

中国洛惠渠灌区における2次元地下水モデルの改良に関する研究 —灌漑スケジュールの違いが地下水位の変動に及ぼす影響—

水利用学分野 永田 将

キーワード: 半乾燥地, 農地利用, 揚水, 地下水涵養

1. はじめに

中国陝西省大荔県に位置する洛惠渠灌区は灌漑面積 52,000 ha, 年間取水量約 1.5 億 m³, 水路延長 235 km の大規模灌漑地区である。年間の平均降水量と計器蒸発量はそれぞれ 483 mm, 1,730 mm であり, 半乾燥気候に属する。1950 年代より灌漑が開始され, 小麦, 綿花, トウモロコシ, 果樹, 野菜等を中心に作付けを行なっている。灌漑開始当初から行なわれているボーダー灌漑や畝間灌漑といった適用効率の低い地表灌漑のため浸透損失が大きく, 地下水位の上昇に伴い 70 年代前半には約 6,000 ha の農地が土壌の塩類化のため耕作放棄される状態となった。そこで, 70 年代後半には排水路の整備を行い, 塩類化の拡大は抑えられた。さらに, ここ数年の動向として, 2003 年の 8 月下旬から 10 月にかけて 433 mm の連続的降雨により土壌中の塩が溶脱されたため, 土壌の塩類化は軽減された。しかしながら, 地下水の塩濃度および水位の高さを考えると, 塩類化が進行する可能性は高い。したがって塩類化を引き起こさないような灌漑管理の確立が必要であり, そのためには降雨や灌漑による地下水挙動の把握が不可欠となる。そこで涵養過程を考慮した 2 次元地下水モデル(以下本モデルとする)が福本(2007)により構築され, その結果高い地下水位の変動に関しては精度よく再現することができ, 低い地下水位においても変動傾向を再現することができた。しかし農地・水利用の実態を本モデルに十分に組み込んではいない。そこで本研究では本モデルの改良として, 2008 年 9 月の現地調査において収集した農地・水利用に関するデータを用いて, 灌漑スケジュールと揚水利用を本モデルに組み込んだ。また, 本モデルにおける灌漑スケジュールの違いが地下水位の変動に及ぼす影響を明らかにするため, 地下水位の変動と涵養機構について考察した。

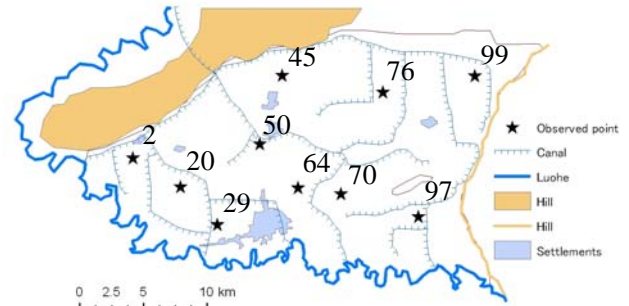


図1 洛惠渠灌区洛東区概要 (数字は検証地点番号)

2. 対象地区概要

本研究では, 洛惠渠灌区の東部に位置する洛東区(図1)を対象とした。洛東区の総面積 48,000 ha のうち農地は 32,000 ha であり, 灌区全体に満遍なく分布している。洛東区は 8 つの村からなり(図2), それぞれ異なる栽培面積割合を有する(表1)。昔から主に小麦とトウモロコシの二期作, 綿花の作付けが行われていたが, 近年は換金性の高さから果樹とハウス栽培による野菜への作付けの転換が進んでおり, 現在は綿花畑に果樹を植栽した混作畑も増えている。灌漑には基本的に洛河の水が用いられるが, 降雨の集中する 9 月と 10 月には灌漑が行われなため, 洛河からの取水は行われない。灌漑もその時期を除いた春, 夏, 冬の間で, 水路に通水されているときに限り, それぞれ 1 回程度行われる。さらに圃場の状態と天候に応じて補助的に灌漑が行われるが, 通水停止時に灌漑が必要な場合, ポ

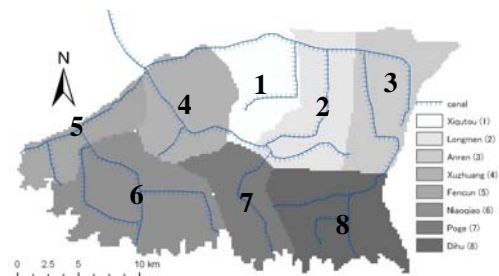


図2 洛東区の村区分

表1 洛東区の 2008 年における栽培面積の割合 (ha)

	小麦	綿花	果樹	その他	計
Xiqutou (1)	285	1,519	1,927	766	4,497
Longmen (2)	0	1,189	3,316	0	4,505
Anren (3)	0	267	2,400	28	2,694
Xuzhuang (4)	17	199	2,751	729	3,696
Fencun (5)	70	1,101	770	1,170	3,110
Niaoqiao (6)	44	618	1,932	2,274	4,868
Poge (7)	58	1,740	1,429	129	3,357
Dihu (8)	34	1,950	2,668	114	4,765
計	508	8,582	17,193	5,208	31,491

ンプによって地下水を汲み上げ、灌漑に利用している圃場が多く存在する。

3. モデル概要

本モデルは洛東区を1グリッド200m×200mにメッシュ分割し、各グリッドにより以下の地下水流動モデルと涵養タンクモデルを適用することで地下水位を算出する。以下にそれらを紹介する。

3.1. 地下水流動モデル

基盤となる地下水流動モデルは、不圧地下水を対象とした2次元平面差分モデルである。モデルの支配方程式は図3に示した $\Delta x \times \Delta y \times \Delta h$ からなるコントロールボリュームに関する連続の式と、Darcyの法則を組み合わせたことにより得られる。モデルの支配方程式、境界条件を表2に示す。支配方程式を空間方向へは中心差分、時間方向においては無条件に安定であるClank-Nicholson法により差分近似することで、未知数である次の時間ステップの地下水位 h_{t+1} に関する連立式が節点数得られる。得られた連立方程式の解法にはSOR法を用い、反復計算を行うことで各地点の地下水位を求める。涵養、排水は水面上部から直接供給・排水される。排水量の計算は、排水路底標高より地下水位が高いとき、その差に排水路密度と透水性を考慮に入れた排水路係数 k_d を乗じた量が排水されるとする。各グリッドの間の透水係数 k 、および帯水層厚 $h-b$ はそれぞれ調和平均、幾何平均により決定される。

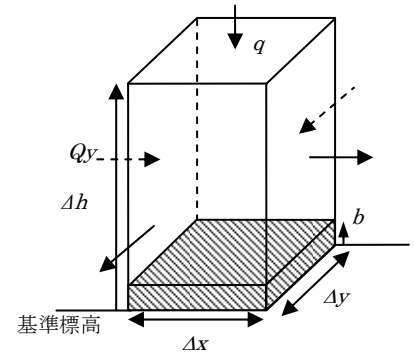


図3 地下水流動モデル

表2 支配方程式と境界条件

・支配方程式	
$n_e \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x (h-b) \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y (h-b) \frac{\partial h}{\partial y} \right) + q$ (1)	
n_e :有効間隙率, h :地下水位(m), b :不透水層標高(m)	
k :透水係数(m/d), q :涵養・排水(m/d)	
・境界条件	$h(x, y) = z(x, y)$ (2)
・内部境界	$h(x, y) = z(x, y)$ (3)
	$q_{drain} = k_d (h - h_{drain})$ (4)
$Z(x, y)$:境界水位(m), q_{drain} :排水量(m/d)	
k_d :排水路係数, h_{drain} :排水路標高(m)	

3.2. 涵養タンクモデル

地下水流動モデルにおける涵養量 q については、不飽和帯の水分移動をタンクモデルにより再現することで求めた。タンクは二段とし、タンク一段目は不飽和帯を現す。タンク一段目の水位 h_{T1} は降水(P)、灌漑量(IW)、蒸発散量(ET)、深部浸透量(S)の収支によって変化する。タンクの限界貯水量を各節点の圃場容水量と不飽和帯の厚さの積とし、降水や灌漑によりこの限界貯水量を超えた余剰分を深部浸透量として、タンク二段目へ供給されると考える。二段目のタンクでは水位 h_{T2} に減衰係数を乗じた量が地下水流動モデルにおける q として算出され、残りはタンク内に貯留される。蒸発散量の算定にはまず計器蒸発量にPan係数 k_p を乗じた基準蒸発量を求める。その後、水分ストレス係数 k_s を乗じて実蒸発散量を推定する。本モデルでは、 h_{T1} が蒸発散に影響を与える

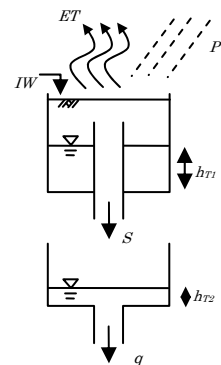


図4 涵養タンクモデル

表3 涵養タンクモデルの水収支

・一段目タンク		実蒸発量の推定	
$\frac{dh_{T1}}{dt} = (1-\alpha)P(t) + IW(t) - ET(t) - S(t)$ (5)		$ET(t) = k_s k_c k_{pan} E_p(t)$ (7)	
h_{T1} :一段目タンク内水位(mm), $IW(t)$:灌漑水量(mm)		$ET(t)$:実蒸発散量(mm), k_s :水分ストレス係数,	
$P(t)$:降水量(mm), $S(t)$:深部浸透量(mm), α :流出係数		k_c :作物係数, k_p :Pan係数, $E_p(t)$:Pan蒸発量(mm)	
・二段目タンク		$\begin{cases} h_{T1} > FC - RAM & k_s = 1.0 \\ h_{T1} \leq FC - RAM & k_s = \frac{h_{T1} - WP}{FC - RAM - WP} \end{cases}$ (8)	
$\frac{dh_{T2}}{dt} = (1-\beta)(S + h_{T2})$ (6)		$RAM = p(FC - WP)$ (9)	
h_{T2} :二段目タンク内水位(mm), β :減衰係数		FC :圃場容水量(mm), RAM :生長有効水分量(mm),	
		WP :しおれ点(mm), p :生長有効水分係数	

とする。 h_{Tl} が生長阻害水分点以上のときは水分ストレス係数を1とし、生長阻害水分点から永久しおれ点までの間を線形に0まで変化させる。涵養タンクモデルの水収支を表3に、涵養タンクモデルの概念図を図4に示す。

3.3. 灌漑スケジュールの組み込み

本モデルに灌漑スケジュールを組み込むにあたり、作物に応じた灌漑水量を決定する必要がある。グリッド1つ1つには農地と非農地が混在しているため、作物ごとの各村における各作物の灌漑水量をその栽培面積割合により重み付けすることで算出し、一律に灌漑することとした。そのため灌漑スケジュールの決定には、各作物の灌漑水量およびタイミングと各村の栽培面積が必要となる。各作物の灌漑水量とタイミングは、穀物に関しては「洛惠渠誌」(陝西人民出版社, 1995)より引用し、果樹については現地での聞き取り調査を基に決定した。表4に季節別に作物別の灌漑水量を示す。各村の作付面積に関しては現地調査において収集した灌漑計画(2008年度)に記載されている各村の作付面積(表1)を用いた。また、灌漑水量は以下の式で求めた。

$$IW_V = \sum (IW_C \times \frac{A_C}{A_V}) \quad (11)$$

ここで、 IW_V は各村に与える1回の季節別の灌漑水量(mm)、 IW_C は各作物の1回の灌漑水量(mm)、 A_C は各村における各作物の作付面積(ha)、 A_V は各村の総面積(ha)である。さらに、8つの村への灌漑水量の総和と洛東区への配水量との誤差が1割以下に収まるよう灌漑水量を調整した。表5に算出した灌漑水量を示す。

3.4. 揚水の組み込み

現地調査にて、ポンプによる地下水の揚水量を計測したところ約4 L/sであった。聞き取り調査によるとポンプの1日の稼働時間は約2時間であり、2時間で約28 m³の揚水を行なうことになる。この量を1グリッド当たりの水深に換算すると約0.7 mmとなる。また正確な揚水のタイミングや使用頻度等の情報は収集できなかったが、「洛惠渠誌」によるとポンプによる灌漑水の汲み上げを行うのは春と冬であることが記述されている。そこで今回は、春と冬の期間において、1日おきに1 mm/dの揚水を行うものとして本モデルに組み込んだ。

4. 結果と考察

2002年1月1日から2006年12月31日の期間を対象に日単位でモデル計算を行った。計算に必要な入力パラメータは、各節点における透水係数、有効間隙率、不透水層標高、地表面標高、圃場容水量、しおれ点、初期水分量、排水路係数、減衰係数、Pan係数、生長有効水分量であり、入力データは灌漑水量、揚水量、降水量、計器蒸発量が必要であり、出力は各節点の地下水位である。地下水流動モデルの透水係数、有効間隙率およびタンクモデルの圃場容水量、しおれ点と初期水分量については灌区内の土壌と土地利用から8つの土性に分けて与えた。なお、各節点における地表面標高と不透水層標高をkriging法により観測井の標高とボーリング資料の値をそれぞれ内挿・外挿することで与えた。

4.1. 計算結果の検証

計算結果の検証のため、洛東区内の10箇所の観測井(図1)における計算値と観測値との平均絶対誤差、平均相対誤差、二乗平均平方根誤差をそれぞれ算出した。検証地点は対象地区全体の地下水位が把握できるように選定した。その結果を表6に示す。地下水位の低い地点の一部(No. 20, No. 76)においては誤差が大きいものの、その他の地点ではいずれにおいても平均相対誤差が0.25以下であり、灌区全体の傾向として精度よく地下水の変動を再現できているといえる。

表4 作物別・季節別の灌漑水量

春(3-5月)		夏(6-8月)		冬(11-12月)	
作物	灌水量(mm)	作物	灌水量(mm)	作物	灌水量(mm)
小麦	90	トウモロコシ	140	小麦	50
綿花	60	綿花	90	綿花	0
果樹	120	果樹	75	果樹	120
野菜	60	野菜	60	野菜	60

表5 算出した灌漑水量 (mm)

	春(3-5月)	夏(6-8月)	冬(12-2月)
Xiqitou (1)	79	66	82
Longmen (2)	57	28	74
Anren (3)	33	6	50
Xuzhuang (4)	86	21	77
Fencun (5)	73	82	49
Niaoqiao (6)	52	37	49
Poge (7)	68	60	68
Dihu (8)	72	44	54

4.2. 地下水位の変動と涵養機構

本モデルにおける地下水位の変動と涵養機構について考察する。図5に地下水位の高い地点(No. 2)、図6に地下水位の低い地点(No. 64)における地下水位の変動と地下水涵養を示す。図5を見ると、地下水の毛管上昇により土壌の塩類化が進行する可能性の高い3m付近の地下水位の変動傾向をうまく再現することができている。計算値と観測値との平均絶対誤差, 平均相対誤差, 二乗平均平方根誤差はそれぞれ0.369, 0.128, 0.532と小さく, 比較的良好な結果が得られた。

しかし, 図5を見ると, 本モデルにおける地下水位の変動では, 灌漑直後に地下水の涵養が生じやすくなっていることがわかる。通常ならば降水および灌漑が1日で地下水位に到達することはないが, 本モデルにおいては, 涵養タンクから地下水位涵養が起こるまでの時間差を考慮していないため, 1回の灌漑の直後に地下水への涵養が起こっている。

一方, 地下水位の低い地点(図6)においては, 2003年8月下旬~10月の連続的降雨時以外にほとんど涵養が起こっていない。これは涵養タンクの限界貯水量を圃場容水量と不飽和帯の厚さの積で表現したことにより, 限界貯水量が高地下水位地点のそれより大きく算出され, 灌漑および通常降雨による涵養が生じにくくなったためである。

5. おわりに

本研究では2次元地下水モデルの改良として, 現地調査において収集した農地・水利用に関するデータを基に, 灌漑スケジュールと揚水利用を本モデルに組み込んだ。これにより村ごとの灌漑・揚水スケジュールの変更が可能になった。今後, 詳細な灌漑・揚水に関する情報を組み込むことで, モデルの精緻化が可能になる。また, モデルのさらなる機能向上のためには, 圃場の年間の灌漑スケジュール, 灌区内の配水パターン, 村ごとのポンプの利用密度および頻度などの農地・水利用に関する情報の把握が必要である。

本モデルにおける地下水位の変動と涵養機構について考察した結果, 地下水の毛管上昇により土壌の塩類化が懸念される地下水位(3m)付近においては精度よく地下水位の変動を再現できたが, 地下水への涵養が起こるまでの時間差を考慮していないため, 1回の灌漑直後に地下水への涵養が起こっていることが明らかとなった。今後の課題としては地下水涵養への時間差を設けるため, 現在2段である涵養タンクモデルの不飽和域に根群域を追加する等の更なる改良が必要である。また, 地下水位の低い地点に関しては, 地下水への涵養がほとんど起こらないことが確認された。

<参考・引用文献>

1)福本群(2008):灌漑が地下水挙動に及ぼす影響の評価に関する研究, 2008年農業農村工学会講演要旨集 pp.928-929, 2)洛恵渠誌編纂委員会(1995):洛恵渠誌, 陝西人民出版社, P.159.

表6 検証地点における計算値と観測値との誤差

Well No.	平均絶対誤差 (MAE)	平均相対誤差 (MRE)	二乗平均平方根誤差 (RMSE)
2	0.369	0.128	0.532
20	2.684	0.161	5.120
29	0.911	0.054	1.235
45	0.185	0.252	0.217
50	0.249	0.176	0.316
64	1.805	0.235	1.860
70	0.278	0.110	0.329
76	3.907	0.418	3.912
97	0.740	0.031	1.337
99	0.275	0.013	0.306

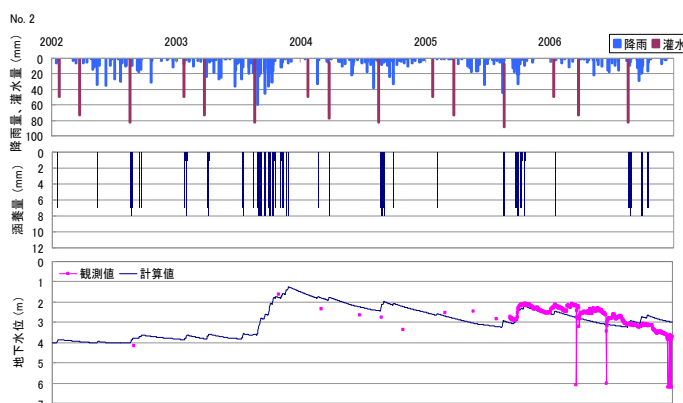


図5 高地下水位の変動と涵養

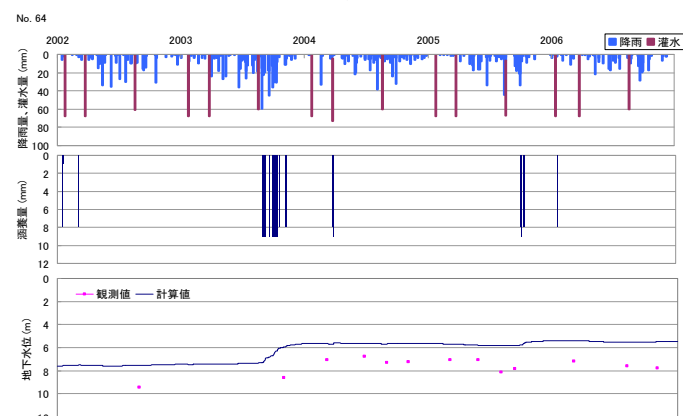


図6 低地下水位の変動と涵養