

中国洛惠渠灌区における地下水モデルの研究 — モデルを用いたモデルを用いた水管理の検討 —

水利用学分野 太田垣 晃一郎

キーワード:地下水モデル, MODFLOW, 定常, 非定常

1. はじめに

現在, 世界各地において人口の増加に伴う食料需要が年々増加している。今後新しい農地の開発が困難になってきている中で, より条件の厳しい乾燥地等での持続的な農業が不可欠となっている。しかし, 乾燥地の農業は難しく, 管理を誤ると数々の問題が生じてくる。本研究の調査対象地区である中国洛惠渠灌区は半乾燥地域に属し, 塩類集積の問題等が発生している。洛惠渠灌区においては洛河からの取水のほかに, 地下水が補給的な役割を担っている。今まで行ってきた調査・実験

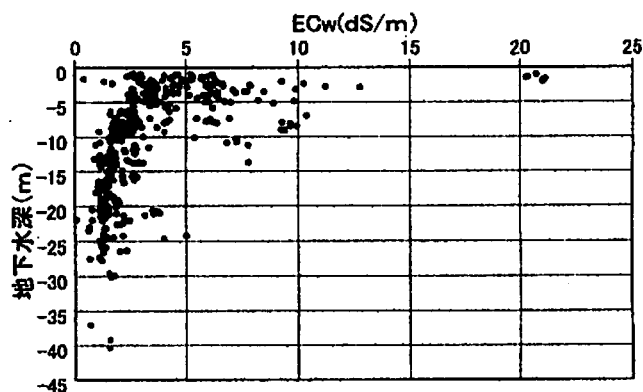


図1 地下水位と ECw の関係

により, 図1のように地下水深の高い井戸では, 地下水電気伝導度 (EC_w) が高い傾向 (3 dS/m 以上は農業用水として好ましくない)を示している。なおかつ, 圃場では毛管上昇によって地表面での塩類集積が見られ, 灌区の農業に悪影響を与えている。そこで, 本研究では GMS(Groundwater Modeling System)ソフトに内蔵された MODFLOW (概念モデル) を用い, 不圧帯水層の地下水動態を把握し, 排水改良計画を行う場合の地下水挙動について水管理の観点からシミュレーションした。

2. 調査地, 調査概要

洛惠渠灌区は, 洛河を挟んで西側の洛西地区と東側の洛東地区の2地区からなる。本研究では対象をより塩害の激しい洛東地区の約 32,000 ha に絞り, 2002年8月から2005年9月の現地調査で得られたデータを用いた。この地区には100余りの井戸があり, その中から約70井を観測井として選び, 各項目についての測定を行った。現地では緯度, 経度, 標高, 地下水位, EC_wを測定し, 現地気象観測所にて気象データを得た。2005年8月には3井 (Nos. 70, 76, 2), 2005年9月には1井 (No. 45) にダイバー水位計 (Van Essen Instruments 社) を設置し, 地下水位, EC_wの連続観測を行っている。また, 幾つかの井戸周辺における現場透水試験(オーガーホール法)や, 土壌断面調査, 採取した不攪乱試料による変水位透水試験などにより, 土壌の物理特性を調査・分析した。

3. MODFLOW プログラムの概要

本研究では地下水モデルを計算するプログラムとして MODFLOW を用いた。MODFLOW は, アメリカ合衆国地質調査所 (U.S. Geological Survey) によって開発された差分地下水流動解析モデルである。MODFLOW の地下水流動方程式は地下水の水収支式と, ダルシーの法則を組み合わせ導かれた支配方程式である式(1)を用いている。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x h \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y h \frac{\partial h}{\partial y} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} - R \quad (1)$$

ここで, h : (飽和帯) 地下水位, x, y : 座標, K_x, K_y : 透水係数, S_s : 比浸出量, R : 一般的吸い込み/湧き出し項で流入時にはプラスをとる。MODFLOW はブロック中心型の差分モデルであり, 式(1)を後退差分において差分化し, 反復法として, PCG 法を採用し解を得た。MODFLOW に

おける流出機構のモデル化においては、面的な涵養、井戸による揚水あるいは注水、河川との交流、排水路からの地下水流出、蒸発散による地下水の減少等、一般に考え得るほとんどの条件を考慮できる機能をパッケージという形で有している。また、モデル境界条件の与え方等、多くの論文（例えば大島ら、1995）が発表されており、様々な使用例のある地下水シミュレーションモデルである。

4. 地質条件、境界条件の設定

本研究において、地質条件決定の際に、黄土高原はレスが堆積した比較的単純な地質構造になっている点を踏まえ、文献資料（貝塚、1997）や現地調査に基づいて判断することとした。不圧帯水層の計算を行うことから、地層構成を不透水性基盤と黄土層との二層の単純構造とし、計算帯水層は黄土層一層で地表標高から 100 m 深で一定と仮定した。境界条件の設定は、北西から南にかけての洛河を河川境界（指定水頭）とした。東側は地形が 20 ~ 30 m ほど下がり、下段が黄河灘となっていることから、周辺地下水位から 20 m ほど下げた水頭を与え、指定水頭境界とした。北部は実測地下水位等高線から、潜伏流があると仮定しフラックス境界とした（図 2）。潜伏流量は実測できないので、灌区内実測水位からモデル較正において同定した。

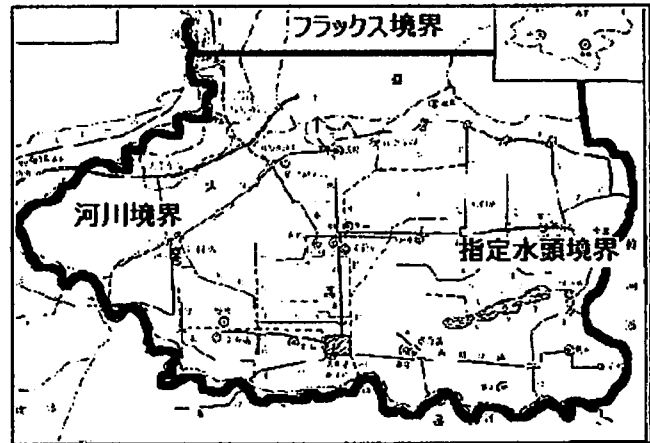


図 2 対象地域の境界条件

5. モデルの作成

モデルの作成は、図 3 に示す方法で進めていった。まず、30 m × 30 m メッシュの GIS マップと洛東地区の水路網図をオーバーレイさせ GIS マップ上に灌区排水路の配置を定め、GIS マップを基に概念モデルを作成した。概念モデルの作成は、上述した境界条件を設定し、井戸および排水路の位置データ（緯度、経度、標高）をマップ上に入力した。次に非定常モデル ($time > 0$) の初期水位を得るために、洛東地区の定常モデル ($time = 0$) を作成した。最後に、作成された定常モデルを初期水位とし非定常モデルの作成を行った。

5.1 定常モデル

定常モデルで得られる水位が非定常モデルの初期水位となるので、目標とする地下水位を非定常モデル初期水位である 2002 年 8 月の水位とした。井戸からの揚水量、涵養量、蒸発散量は時間変動が大きいため、非定常モデルにおいて挿入し較正することとした。水平透水係数は現場透水試験やコアサンプルによる変水位透水試験での垂直、水平方向に得たデータを参考に決定した。水平透水係数については、洛東地区の高位、中位、低位の 3 段丘面を中心に、対象地区を 6 つのエリアに分割した上で、各エリアに値を与えた。計算初期水位は地表面から -10 m とした。

モデル較正においては、水平透水係数、境界条件のパラメータまたはエリアを変更対象とし、パラメータの変更は手動で行う試行錯誤法を採用した。変更においては、Spitz(2003)が提供した資料を参考に、パラメータの上限値と下限値を定め、それぞれのエリア間の実測データによるバランスを重視し実施した。モデル較正は、洛東地区全体に 15 箇所の観測目標をつくり、計算値と実測値を比較または、計算水位図と実測水位図を比較しながら行った。なお、較正は全体の水位バランス以外に、水

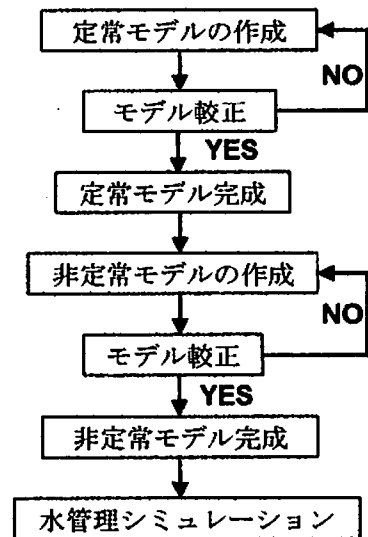


図 3 モデル作成の流れ

管理シミュレーションの対象である洛東地区北部の井戸 Nos. 45, 42, 36 を実測水位に近づけることを目標として行った (図 4)。

5.2 非定常モデル

非定常モデルは定常モデルで得られた水位を初期水位とし、2002年8月～2005年9月までの実測水位を再現することを目標とし、計算期間とした。モデルはパラメータの変化に応じて39の負荷持続期間に分け、それぞれの負荷持続期間から144の時間ステップに分割した。水平透水係数、モデル境界条件は定常モデル作成の際に較正されたパラメータを用いた。また、非定常モデルにおいては、灌区全体の比浸出量をAnderson(1994)によるシルト地層の平均値となる0.2と設定した。そして、灌区の灌漑スケジュールに沿って井戸からの揚水データを加え、水位計データと気象データから推定した涵養量、蒸発散量の値を挿入し、計算を行った。なお、涵養量、蒸発散量はGeostatistics機能を用い、地下水深3.5m以内であるエリアを設定し値を与えた。それ以外のエリアにおいては、較正において実測水位になるべく近似するように涵養量、蒸発散量のデータを与えた。

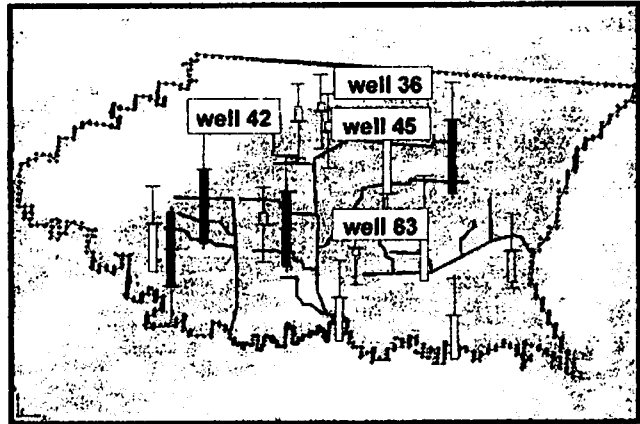


図4 観測目標と井戸の位置

非定常のモデル較正においては、降雨、灌漑による推定涵養量、推定蒸発散量を変更対象とし、定常モデルと同様に手動で行う試行錯誤法を採用した。

6. モデルの実測水位との比較

まず、定常モデルの実測水位図と計算水位図を重ね合わせた図5を見ると、洛東地区南部には揚水の影響による実測水位との不一致が見られるが、洛東地区全体の水位は概ね再現出来ているといえる。図6-1での15箇所の観測目標における実測水位と計算水位を比較した結果を見ると、1:1線周辺にプロットが分布し高い精度を示していることから、この段階をもって定常モデルの完成とした。なお、定常モデルにおける観測目標での実測値と計算値の平均誤差は-0.774 m、平均絶対誤差は2.359 m、標準偏差は3.138 mとなった。

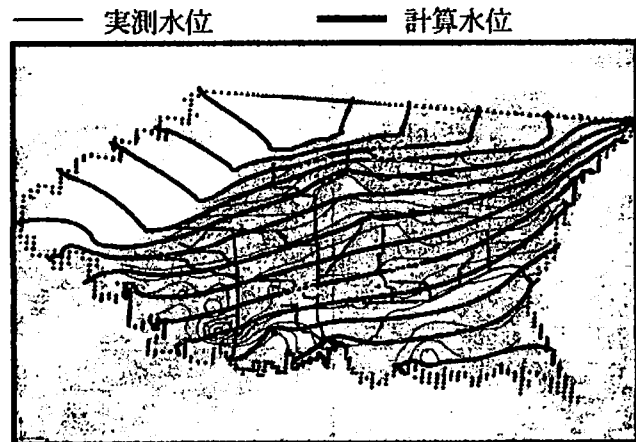


図5 実測水位と計算水位の等高線

次に非定常モデルであるが、図7に実測水位と計算水位をプロットしたグラフを示す。両井戸とも概ね観測水位を再現できていると思われる。井戸No.45においては水深3.5m以内である事から、推定された涵養量、蒸発散量の影響から水位変動が生じていることが分かる。また、図6-2は、非定常モデルにおける2005年5月1日の15箇所の実測水位と計算水位を比較したものである。この時間ステップにおいて1:1線周辺に分布しており高い精度を示している。また、他の時間ステップにおいても同様に高い精度を示していた。したがって、非定常モデルにおいても概ね計算期間内で現地水位を再現できたものと考え、この非定常モデルを用いて水管理シミュレーションを行った。なお、全ての時間ステップにおける非定常モデルでの観測目標における実測値と計算値の平均誤差は-1.019 m、平均絶対誤差は2.478 m、標準偏差は3.174 mとなった。

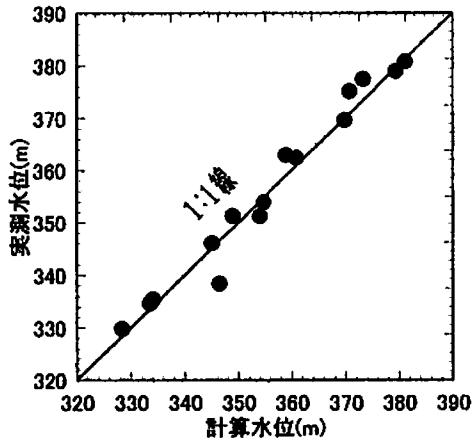


図 6-1 実測水位と計算水位 (定常モデル)

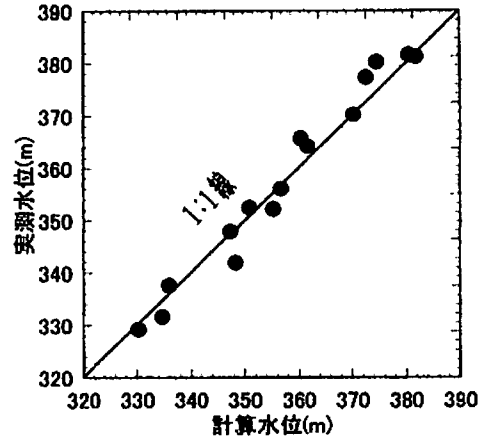


図 6-2 実測水位と計算水位 (非定常モデル)

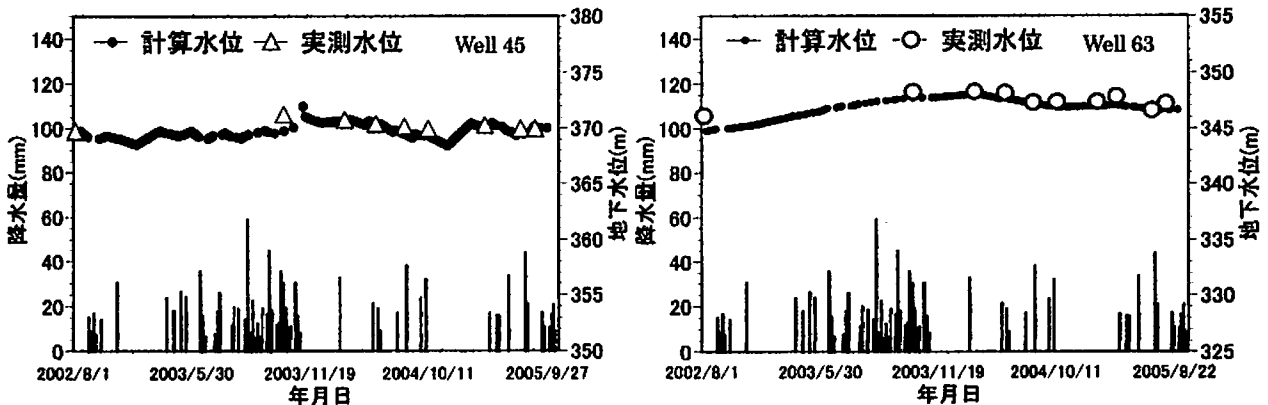


図 7 各井戸における実測水位と計算水位の比較

7. モデル作成のまとめと今後の課題

本研究において洛東地区の地下水動態について、北部における地下水管理の検討地域を中心に、ある程度の精度を持ったモデルを構築することができた。モデルにおけるパラメータの感度解析を行った結果、本モデルにおいて、水平透水係数、涵養量、蒸発散量が地下水位に大きな影響を与えることが判明した。今回のモデルに使用したパラメータは、表層近くの透水係数から帯水層における水平透水係数の推定、また水位計データから涵養量、蒸発散量の推定を行うなど、依然現地パラメータとの誤差が生じていることは否めない。事実、GMS 内の自動パラメータ推定機能を用いてモデル較正を行った結果、試行錯誤法によって得たエリア間での水平透水係数バランスとは異なる水平透水係数バランスが与えられながらも、精度の高い広域地下水位分布が再現された。

今後は設置した水位計から細かく経年的な地下水変動の把握が可能になり、更なる水位計の設置も検討されている。したがって、感度解析でモデル水位に大きな影響を与えている涵養量や蒸発散量の推定精度が高まることが予想される。また、帯水層の透水係数測定を行っていくこともモデル精度の向上に必要なこととなる。そして、モデル作成後の排水改良シミュレーションにおいて水位挙動を予測することができ、今後、洛東地区の排水計画を検討していく上で、利用可能になることも考えられる。洛恵渠灌区において地下水動態が農業に影響を与えていることは明白であり、今後更なる高精度の地下水モデルの構築が求められる。

参考文献

大島洋志ら(1995)：幌延町開進地区における地下水流動解析研究，核燃料サイクル開発機構，pp.74～75。貝塚爽平(1997)：世界の地形，東京大学出版会，pp.309～310。Spitz, K. (2003)：実務者のための地下水環境モデリング，技報堂，pp299。Anderson, M.P. (1994)：地下水モデル，共立出版，pp25