

II-79

揚水による地下水汚染物質の除去

八代高専 正員 藤野和徳

1. はじめに

近年，トリクロロエチレンなどの有機系塩素化合物や農薬による地下水汚染が各地で発生し問題となっている．これらの地下水汚染の対策として，まず汚染物質の挙動特性を明らかにし，有機系塩素化合物であればその対策として真空抽出や揚水による浄化が考えられている．ここでは，揚水井戸による汚染物質の回収または汚染領域の拡大を防ぐための経済的揚水量の算定手法を提示し，分散現象を含めて，解の検討を行っている．

2. 基礎方程式

定常時の地下水流動は次式で与えられる．

$$\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} = \sum \frac{2}{k} Q_i \delta(x_i) \delta(y_i) \quad (1)$$

ここに， $H = h^2$ で， h ：地下水位， k ：透水係数， Q ：揚水量， δ ：デルタ関数
有限要素法を用いると，節点の H と揚水量 Q の関係は次式で表される．

$$Q = AH + B \quad (A, B \text{は係数行列}) \quad (2)$$

3. 揚水による地下水汚染物質の除去

地下水汚染領域が明らかになった場合，ここでは，揚水により地下水の流れを制御し，移流・分散による汚染物質の広がりを制御する（汚染物質が図-1の汚染物質制限線を越えない）と同時に，できる限り少ない経済揚水量で，汚染物質を回収することを最適状態とし，その定式化を行う．揚水井戸の設置位置について，図-1に示す解析領域で検討すると，左から右方向への地下水流がある場合、下流のCDに近い位置に揚水井戸を設置するほうが揚水量は少なくてすむ．また， h_l と h_r の地下水位に差がない場合，汚染領域の中央部に揚水井戸を設置するより，汚染物質制限線上に多くの井戸を配置するほうが揚水量は少なくてすむ．したがって，地理的条件の許す範囲で，流れを考慮し揚水井戸を設置する必要がある，線形計画法が有効となる．

井戸節点と流れの制御のために地下水位に制約を課す節点での H と Q の関係は式(2)を小行列に分解し変形すると，

$$Q = CH + D \quad (3)$$

制約条件は、井戸節点で、

$$Q_i \geq 0 \quad (4)$$

井戸節点以外の制約節点では、

$$Q_i = 0 \quad (5)$$

さらに、汚染物質が制限線を越えて流出しないための制約条件として、

$$H_{i2} - H_{i1} \geq H_i \quad (6)$$

となる．これらの制約条件のもとで、目的関数

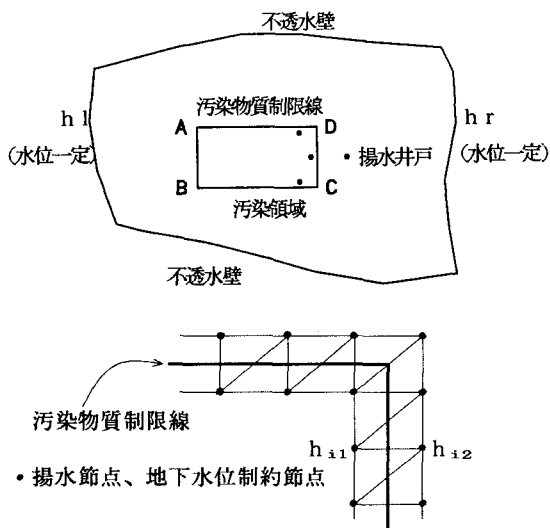


図-1 解析領域と揚水による地下水汚染物質の除去

は総揚水量 Q_t を最小とするもので、次式となる。

$$Q_t = \sum Q_i \rightarrow \text{最小} \quad (7)$$

なお、式(6)の H_i' については地下水位を直接表すものでないことより所定の水位差 h_i' が必要な場合は、繰り返し計算となる。

4. 解析例

境界水位 $h_l=10.0\text{m}$ 、 $h_r=8.0\text{m}$ 、透水係数 $k=0.003\text{cm/sec}$ 、揚水井戸を3本設置した場合の経済揚水時の地下水位等高線を図-2に示す。

Case 1は $H_i'=0.1\text{m}^2$ とし、Case 2は $H_i'=0.3\text{m}^2$ としている。Case 1の総揚水量 $Q_t=62.4\text{m}^3/\text{日}$ （ $Q_1=41.7, Q_2=0.0, Q_3=20.7\text{m}^3/\text{日}$ ）、Case 2の総揚水量 $Q_t=143.0\text{m}^3/\text{日}$ （ $Q_1=89.4, Q_2=0.0, Q_3=53.6\text{m}^3/\text{日}$ ）となった。両Caseともに汚染領域の広がりが制御された流れとなっている。

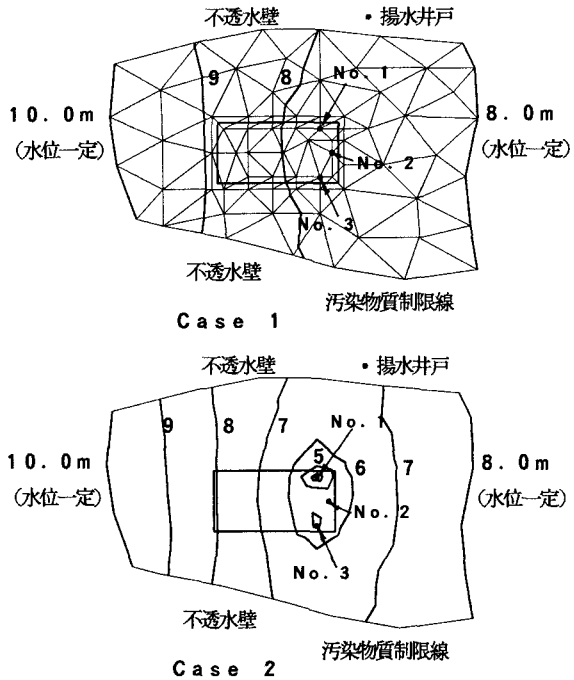


図-2 経済揚水時の地下水位等高線

5. 分散による汚染物質の広がり

分散により、汚染物質が制限線を越える可能性としては、(1) 汚染領域内への流れがあるが、分散が大きいため、制限線を越える場合、(2) 制限線AD、またはBCに沿う流れ（主流）の横方向の分散によって制限線を越える場合の二つが考えられる。

(1) については1次元の移流分散方程式の解¹⁾により評価される。

$$\frac{C}{C_0} = \frac{1}{2} \left[\text{erf} \left\{ \frac{L/2 - (x-u't)}{2(D_L t)^{1/2}} \right\} + \text{erf} \left\{ \frac{L/2 + (x-u't)}{2(D_L t)^{1/2}} \right\} \right], \quad D_L = a_L |u'| : \text{縦方向の分散係数}, a_L (\text{定数})$$

この場合、領域内部への流れ（ u' ：実質流速）があれば、分散より移流の効果が大きて汚染物質が制限線を越えることは無いと考えられる。

(2) については2次元の移流分散方程式の解により評価される。

$$C(x, y, t) = \frac{C_0}{4\pi u' (a_L a_T t)^{1/2}} \exp \left\{ -\frac{(x-u't/R)^2}{4a_L u' t} - \frac{y^2}{4a_T u' t} \right\}, \quad D_T = a_T |u'| : \text{横方向の分散係数}, a_T (\text{定数})$$

主流方向と直角方向の分散幅は、 $4(2a_T u' t)^{1/2}$ で与えられる。汚染領域内の最遠点の物質が主流に乗って揚水井戸まで到達する時間 T' を算定し、その間の広がりを無くするような直角方向の流れがあれば、汚染物質の広がりは阻止できる。その流速は、 $V = \{4(2a_T u' T')^{1/2}\}/T'$ となる。これより、 h_i' 、 H_i' が算定できる。

6. むすび

地下水汚染の対策として、揚水法を提示したが、揚水井戸の設置には地理的な条件、水理的な条件が課せられるため、線形計画法を用いた本手法は有用性があると考えられる。なお、井戸は下流に設置する方が経済的である。今後は温度を含めた揚水手法を確立してゆきたい。

参考文献

- 1) モツツバタ W. 【上田年比古 監訳】(1990)：「パソコンによる地下水解析」，森北出版，177～186。