

1. はじめに

1980年代以降、地下水流動シミュレーションを最適化手法と組み合わせた地下水管理モデルが開発されている。従来、不圧帯水層内の地下水流（非線形）および蒸発散量等水頭のノンスムース関数として表される流出量を最適化手法に組み込むことは困難であった。本研究では、エンベッティング、リスボンマトリックス両アプローチを用い、三層非線形帯水層システムを対象とした最適地下水管理モデルをそれぞれ開発、比較した。さらに、エンベッティングモデルを米国グレートソルトレーク東岸地域の帯水層に適用し、種々のシナリオに対する最適揚水計画案を策定した。

2. 最適地下水管理モデルの概要

1) モデルの定式化

モデルの定式化は以下の通りである。また、全ての最適化モデルは General Algebraic System, GAMSでプログラミングされ、MINOS (Murtagh and Saunders, 1987)を用いて最適解を得た。

目的関数

地域全体の総揚水量を最大とすることを目的とする。

$$\text{maximize } Z = \sum_{i,j} \text{gp}_{i,j} \quad (1)$$

ここに、 gp_o = 揚水量 層 o 、行 i 、列 j に位置する差分セル o における揚水量

制約条件

差分法で離散化した準三次元の定常地下水流動式 (McDonald & Harbaugh, 1988)

$$\begin{aligned} & CR_{i,j+1/2}(H_{i,j+1}-H_{i,j}) + CR_{i,j-1/2}(H_{i,j}-H_{i,j-1}) \\ & + CC_{i,j+1/2,j}(H_{i,j+1,j}-H_{i,j,j}) + CC_{i,j-1/2,j}(H_{i,j-1,j}-H_{i,j,j}) \\ & + CV_{i+1/2,j}(H_{i+1,j}-H_{i,j}) + CV_{i-1/2,j}(H_{i-1,j}-H_{i,j}) \\ & = \sum_{m=1}^N q^*_{i,j,m} \end{aligned} \quad (2)$$

ここに、 $CR_{i,j+1/2} = 2dx_j(T^i_{i,j}T^i_{i,j+1})/(T^i_{i,j}dy_{i+1}+T^i_{i,j+1}dy_i)$

$$CC_{i,j+1/2,j} = 2dy_i(T^i_{i,j}T^i_{i,j+1,j})/(T^i_{i,j}dx_{j+1}+T^i_{i,j+1,j}dx_j)$$

$$CV_{i+1/2,j} = dx_j dy_j / \{(dz_i/2Kz_{i,j}) + (dz_{i+1}/2Kz_{i+1,j})\}$$

$H_{i,j}$ = ポテンシャル水頭、 CR & CC = 透水量係数の調和平均、 cv = 垂直方向の透水量係数 Kz の平均、 $T^i_{i,j}$ & $T^i_{i,j+1}$ =

地下水管理モデル、最適化、線形計画法

〒300-12 茨城県稲敷郡基崎町高崎 2304 TEL 0298-71-2040 FAX 0298-71-2022

透水量係数、 q^* = 単位水平面積当たりの揚水量、かん養量、蒸発散量、排水路あるいは自噴井戸からの流出量、
2) 地下水流動式の非線形項

(2)式において透水量係数 T は被圧帯水層では定数であり (2) 式の左辺は常に線形となる。一方、不圧帯水層では水頭の関数 $T = KH$ (K = 透水係数) となり

(2) 式は非線形となる。排水路への流出量、蒸発散量、自噴井戸からの流出量は、水頭のノンスムース関数で表される。例えば、

$$\begin{aligned} \text{排水路の流出量 } q^d_{i,j} &= \Gamma_{i,j} (T^d_{i,j} - B^d_{i,j}) \quad \text{for } H_{i,j} > B^d_{i,j} \\ &= 0 \quad \text{for } H_{i,j} \leq B^d_{i,j} \end{aligned}$$

ここに、 $q^d_{i,j}$ = 排水路への流出量、 Γ^d = 排水量係数、 $B^d_{i,j}$ = 排水路底の標高

これらの非線形項は直接には線形計画法で解けない。

3) エンベッティングモデル : E1

USUGWM、ユタ州立大学地下水管理モデル (Gharbi, et al, 1990) を基本とし、水頭のノンスムース関数で表される流出量の部分を改良したモデルである。エンベッティングモデルでは (2) 式は最適化モデルの中に組み込まれている。このモデルでは非線形の地下水流の近似式を線形計画法に組み込むため、サイクリングを用いた。サイクリングとは、線形化したモデルの最適解を繰り返し求め、最終的に非線形のモデルの最適解を求める方法である。各々のサイクルでは、不圧帯水層の透水量係数は一つ前のサイクルで得られた水頭 (HFC : 既知) の最適解を代入することにより求められ、結局 (2) 式は線形となる。

4) 非線形エンベッティングモデル : E2

透水量係数などの非線形項は線形化することなしに水頭 (H : 変数) の関数として定式化されたモデルである。この非線形モデルは MINOS/DNLP (nonlinear programming with discontinuous derivatives) を用いて解かれた。線形化が必要ないので、サイクリングをもちいることなしに一回で最適解 (ただしローカル) が求められる。

5) リスponsマトリックスモデル: RM

帯水層が線形と仮定できれば重ねあわせの原理が適用できる。ここでは非線形の帯水層システムに適用するため、線形化とサイクリングを用いる。最適化モデルには(2)式に代わって以下の式が組み込まれる。ただし、最適化モデルの他に、セル m での単位揚水量に対応するセル o での水頭変化量($\delta_{o,m}$)を計算するための地下水流動シミュレーションモデルが必要となる。

$$h_o = h_o^{un} + \sum_{n=1}^N \delta_{o,n} q_n$$

ここに、 h_o =セル o でのポテンシャル水頭、 q_n =セル m での揚水量

3. 仮想帯水層におけるモデル比較

3層(不圧/被圧/被圧) $x 15$ 行 $x 15$ 列=675セルの仮想帯水層に対してモデルEM1、EM2、RMを作成し、必要計算時間、必要コンピューターメモリー等について比較した。非線形モデル(E2)は他の線形化モデル(EM1、RM)と同様の最適解を得た。また、種々の初期設定水頭に対しても同様な最適解を得たので、モデルはグローバルな最適解に近い値に達したと判断した。

4. グレートソルトレーク東岸帯水層への適用例

1) 研究対象地域の概要

グレートソルトレーク湖東岸地域は、米国ユタ州ソルトレーク市の北に位置し、東にワサッチ山地、西にグレートソルト湖に接する。当地域では、近年急速に増加している飲料水、工業用水の70%を地下水に依存している。また、過度の揚水による弊害が顕在化している。従って、この地域においては、どの付近でどのくらいの量が持続的に揚水できるかを知ることが重要な課題となっている。

(2) 地下水管理モデル

エンベッティング手法を用い、本地域の地下水管理モデルを作成し、種々のシナリオに対する最適揚水計画案を策定した。当地域の帯水層システムのモデルは大スケールかつ3層構造(1不圧、1,274セル、2被圧、3,606セル)であり、2,123のノンスムース関数を含んでいる。(図-1参照)

5. まとめ

本研究の目的は、より現実的な地下水流動シミュレーションを効率よく最適化モデルに組み込むことにあった。このなかで、非線形エンベッティングモデルとリスponsマトリックスアプローチをもちいたモデルを新たに

開発した。また、既存の線形エンベッティングモデル(USUGWM)を改良し、グレートソルトレーク東岸地域の帯水層に適用した。これらのモデルは持続的な揚水量を決定するための広域地下水管理計画策定に役立つと考える。

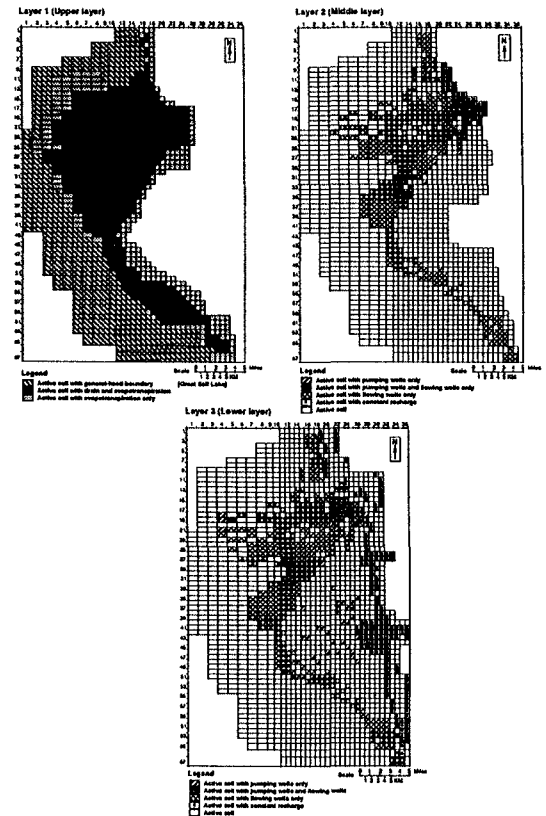


図-1 グレートソルトレーク東岸帯水層の差分セル図

参考文献

- 1 Gharbi, A. and R.C. Peralta, and K.M. Waddel. 1990. Modelling for potentiometric surface management of multilayer aquifer system. International Summer Meeting, Columbus, OH, ASAE. Paper NO. 90-2060.
- 2 Murtagh, B.A. and M.A. Saunders. 1987. MINOS5.1 User's Guide, Report SOL 83-20R. Stanford University.
- 3 McDonald, M.G. and, A.W. Harbaugh. 1988. A three-dimensional finite-difference groundwater model. U.S. Geological Survey. Open File Report 83-875.