎのような活用法も考えられる。式(1), (2)より, $r_{e1}=r_{e2}$ あるいは $r_{e2}=0$ のときなど。次式をえる。

図-3 模型における流出



$$\frac{dx}{dt} = \frac{u_i}{\lambda_i}, \quad \text{にて}, \quad Q_i(t) \cdot c_i(t) = \int_0^{T_L} Q_i(t) \cdot \phi(t - T_L + \xi) d\xi$$

ただし、 T_L = 上流端から c_i 計測点までの流下時間

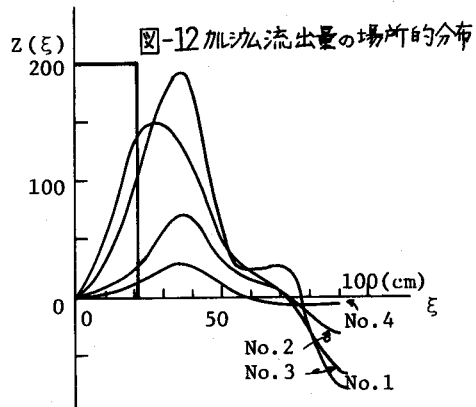
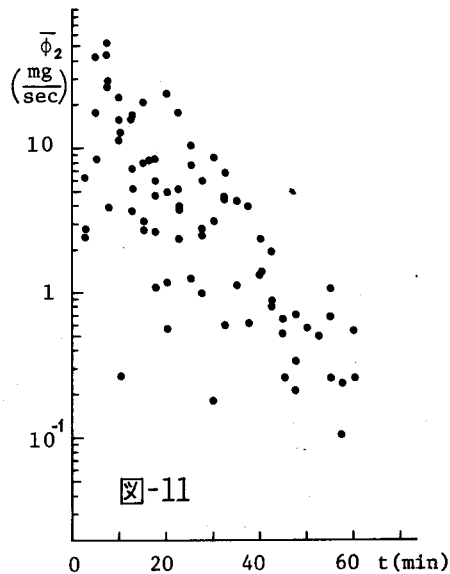
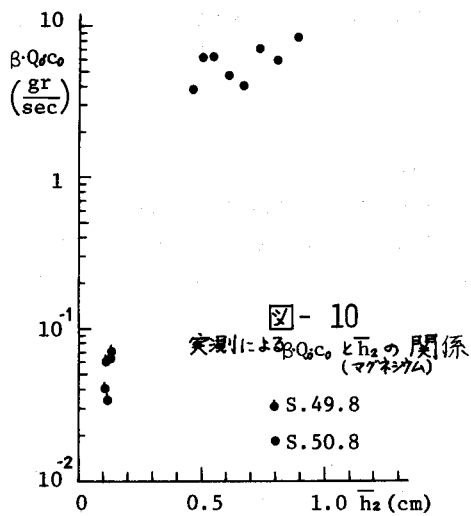
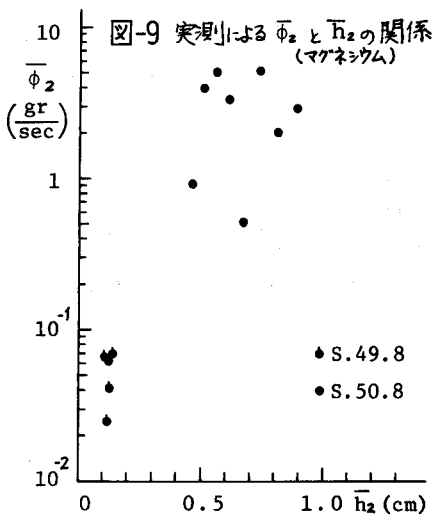
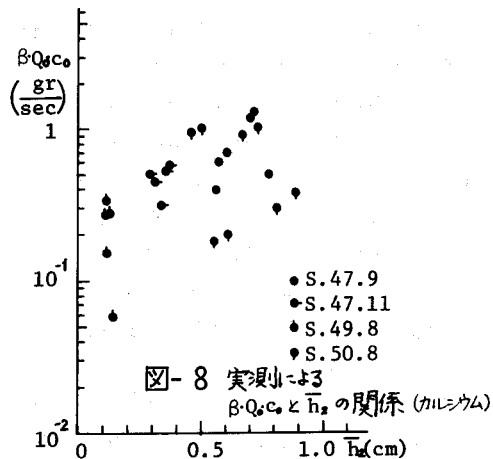
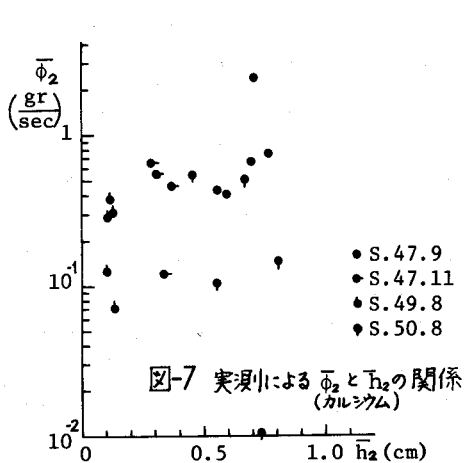
$$\xi = u_i t / \lambda_i$$

(6)

いま、 $\phi = Y(t - T_L + \xi) \cdot Z(\xi)$ で表わされる場合について考えてみる。すなわち、流出の時間パターンが場所的に一定な $Y(t - T_L + \xi)$ に従がい、流出量の場所的な分布が $Z(\xi)$ とみなしうる場合で、かつ ϕ は両者の積で近似表示される場合について考えてみる。先の 4・2 に示した室内実験で $Q_i(t) \cdot Y(t - T_L + \xi)$ が場所的に図-11 のように変化するものと考えうるとき、 $(Q_i \cdot c_i)$ を計測によって既知化しうるので、式(6)は $Z(\xi)$ に関する積分方程式の解法問題となる。すなわち、場所的に水質物質がどの地点から多く流出しているかの判断を得ることができる。 $Q_i(t) \cdot Y(t - T_L + \xi)$ を図-11 から数値として求め、式(6)を多元連立一次方程式として解けばよい。図-12 はその解を例示するもので、先にも述べたように、図-12 中矩形表示で表わされる実際の流出区域に対し、解として求めた流出源 ($Z(\xi)$) は若干上流側にずれてはいるが、ひとまずどの地点から流出が卓越したかを示すことができる。このように、 $\phi_i (= \bar{\phi}_i)$ を時間、場所の関数型として表示しうるとき、上流側どの地点で流出現象が卓越したかを推論することもできるようになる。ここでは一例を示すにとどめているが、今後の展開が期待される。

6. おわりに

降雨後の河川の水質を単にながめているだけで、濁流が徐々に清澄化してゆくことを誰もが経験していることであり、その清澄の度合と流量の低減に密接な関係があることも一つの常識のように理解されている。



少し理屈っぽく説明しても、降雨による地表流の低減あるいは活性層内の流れの低減が容易に推論できる。本研究の発端はそんな素朴な着想からスタートしたものであり、地下水には地下水独自の水質が存在するので、水質の簡単な計測が、降雨の流出機構を解明する上で一つの重要な情報となりうることを信じてつづけてきた。数ヶ年にわたる継続的な実測から明らかになりつつあることはその着想の正しさと同時に、その関係の定量化の困難さである。山は、そして地下水はあまりにも複雑である。かつ、地下水の水質を対象とする場合、その複雑さが、物理的な流動現象の外に化学的な現象をも複雑にする。したがって、この種の研究としては、諸現象をどの程度にまで総括的にモデル化するという点と、いかなる水質指標を取り上げるかによって、その成果は大きく左右されることが明らかになってきた。そういった意味で、本報告に示すように、定性的にはあるが、流出時の水質濃度にあまり大きな変動がなく、流出する水質物質量は流量に支配されること、およびカルシウムイオンよりもマグネシウムイオンの方が定量化しやすいことなどを明らかにすることができたことは一つの前進と考えている。また、 ϕ の定量化が進めば、地中の流出分布をも推定可能となることを示しえたことも一つの前進と考えている。しかし、前途は必ずしも楽観を許さないで、今後の精力的な調査と各方面からの多くの助言を強く期待する次第である。なお、本研究は一部文部省、びわ湖水資源環境調査研究の援助を受けたものであることを記し、ここに謝意を表わす。

参考文献

- 1) 住友, ほか; 土木学会第 27, 28, 29, 30 回年次学術講演会, 昭 47, 48, 49, 50 年
- 2) 高棹 ; 洪水流水系の分析と総合に関する基礎的研究, 京大学位論文, 昭 46 年
- 3) 住友 ; 流出カルシウム量からみた降雨の流出予測, 土木学会, 第 29 回年次学術講演会, 昭 49 年