

II-121 南バングラデシュにおける深層取水時のヒ素輸送解析

東北大学工学部 学生員 ○丸井 堂嗣
 東北大学大学院 正会員 真野 明
 東北学院大学大学院 正会員 石橋 良信

1. はじめに

1971年以降のチューブウェル（手押しポンプ井戸）の普及に伴い、人口約1億4000万を抱えるバングラデシュでは国民の95～97%が飲料用水として地下水を利用するようになった。しかし、国土の70%で地下水のヒ素汚染が拡大し、国が定める飲料基準0.05mg/lを超える井戸は25%にのぼり、約3500万人の人々が慢性的なヒ素中毒の危機にさらされている。現在、バングラデシュにおける主な水源は深さ30m程度の浅井戸である。しかし、飲料基準を超えるヒ素は浅い帯水層に多く分布している。

2. 研究目的

ヒ素濃度の高い浅い帯水層を避けるために、今後は深さ50m以上の深井戸が主な水源となる事が予想される。深井戸でも現在と同じ揚水量であると仮定すると、深い帯水層の水量が減少し、ヒ素濃度の高い浅い帯水層の地下水が浸透する事により深い帯水層のヒ素濃度も高くなると考えられる。そこで深い帯水層からの取水時におけるヒ素輸送解析を行い、安全な水資源の確保に役立てると共に、長期的な水資源利用の方向性を示す事が本研究の目的である。

3. 対象流域

対象流域は、ゴライ川とパドマ川（ガンジス川下流部）で囲まれた、流域面積がおよそ17,000km²の地域である。（図-1）当該地域の上中流域では地下水のヒ素汚染が著しく、ある区域では全井戸の80%以上で0.05mg/lを超えるヒ素が検出されている。

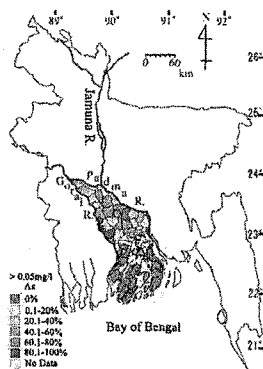


図-1 対象流域

4. ヒ素輸送解析モデル

解析モデル（図-2）は鉛直方向にz軸を設け、メッシュサイズを0.2m、メッシュ数1を500個と設定し、地質横断図を考慮し地層を2層としている。第1層は地表面から50m（1≤250）とし、浅い帯水層として設定した。また、第2層を地表面から50mから100m（251≤1≤500）とし深い帯水層として設定した。また、地中の層の境界を地表面と平行とし地下水は不圧地下水を想定している。このモデルを用いて解析を行った。

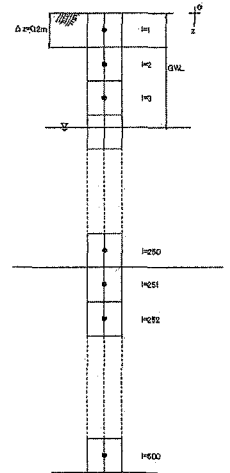


図-2 解析モデル

5. 支配方程式

水中のヒ素に対する物質輸送の基礎式は質量保存則より、次式のように与えられる。

$$\frac{\partial(\varepsilon C)}{\partial t} + \frac{\partial(\varepsilon C V_z)}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial z} \left(\varepsilon D_{zz} \frac{\partial C}{\partial z} \right) - \sum C' W + \lambda(\varepsilon C + \rho_b S) - k_r(S - k_d C)\rho_b = 0 \quad \dots (1)$$

上式においてεは間隙率、Cは水中の物質濃度、ρ_bは帯水層構成物のかさ密度、Sは帯水層構成物に吸着している物質質量、V_zは間隙を通過する流体の流速、Dは分散係数の2階テンソル、Wは帯水層の単位体積当たり単位時間当たりの流出量、C'は流入水（河川と降雨）、流出水（揚水と蒸発散中の物質濃度）、λは減衰率、k_rは吸脱着反応のパラメータ、k_dは分配係数を表している。

続いて、本解析で適用している線形の吸脱着反応速度式を示した。土砂に含まれるヒ素に対しては、質量保存側は次式のように与えられる。

$$\frac{\partial S}{\partial t} = -k_r(S - k_d C) \quad \dots (2)$$

6. 初期ヒ素濃度と土壌吸着物質濃度

水中のヒ素濃度の初期値は British Geological Surveyによる深さとヒ素濃度の関係²⁾を基に浅い帯水層で $C=0.05$ mg/l, 深い帯水層で $C=0.02$ mg/l を与えている。また, 土壌に吸着しているヒ素濃度は地質横断面図¹⁾と文献値²⁾を参考に浅い帯水層 5.7mg/kg 同様にして深い帯水層は 0.3mg/kg と設定した。

7. 分配係数

分配係数 k_d は, 上記の初期ヒ素濃度と土壌吸着物質濃度を基に決定する。土壌では, 平衡状態であると考えられるので式(2)より $S = k_d C$ となる。この平衡時の吸着等温式より, 浅い帯水層の分配係数を 1.14×10^{-7} m³/mg, 深い帯水層の分配係数を 1.50×10^{-8} m³/mg と設定した。

8. 吸脱着反応のパラメータ

式(2)で吸脱着による濃度変化だけ考えると非平衡時の水中のヒ素濃度 C は $C \equiv Sk_r \rho_b t / \varepsilon$ と近似できる。本解析では, 平衡までの時間スケール T_e を推定することにより吸脱着反応のパラメータ k_r を算出しており, T_e は 1 年と 5 年の場合を検討した。吸脱着反応のパラメータ k_r は 1 年の場合, 上式より浅い帯水層では $k_{r1} = 9.9 \times 10^{-11}$ sec⁻¹, 深い帯水層では $k_{r2} = 8.2 \times 10^{-10}$ sec⁻¹, 5 年の場合, 浅い帯水層では $k_{r1} = 2.0 \times 10^{-11}$ sec⁻¹, 深い帯水層では $k_{r2} = 1.6 \times 10^{-10}$ sec⁻¹ である。

9. 解析結果

解析結果は図-3, 4 のようになった。縦軸に深さ, 横軸に時間を取り, 帯水層における水中のヒ素濃度の時間的な変化を表している。いずれの場合も浅い帯水層の上部でヒ素濃度が低くなり, 一方で深さ 50m 以上の深い帯水層で次第にヒ素濃度が高くなっていく様子が見られる。浅い帯水層については図-3 の場合, 今後 100 年間, およそ 10m から 50m の範囲が飲料基準を超えており図-4 の場合, およそ 30m から 50m の範囲が飲料基準値を超えている。また深い帯水層については図-3 では約 55m まで, 図-4 では 100 年後には約 70m までヒ素汚染が見られる。

仮に図-4 のようにヒ素が輸送されるとすると, 30m 以下の浅い帯水層からも, 50m 以上の深い帯水層からも取水が可能である。しかし, 深さ 30m 前後では 0.045

mg/l 以上の比較的高いヒ素濃度を示すので, 今後は深い帯水層から取水すべきである。ただし, 今回の解析では浅い帯水層の初期ヒ素濃度として 0.05 mg/l という飲料基準を用いたが, 現地観測結果¹⁾によると 0.14 mg/l という非常に高いヒ素濃度を示す地域もある。そのような場合は, 50m 以上の深い帯水層に輸送されるヒ素濃度も高くなる事が予想される。そこで図-4 から判断すれば, 70m 以上の深井戸からの取水がより望ましいと言える。

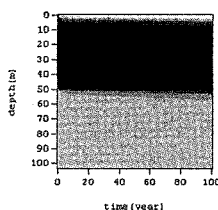


図-3 地下水中の濃度変化
($T_e=1$ 年)

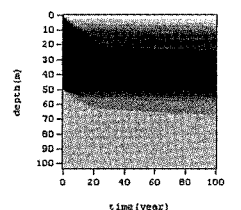


図-4 地下水中の濃度変化
($T_e=5$ 年)

10. まとめ

1. 浅い帯水層上部で水中のヒ素濃度が減少し, 深い帯水層上部では増加する。
2. 長期にわたって安全な水資源の確保が見込まれるのは深い帯水層であり, 70m 以上の深井戸からの取水が望ましい。
3. 本解析で用いた吸脱着反応のパラメータは推定値である。今後, 溶出実験により値の妥当性を検討する必要がある。

参考文献

- 1) 梅木 知裕: 南バングラデシュにおける地下水流動とヒ素輸送解析, 東北大学修士学位論文, pp.19-33, 2005.
- 2) Kinniburgh, D.G. and Smedley, P.L.: Arsenic contamination of groundwater in Bangladesh Vol 2 Final report, pp.1-25, pp.83-86, 2001.
- 3) Jamal, A.: Argument against natural origin of arsenic in groundwater, SOS-arsenic.net, http://www.sos-arsenic.net/english/natural_origin/1.html