

§1. はじめに

山間部に降る雨は各種の径路をへて河川に流出し、河川流となる。当然、径路に応じて各種のイオン物質を包含しつつ流下するので、遂に河川水質を詳細に調べれば、降雨の流出機構を定量化しうるのではないかと考へている。以上の観念から、筆者らはすでにいくつかのマクロな検討結果を示してきたが、^{2), 3)} 最大の問題は水質物質が化学的な溶出現象によるものか、物理的な掃流作用によるものかの判別およびそれらの統一的理解の可能性に関する検討であった。そこで本文では、水質物質をカルシウムに限定しな上、上記問題点に理論的な検討を試み、標題に関する既報との近似に對しつゝ位置づけを行なうとともに、今後の研究方向を明らかにするものである。

§2. カルシウムの溶出について

花崗岩質や石灰岩質の土砂に炭酸ガスを含む地下水が飽和したときの平衡関係が成立するはずである。



ただし、 H_2CO_3^* は水に溶解する CO_2 ガス濃度を表す。

また、流出水の pH 値を考慮すれば、アルカリ度を近似的に $[\text{HCO}_3^-]$ で表示しうるとするから、電気的中性条件として次式を与える。

$$2[\text{Ca}^{++}] \approx [\text{HCO}_3^-] \quad \text{--- (4)}$$

結局、式(1)から(4)によつて、水中の炭酸ガス濃度とカルシウムイオン濃度の間につきの関係をえる。

$$[\text{Ca}^{++}]^3 = \frac{K_1 K_s}{4 K_2} \cdot [\text{H}_2\text{CO}_3^*] \quad \text{--- (5)}$$

§3. カルシウムの溶出モデルについて

右図に示すような流下方向長さ L 、巾 B の流出系について考えてみる。

カルシウム濃度を C_2 、炭酸ガス濃度を C_1 と表わすとき、地下水流について

$$u = -\frac{\partial}{\partial x}(k(h+z)) \quad \text{--- (6)}, \quad \frac{\partial \lambda h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(u h) = i_e \quad \text{--- (7)}$$

$$\frac{\partial C_1}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(u C_1) = \frac{i_e C_{1w}}{h} + \phi \quad \text{--- (8)}, \quad \frac{\partial C_2}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(u C_2) = \psi \quad \text{--- (9)}$$

ただし、 u は流速、 k は透水係数、 λ は空隙率、 i_e は浸透する有効降雨、 C_{1w} は浸透した雨水が地下水面に達するときの炭酸ガス濃度、 ϕ は流下に伴う $[\text{H}_2\text{CO}_3^*]$ の変化項、 ψ は流下に伴うカルシウムの変化項。

そこで、式(8)、(9)の常微分方程式および式(5)の微分方程式よりつぎの関係をえる。

$$\beta \left(\frac{i_e C_{1w}}{h} + \phi \right) = 3 C_2^2 \psi \quad , \quad \text{ただし、} \quad \beta = \frac{K_1 K_s}{4 K_2} \quad \text{--- (10)}$$

いま、地下水流下に伴う炭酸ガス濃度の変化として、地表面からの供給が卓越するような場合に限定すれば、近似的に ϕ を無視することとができ、次式を与える。

$$\psi = \frac{\beta i_e C_{1w}}{3 C_2^2} \cdot \frac{1}{h} \quad \text{--- (11)}$$

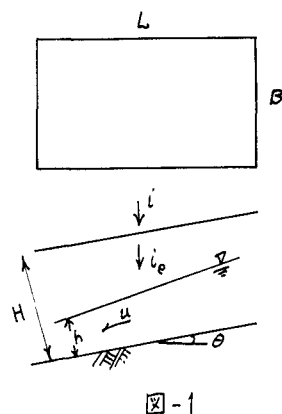


図-1

式(9), (11)両式より次式を得る。

$$\frac{dc}{dt} = \frac{\rho_{ie} C_{iw}}{3C^2} \cdot \frac{1}{h} = \psi, \quad \text{ただし, } \frac{dx}{dt} = u \text{ として, } \quad (12)$$

Dupuit-Forchheimer の近似が成立するとき, h を一定値とみなしうるから, 上式の積分より次式を得る。

$$C^3 - C_{20}^3 = \frac{\rho_{ie} C_{iw}}{3h} (t - t_0) \quad (13)$$

いま, $t_0 = 0, C_{20} = 0$ とみなし, $t = L/kI$ の場合, 結局, 次の関係を得る。

$$C^3 = \frac{\rho_{ie} C_{iw} L}{3kIh} \quad (14), \quad \psi = \left(\frac{\rho_{ie} C_{iw}}{3} \right)^{1/3} \cdot (kI)^{2/3} \cdot L^{-1/3} \cdot h^{-1/3} \quad (15)$$

§4. カルシウム流出の近似モデル

掃流作用によるカルシウム物質の流出量を最も簡単に, 掃流力に比例するものと想定すれば, 溶出, 掃流両者を併せ, 次式のように表わすのが妥当である。

$$\psi = \psi_1 + \psi' = \left(\frac{\rho_{ie} C_{iw} k^2 L^2}{3L^2} \right)^{1/3} \cdot h^{-1/3} + a_0 (p g I)^m \cdot h^m, \quad m = 1 \sim 2, \quad (16)$$

したがって, $\frac{dx}{dt} = u = kI$ として, $\frac{dc}{dt} = \psi$ の関係より, 流域上流端での総カルシウム濃度 (C) が 0 のとき次式を得る。 $C = (L/kI) \cdot \psi$, (17)

$Q = Bh u$ の関係より, 総流出カルシウム量 $M (= Q C)$ とし次式を得る。

$$M = Bh u \cdot \frac{L}{kI} \cdot \psi = \psi h A \quad (18) \quad \text{ただし, } A = BL \text{ (流域面積)}$$

いま, 流出に関する共通指標としてせん断応力をとることにすれば, M_0 という特性値を導入して次式を得る。

$$M = M_0 p g h I A, \quad \text{ただし, } M_0 = \frac{\psi}{p g I} = \left(\frac{\rho_{ie} C_{iw} k^2}{3L^2 h p^2 g^2 I} \right)^{1/3} + a_0 h^m, \quad m = 1, \quad (19)$$

上式における M_0 値が定量化できれば, 種々の流出予測が可能になることは既述の通りである。

§5. 実験, 実測による検証

詳細を省略するが, 室内実験およびある流域における実測結果から図-2, 3 に例示するよう結果をえてくる。 いづれにおいても次式に示すような関係をとっていることが特徴的である。 $M = e h^2, \quad M_0 = e_0 (h^2/Q) \quad (20)$

ただし, e_0 は無次元数。式(19)と上記結果とを対比すれば, 結局式中に示すような各種の地域特性, 降雨特性を近似的には e あるいは e_0 値なる特性値に集約しうることがわかる。厳密には, この e あるいは e_0 と k, L, I などとの関係を理論との対比において検証してゆくことが今後の課題であるが, さらに調査を続けてゆく予定である。

最後に, 本考察に有益な助言をえた松本忠生助手, さらに調査に全面的協力をえた研究室各位に感謝の意を表わす。

参考文献

- 1). 北野, 金森, 水質調査による六甲山系岩石の同位素構成の研究。
- 2). 末石, 佐友, 鈴木, 山岡部及び水質物質の流出について。
- 3). 佐友, 葉川, 刈谷, 水質及び降雨の長期間流出について。

2), 3) は土木学会, 第27, 28回年次学術講演会, 昭. 47, 48年。

