

京都大学工学部 学生員 加藤 博敏
 京都大学工学部 正 員 青木 一男
 京都大学工学部 正 員 嘉門 雅史

1. はじめに——従来の地下水汚染問題は、地下水のみを対象とし、汚染物質の移流拡散問題として捉えられてきた。しかし、帯水層中の土粒子に対するイオンの吸着により、汚染物質の拡散に及ぼす影響や、汚染物質の蓄積という形で土粒子自体の汚染など土粒子の存在を考慮した問題も考えなければならない。このような観点に立ち、地下水と土粒子との間で生ずる塩分の挙動についての研究^{1), 2)}が進められ、塩分の土粒子への吸脱着特性にヒステリシスが存在することが明らかにされたが、データ数の少なさより十分な定式化には至っていない。そこで、本研究ではデータの蓄積を行い、それに基づき吸脱着過程についてそれぞれ吸着等温式を求め、さらにその結果を用いてFEMによる数値解析を行った。

2. 試料および実験方法——実験試料は、吸着剤として豊浦標準砂および琵琶湖粘土を用い、添加溶液としてNaCl水溶液を用いた。実験は、図-1に示す方法に従って行った。まず、実質重量20g 相当試料を取りこれに第1回操作として蒸留水 a ml を添加、十分かくはんし、1時間放置する。次に、第2回操作として X₀% NaCl 水溶液 b ml を添加し同様の操作を行う。ここで、脱着実験のみ第3回操作として溶液 d ml 抽出、X₀% C 溶液 c ml 添加を行う。これにアルコール洗浄、遠心ろ過し、ろ液を捨てる操作を2回施し、間引き水中の陽イオンを洗い落とす。さらに10%CH₃COONH₄水溶液200mlを添加、十分かくはんし、1時間放置後遠心ろ過する。そのろ液中のNa⁺イオン濃度を原子吸光分析により測定した。なお、添加溶液濃度および添加量について表-1~表-4にまとめた。

3. 解析手法——吸着・脱着のそれぞれの過程において、土粒子への塩分吸着の有無が地下水中の塩分濃度変化に及ぼす影響についてFEMを用い数値実験を行い検討した。塩分の移流拡散吸着を考慮した非定常2次元拡散方程式は次のようになる。

$$D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} - V_x \frac{\partial C}{\partial x} - V_y \frac{\partial C}{\partial y} = \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\rho}{\varepsilon} \frac{\partial q}{\partial t} \quad \text{--- (1)}$$

ここに、C:塩分濃度、D₀:拡散係数、v₀:間引き流速、q:吸着量、ρ:土の比重、ε:間引き率である。

式(1)をガレルキン法を用い三角形1次要素で離散化し計算させることにより、各節点の塩分濃度の変化を求めた。境界条件は式(2)、初期条件は式(3)で与えた。

$$\left. \begin{aligned} C(x, 10, t) &= 0.35, & \frac{\partial C}{\partial x}(0, y, t) &= 0 \\ \frac{\partial C}{\partial x}(2, y, t) &= 0, & \frac{\partial C}{\partial y}(x, 0, t) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad \text{--- (2)}$$

$$C(x, y, 0) = 0 \quad \text{--- (3)}$$

4. 実験結果および考察——吸脱着実験結果として豊浦標準砂の場合を図-2に、琵琶湖粘土の場合を図-3に示した。これらの結果では、従来の研究と同様に吸着過程と脱着過程と

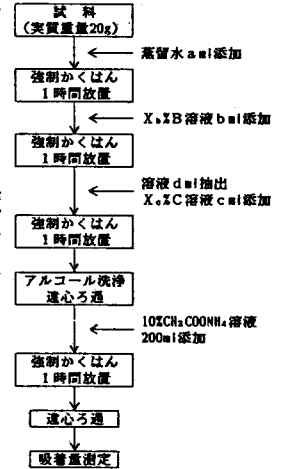


図-1 実験手順

表-1 吸着実験における溶液濃度と添加量(豊浦標準砂)

最終溶液濃度(x)	a(ml)	X ₀ (%)	B溶液	b(ml)
0.25	100	0.5	NaCl	100
0.50	100	1.0	NaCl	100
0.75	100	1.5	NaCl	100
1.00	100	2.0	NaCl	100
1.25	100	2.5	NaCl	100
1.50	100	3.0	NaCl	100
1.75	100	3.5	NaCl	100
2.00	100	4.0	NaCl	100
2.25	100	4.5	NaCl	100
2.50	100	5.0	NaCl	100
2.75	100	5.5	NaCl	100
3.00	100	6.0	NaCl	100
3.25	100	6.5	NaCl	100
3.50	100	7.0	NaCl	100

表-2 吸着実験における溶液濃度と添加量(琵琶湖粘土)

最終溶液濃度(x)	a(ml)	X ₀ (%)	B溶液	b(ml)
0.50	100	1.0	NaCl	100
1.00	100	2.0	NaCl	100
1.50	100	3.0	NaCl	100
2.00	100	4.0	NaCl	100
2.50	100	5.0	NaCl	100
3.00	100	6.0	NaCl	100
3.50	100	7.0	NaCl	100

表-3 脱着実験における溶液濃度と添加量(豊浦標準砂)

最終溶液濃度(x)	a(ml)	X ₀ (%)	B溶液	b(ml)	C溶液	c(ml)	d(ml)
0.25	50	7.0	NaCl	50	H ₂ O	325	75
0.50	50	7.0	NaCl	50	H ₂ O	300	50
0.75	50	7.0	NaCl	50	H ₂ O	275	—
1.00	50	7.0	NaCl	50	H ₂ O	250	—
1.25	50	7.0	NaCl	50	H ₂ O	180	—
1.50	50	7.0	NaCl	50	H ₂ O	135	—
1.75	100	7.0	NaCl	100	H ₂ O	200	—
2.00	100	7.0	NaCl	100	H ₂ O	150	—
2.25	100	7.0	NaCl	100	H ₂ O	111	—
2.50	100	7.0	NaCl	100	H ₂ O	80	—
2.75	100	7.0	NaCl	100	H ₂ O	54.5	—
3.00	100	7.0	NaCl	100	H ₂ O	33.3	—
3.25	100	7.0	NaCl	100	H ₂ O	15.4	—

表-4 脱着実験における溶液濃度と添加量(琵琶湖粘土)

最終溶液濃度(x)	a(ml)	X ₀ (%)	B溶液	b(ml)	X ₀ (%)	C溶液	c(ml)
1.75	100	7.0	NaCl	100	—	H ₂ O	200
2.25	100	7.0	NaCl	100	1.0	NaCl	200
3.00	100	7.0	NaCl	100	2.5	NaCl	200

の間に明らかなヒステリシス関係が認められた。そこで、この実験結果をFreundlichの吸着等温式を用いて定式化すると次のような結果が得られた。

豊浦標準砂 吸着過程 : $q=0.461C^{0.194}$ ($r=0.977$), 脱着過程 : $q=0.506C^{0.103}$ ($r=0.988$)
 琵琶湖粘土 吸着過程 : $q=12.6C^{0.430}$ ($r=0.999$), 脱着過程 : $q=14.5C^{0.330}$ ($r=0.996$)

次に、地下水中に塩分が拡散して行く過程において、実験から求められた吸脱着量がどの程度の影響を及ぼすかを数値解析した結果を示す。図-4、図-5は、豊浦標準砂の吸着を考慮した場合と無視した場合を比較したものである。吸着過程においては、低塩分濃度の部分で吸着の影響が見られ、拡散の時間的な遅れが生じている。また脱着過程においては、ヒステリシスにより吸着過程と異なった挙動を示し、吸着の影響がほとんど見られない。図-6、図-7は豊浦標準砂に琵琶湖粘土を5% 混入した試料の場合で、吸着過程、脱着過程ともに吸着の影響が大きく現れ、時間的な遅れが顕著である。脱着過程の拡散挙動が、豊浦標準砂のみの場合と異なる原因は、ヒステリシスの影響より全体的な吸着量の多さによるものと考えられる。

5. おわりに――地下水中の塩分拡散を考える場合、吸着の影響による拡散の時間的な遅れがかなり生じることが数値解析の上ではあるが明らかになった。今後、実験的に吸着の影響を検討して行く計画である。なお本研究に際し多大な御援助、御指導をいただいた京都大学赤井浩一教授に深く感謝いたします。

<参考文献>

- 1)青木ら:地下水の塩水化に伴う吸着現象について,第38回土木学会年講,pp.249~250,1983
- 2)青木ら:地下水の塩水化に伴う吸着現象について(Ⅱ),第39回土木学会年講,pp.721~722,1984

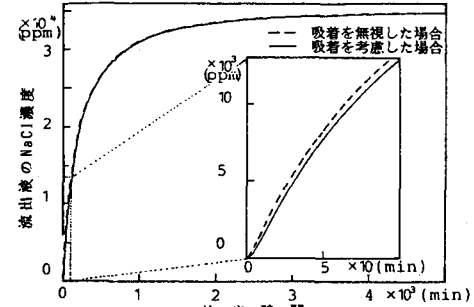


図-4 吸着時の破過曲線(標準砂試料)

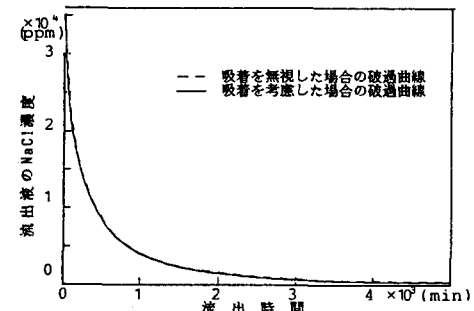


図-5 脱着時の破過曲線(標準砂試料)

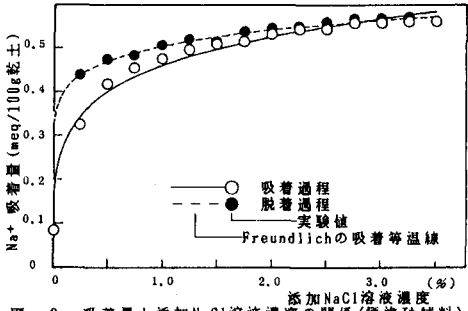


図-2 吸着量と添加NaCl溶液濃度の関係(標準砂試料)

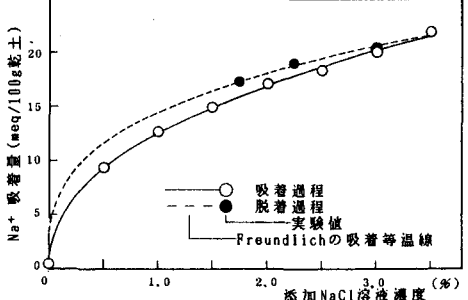


図-3 吸着量と添加NaCl溶液濃度の関係(粘土試料)

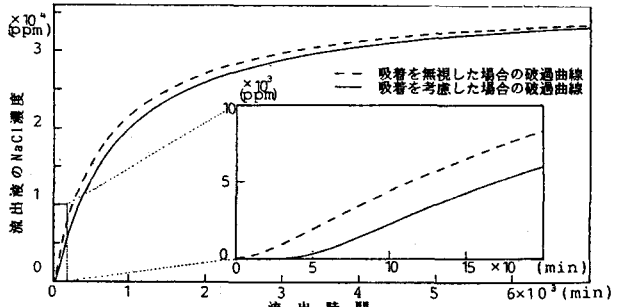


図-6 吸着時の破過曲線(5%粘土混入試料)

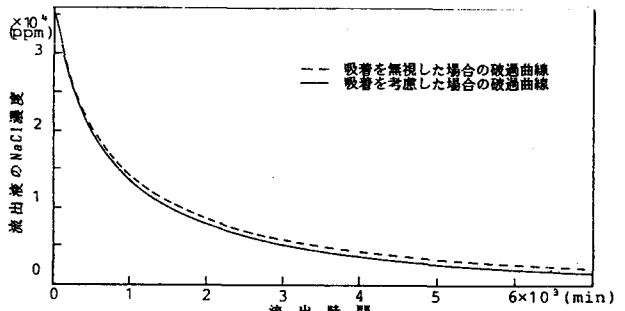


図-7 脱着時の破過曲線(5%粘土混入試料)