

II-77

風化花崗岩斜面での水質変動機構に関する研究

名古屋大学工学部 正 員 松林 宇一郎 愛知県土木部 岩越 敦哉
 名古屋大学大学院 学生員 森綱 健之 名古屋大学工学部 正 員 高木 不折

1. 研究の背景

山地流域での雨水の流出経路を正しく理解することは、単に流出モデルの構造をより実際に近づけ流出解析の精度をあげるためだけでなく、今日の環境問題に見られるような水の循環にともなう物質の循環も扱うためにも重要なことである。こうした観点から著者らは流出水の水質をトレーサーとして用い、量的だけではなく質的にクロスチェックすることにより流出過程を検討してきた。その一つとして酸素同位体を用いた流出水の新生水と古水への分離を行った。しかし、これは出口で水を2つに分けるだけであり水がどこを通過してきたのかは判らない。

こうした情報を得るには、水の通過経路の痕跡を識別出来なければならない。例えば、図1は風化花崗岩(マサ)が深層まで達している斜面小流域(兼平試験流域)からの流出水中のイオンの時間変化をみたものである。この流域の表層には約1mの褐色森林土壌がありその下がマサとなっている。そのため透水性がよく直接流出率も中小出水では10数%である。図1から、降雨前後の低水時には Na^+ が多くマサ経由の流出であり、流出のピークでは、 Na^+ が減少し表層を起源とする Ca^{2+} が増加する傾向がみられる。これらの現象は、マサ層によるイオン交換機構が大きく関与している。そこで、本研究ではこの流域斜面での鉛直1次元の現象に着目し、イオン交換がどの様に生じているかを実験と数値計算によって検討した。

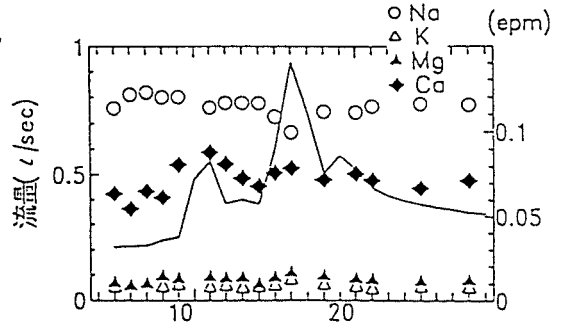


図1 風化花崗岩流域のイオン流出

2. 溶質移動とイオン交換

土壌中のイオンは土壌水中に溶解しているもの、土粒子表面に吸着しているものがあり、これらは浸透流に乗った移流、濃度勾配による拡散・分散移動を行いながら、各々のイオン濃度によって、土粒子表面の吸着状態と土壌水中の溶解状態との間で交換を行う。本研究では1.で述べたようにマサでの変化に注目しているため Na^+ と Ca^{2+} に着目する。これらの挙動は、各々のイオンの保存式(1)とイオン交換を規定する質量作用の法則の一つで、 Na^+ と Ca^{2+} に対し経験的によく適合するガボン式(2)によって記述される。ここに、 θ :体積含水率、 q_w :水分フラックス(cm/s)、 ρ_d :乾燥密度(g/cm^3)、 D_c :分散係数(cm^2/s)、 S :乾土単位重量当り表面吸着量(meq/g)、 C :土壌中イオン濃度(meq/cm^3) (下付き添え字Ca, Naはそれぞれのイオンに関する量であることを示す)、 S_{Na} 、 S_{Ca} については更に $S_{\text{Na}} + S_{\text{Ca}} = \text{CEC}$ (陽イオン交換能力)の関係がある。以上の式を連立させて C 、 S を求めることが出来る。なお、本研究での実験では流れは実際の現象に近く不飽和浸透とし、含水状態は鉛直方向に定常且つ一様とした。

$$\frac{\partial(\theta C_{\text{Na}})}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\theta D_c \frac{\partial C_{\text{Na}}}{\partial z} \right) - \frac{\partial(q_w C_{\text{Na}})}{\partial z} - \rho_d \frac{\partial S_{\text{Na}}}{\partial t} \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\theta C_{\text{Ca}})}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\theta D_c \frac{\partial C_{\text{Ca}}}{\partial z} \right) - \frac{\partial(q_w C_{\text{Ca}})}{\partial z} - \rho_d \frac{\partial S_{\text{Ca}}}{\partial t}$$

$$\frac{S_{\text{Na}}}{S_{\text{Ca}}} = K_g \cdot \frac{C_{\text{Na}}}{\sqrt{C_{\text{Ca}}}} \quad (2)$$

K_g ($\text{meq}^{-1/2} \text{cm}^{1/2}$) はガボン定数である。

これらの挙動は、各々のイオンの保存式(1)とイオン交換を規定する質量作用の法則の一つで、 Na^+ と Ca^{2+} に対し経験的によく適合するガボン式(2)によって記述される。ここに、 θ :体積含水率、 q_w :水分フラックス(cm/s)、 ρ_d :乾燥密度(g/cm^3)、 D_c :分散係数(cm^2/s)、 S :乾土単位重量当り表面吸着量(meq/g)、 C :土壌中イオン濃度(meq/cm^3) (下付き添え字Ca, Naはそれぞれのイオンに関する量であることを示す)、 S_{Na} 、 S_{Ca} については更に $S_{\text{Na}} + S_{\text{Ca}} = \text{CEC}$ (陽イオン交換能力)の関係がある。以上の式を連立させて C 、 S を求めることが出来る。なお、本研究での実験では流れは実際の現象に近く不飽和浸透とし、含水状態は鉛直方向に定常且つ一様とした。

3. イオン置換実験

実験には図2に示すように直径10cmの塩ビパイプにマサ土をつめ、33cmに締め固めた。つぎに、マサが初めに保持している土壌水のイオンを除去し実験を分かりやすくするため、予め蒸留水によって充分(2000ml) washingを行った。washing後の流出水のイオン濃度は $\text{Na}^+ 0.03\text{epm}$, $\text{Ca}^{2+} 0.02\text{epm}$ であり、他のイオンは殆ど検出されなかった。実験には0.3epm NaCl溶液（溶液1）、0.78epm CaCl_2 溶液（溶液2）、0.45epm NaCl溶液（溶液3）を、定量ポンプにつなげた降雨発生装置より $q_w=0.00446\text{cm/s}$ で、それぞれ7700, 6300, 7000秒給水した。また、実験中パイプ下端が飽和しないように、パイプ上端から空気を圧入し続けた。流出水を10分毎に採水しイオンクロマトグラフによりイオン濃度を測定した。図3は実験結果を示したものである。図中で Cl^- は土粒子に吸着しないトレーサであり、特に溶液1を供給している期間でのBTCより、間隙流速($v=0.0147\text{cm/s}$)、体積含水率($\theta=0.3$)及び分散係数($D_c=0.06\text{cm}^2/\text{s}$)を求めた。 Na^+ と Ca^{2+} の挙動については、まず、溶液1の Na^+ によって初期に土粒子に吸着されていた Ca^{2+} が置換されて流出する。溶液2では逆に Ca^{2+} により土粒子に吸着した Na^+ が置換され流出するが、ある時点で Na^+ は減少し始め Ca^{2+} が急増するという2段階の変化が見られた。これはマサではCECが小さく吸着態の Na^+ が Ca^{2+} によりほぼ置換されてしまい、 Na^+ の減少と Ca^{2+} の急増が生じたものと考えられる。溶液3では初期には Na^+ が吸着されるため少ないが次第に増加してゆく。

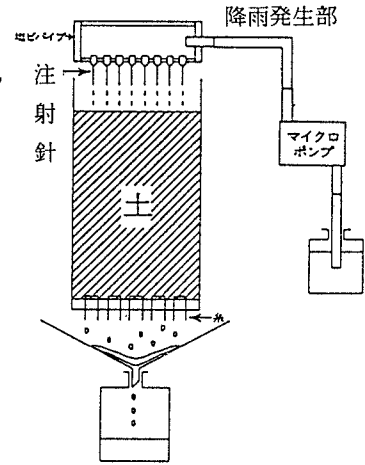


図2 実験装置

4. 数値解析と考察

それでは、このイオン交換実験の結果はどの程度理論的に説明できるのだろうか。そこで、2.でのべた基礎式を差分化して数値解析により検討した。解析に当たって、CECおよびガボン定数を求めなければならない。そこで、予め Na^+ で充分飽和させた一定量のマサを容器に取り、それに一定濃度の CaCl_2 を定量ずつ加えては強制排水するという操作を繰り返し、徐々に Ca^{2+} で置換してゆく。そして各時点での濃度を測定しイオン置換量を累積し、CECを求める。

($\text{CEC}=0.0009\text{ meq/g}$)同時に各時刻での C_{Na} , C_{Ca} , S_{Na} , S_{Ca} の関係からガボン定数を求める($K_G=14\text{ meq}^{-1/2}\text{cm}^{1/2}$)。図4はその結果を示したものである。ほぼガボン式で表されることが分かる。これらの定数を用い実験の条件にしたがって数値計算をした結果を図3に併記した。これから分かる通り、計算結果は実験結果をよく再現しており、イオン交換の推定が可能であることが分かった。ただし、本実験はイオンの種類を2つに限った単純な条件の元で行ったが、実際の流域ではイオンの種も多く、側方流も生ずるなど複雑であり、更に検討を要する。

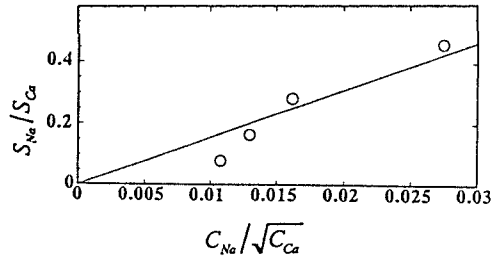


図3 ガボン式の適合性

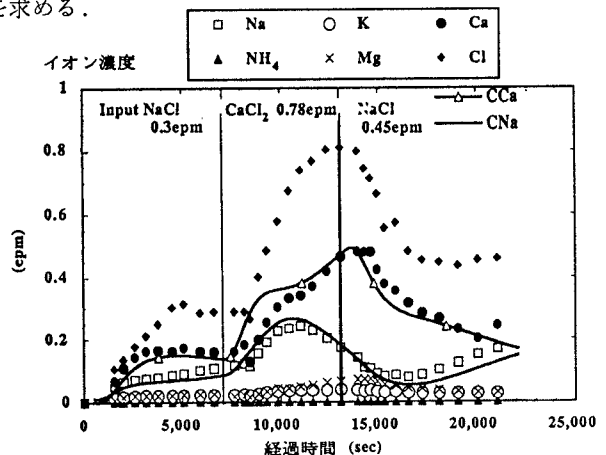


図4 イオン置換実験結果と数値計算結果