

青木一男 共著 “地下水の塩水化に伴う吸着現象について”
嘉門雅史
への討議・回答

(土木学会論文集, 第370号/Ⅲ-5 1986年6月掲載)

▶ 討議者 (Discussion)

神野 健 二 (九州大学)

By Kenji JINNO

これまで討議者は地下水の塩水化現象について主に水理学的な興味から数値解析を研究してきました。今回上記の題目に関する研究の成果報告がありましたので以下のような点についてご教授頂ければ幸甚に思います。

(1) 今後塩水化の問題を考えるうえでのこの研究の意義について

従来までは地下水の塩水化を予測する場合の数学モデルでは、著者も述べておられるように塩分濃度の土壌への吸着の効果は考慮されていなかったように思われます。すなわち地下水の塩水化といえ、室内実験あるいは現地観測で地下水の電導度の測定およびその数値計算に関したものでした。そこでご質問したいのは、この論文で検討されているナトリウムイオンの砂粒子への吸着と、塩分濃度 $C(x, t)$ を計算することとはどのような関連をもつのでしょうか。

またたとえば一次元の移流・分散・吸着方程式：

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\partial (D \frac{\partial C}{\partial x})}{\partial x} - f \cdot C(x, t) \quad (1)$$

ここに、 u ：移流速度、 $D = \alpha u + D_m$ ：縦方向水理学的分散係数、 α ：分散長、 D_m ：分子拡散係数、 f ：塩分濃度に応じた吸着がたとえば濃度に比例するとしたときの比例定数、 x ：流れ方向の座標、 t ：時間

を計算する場合の塩分濃度 $C(x, t)$ とは具体的には何を指すのでしょうか。この論文での結論のように、ナトリウムイオンの吸着が地下水の塩水化を考えるうえで重要であるとすれば、今後は塩素イオン濃度とナトリウムイオン濃度とを別個に取り扱う必要があるということでしょうか。

(2) 浸透層内の流れと吸着効果について

浸透層内の流れと物質の輸送問題の研究としてたとえば D. R. F. Harleman¹⁾, P. G. Saffman²⁾, および討議者³⁾ では浸透層内の流れを表わす特性値としてのレイノルズ数 $Re = u d_m / \nu$ (d_m ：平均粒径、 ν ：動粘性係数)と、

分散係数 D の無次元量 D/ν との関係を実験的および解析的に検討しています。その関係式としてよく知られているように

$$D/\nu = \alpha R_e^b \quad (2)$$

があります。参考文献1) および3) では一次元の砂層カラムで式(2)の関係式を、また文献2) および3) ではその理論的考察を行っています。これらの研究では浸透層内の流れ、物質の分子拡散、粒子径等間の関係を調べています。そこでご質問したいのは著者の論文では容器の中に砂および溶液を入れて自動振とう装置を用いて24時間強制的に反応を起こさせて試験を行っていますが、このようにして得られた吸着特性と、浸透層内を流れている状態での濃度の時間的変化を考慮した吸着特性とを全く同じ現象と考えてよいのでしょうか。吸着現象は砂粒子近傍のミクロな現象と思われる。したがって、分子拡散の効果は流動状態中では無視できないのではないのでしょうか。特に、浸透層内の流れでは、砂粒子同士の接点近傍などで局所的な流速の分布があって、これらが分子拡散や幾何学的な分散現象、さらに吸着があればその効果を受けて物質が移動しているものと考えられます。しかるに著者の論文ではこのような流動状況下での実験ではありません。したがって、厳密に言えばやはり流動状況下での分子拡散や吸着を評価することが必要ではありませんか。その場合の実験結果の整理についても流れの特性を考えた整理の工夫が望ましいと思います。この場合、吸着の評価をするのは、式(1)を数値計算をするよりも式(1)の解析解を基礎におのおののパラメーターを見積ることが必要でしょう。また解析解が存在しないときには数値計算もやむを得ないでしょうが、本論文のように微妙な物質収支を考える場合には計算精度についても十分な注意を払うことが必要ではないでしょうか⁴⁾。

(3) 分散長および吸着項について

本論文での計算例では分散長として $\alpha_1 = 6.0 \text{ m}$, $\alpha_2 =$

0.6 m が用いられています。論文にも説明があるように確かに実際の現場では地質構造の空間的変動があるため統計的にはそのような値を取ることも十分に考えられます。しかし本論文で取り扱ってられる均一砂層内での吸着現象の効果の評価を行うための計算例としてはこのような大きな分散長を考えるとという点がよく理解できません。やはり砂粒子のオーダーの分散長を与えた分散係数の下でおのおのの項を評価すべきではないでしょうか。

(4) 数値計算の精度について

式(1)に示すような移流項： $u\partial C/\partial x$ を含む偏微分方程式ではこの項の離散化誤差に十分注意を払う必要があります。有限要素法、有限差分法あるいは境界要素法を用いて数値計算をする場合の最大の難点はこの項であると思います。特に移流項が分散項や吸着項に比べて卓越するような場合には数値解が振動・発散することはよく知られています。このようにこの種の方程式を数値計算すると離散化誤差が大きくなり、せっかく吸着項を導入してもこの項が離散化誤差に埋もれてしまうおそれがあります。その意味からも、吸着項の効果を例示するのが目的であれば、数値計算上の誤差評価をまず行う必要があるのではないのでしょうか。

(5) 吸着量の測定について

▶回答者 (Closure)

青木一男・嘉門雅史 (京都大学)

By Kazuo AOKI and Masashi KAMON

著者らの論文を熟読して、大変重要な諸点についてご討議いただき深く感謝します。ご指摘の項目順に以下のように回答いたします。

(1) 今後の塩水化の問題を考えるうえでの本研究の意義に関する質問に対して

移流分散吸着方程式を塩水化問題に適用する場合の変数 C とは、他の研究^{1),2)}において用いられているように、本論文でも地下水中の NaCl の濃度を表わしています。

移流分散現象により帯水層中に塩水が浸入した場合、水溶液中の NaCl は Na イオンと Cl イオンに遊離して存在しています。その NaCl のうち Na イオンが土粒子に吸着され、Na イオンの吸着により土粒子に以前から吸着していた Ca イオン、Mg イオン等が脱着されるといった吸脱着現象が生じます。脱着した Ca イオンあるいは Mg イオンが NaCl の Cl イオンと結び付き、地下水中の NaCl 濃度は減少します。したがって、著者らが本論文中に指摘しているように、塩水浸入による移流分散現象を取り扱ううえで、NaCl 吸着脱着現象を考慮することが必要になってくるわけです。

本論文ではアルコール洗浄を行っておられます。参考文献5)によりますと負荷電量が溶液の pH、イオン濃度によって大きく変化する土壤ではアルコール洗浄では現実の土壤で起こる陽イオン交換反応の測定精度が低下すると説明されています。この点に関してご意見をお聞かせ下さい。

参考文献

- 1) Harleman, D.R.F. and Rumer, R.R. : Longitudinal and lateral dispersion in an isotropic porous medium, *Jour. of Fluid Mech.*, Vol. 16, Part 3, pp. 385~394, 1963.
- 2) Saffman, P.G. : A theory of dispersion in a porous media, *Jour. of Fluid Mech.*, Vol. 6 (3), pp. 321~349, 1959.
- 3) 神野健二：浸透層内の縦方向分散係数及び細管モデルについて、*日本地下水学会誌*, 第21巻, 第2号, pp. 55~71, 1979.
- 4) 森澤真輔・井上頼輝：帯水層における重金属の挙動を評価する数学モデルについて—カドミウムによる地下水汚染機構の検討—, *衛生工学研究論文集*, 第21巻, pp. 43~54, 1985.
- 5) 日本土壤学会編：土壤の吸着現象, 博友社, pp. 17~19, 1985.

(1987.6.3・受付)

(2) 浸透層内の流れと吸着効果に関する質問に対して

本論文では、土粒子に対する陽イオンの吸脱着特性の究明を目的として、次の3つの課題を明らかにしたものです。

- ① 吸脱着量の定式化
- ② 吸脱着現象間に化学ヒステリシスが存在することの確認
- ③ 化学ヒステリシスの原因究明

ここで、化学ヒステリシスの原因究明を行う場合の実験方法として、従来行われているような浸透層内を流れる状態下での吸脱着実験(カラム実験法等)を用いると、次のような問題点が生じます。すなわち、④各種濃度下で数多くの吸脱着実験を行わねばならないために、各試料の均一化が難しく、⑤吸脱着反応が非平衡状態で進行してしまう、等の問題です。したがって、化学ヒステリシスの検討を行う場合には、上で述べた影響を排除するため、吸脱着反応の極限状態での特性を明確にしておく必要があるといった背景があります。

また、参考文献^{3),4)}で用いられているカラム実験法は、

得られた破過曲線から分散係数等のパラメーターを推定する目的から行われたものと考えられます。しかし、著者らの論文では、化学ヒステリシスを含めた吸脱着特性を明らかにし、その吸脱着特性が移流分散特性に与える影響を示すのが目的であります。したがって、これらの目的の違いから実験方法が異なっているものです。

次に、実際の地盤を考える場合は、浸透層内を流れる状態下での吸脱着実験が必要になることは、討議者が述べられているとおりです。

このような状態下では、分散、分子拡散、吸脱着が互いに作用し合い、さらに複雑な挙動を示すものと考えられ、化学ヒステリシスを含む吸脱着特性が分散、分子拡散のパラメーターの推定に与える影響を議論することが、今後の課題であると考えております。

(3) 分散長および吸着項に関する質問に対して

分散、分子拡散、吸脱着は、(2)で述べたとおり相互に密接な関係があり、その関係を反映させてそれぞれのパラメーターを推定する必要があります。論文の中では現地測定で得られる値を参考にし、簡単のため $\alpha_1=6\text{ m}$, $\alpha_2=0.6\text{ m}$ の値を用いましたが、今後、室内試験と現場モデルとの相互関係を明らかにし、吸脱着現象が分散係数、分子拡散係数に及ぼす影響を評価する必要があると考えております。

(4) 数値計算の精度に関する質問に対して

討議者をご指摘されているように、移流項が分散項に比べ卓越する場合には、解が不安定になる場合があります。そこで、著者らは移流項に影響を及ぼす流速を精度よく得られるように、カップリング手法を導入した解析手法を用いて計算したものです。また、(2)、(3)で述べたように分散、分子拡散、吸脱着の各パラメーター

を推定する場合には、離散化誤差が重要になってきますので、今後検討すべき点の1つと考えています。

(5) 吸着量の測定手法に関する質問に対して

アルコール洗浄を行う実験方法は、水溶液中のNaCl濃度が低い場合には、ご指摘のとおり測定精度が落ちることがあります。このような場合吸着量を精度よく測定しようとするれば、添加したNaCl水溶液濃度と吸着後のNaCl水溶液濃度の差から吸着量を決定する方法がよいと考えられます。しかし、著者らの吸脱着実験では、NaCl水溶液の低濃度域から高濃度域に対し実験を行っているため、特に高濃度域において、そのような実験方法を用いると、吸脱着量を精度よく測定することが、かえって不可能になってきます。したがって、著者らはNaCl水溶液の低濃度域から高濃度域にわたる吸脱着実験に対して、測定手法の統一性を図るためアルコール洗浄法を採用したものです。

参 考 文 献

- 1) Pinder, G.F. and Cooper, H.H. : A numerical technique for calculating the transient position of the saltwater front, *Water Resour. Res.*, Vol. 6, No. 3, pp. 875~882, 1970.
- 2) Segol, G. and Pinder, G.F. : Transient simulation of saltwater intrusion in southeastern Florida, *Water Resour. Res.*, Vol. 12, No. 1, pp. 65~70, 1976.
- 3) 神野健二 : 浸透層内の縦方向分散係数及び細管モデルについて, *日本地下水学会誌*, Vol. 21, No. 2, pp. 55~71, 1979.
- 4) 森澤真輔・井上頼輝 : 帯水層における重金属の挙動を評価する数学モデルについて—カドミウムによる地下水汚染機構の検討—, *衛生工学研究論文集*, Vol. 21, pp. 43~54, 1985.

(1987.11.4・受付)