

キーワード：HYDRUS, 地下水深, 塩類集積, 空間分布

1. はじめに

乾燥地・半乾燥地において不適切な灌漑による塩類集積が発生している。対象地区である中国・洛惠渠灌区でも、灌漑システム完成当初に過剰な灌漑を行ったために地下水位が上昇し、塩類集積が起こった地域である。洛惠渠灌区は黄土高原南東部に位置する半乾燥地域で洛河を境に洛東、洛西に分かれている(図1)。主要作物はリンゴやナツメなどの果樹、綿花、トウモロコシ、小麦で畝間灌漑とボーダー灌漑が使用されている。灌漑水は洛河から取水しており、補助的に地下水を使用する。1970年代に排水システムが確立されたことにより、塩類集積の進行は緩和したがいまだ予断を許さない状況が続いている。灌区が抱える問題点として農地の塩類化、低い灌漑効率、維持管理費の高騰が挙げられる。本研究では、洛惠渠灌区の地下水位とその水質の分布を見ることで灌漑水に対する適性を調べるとともに、HYDRUS-1Dを用いて圃場での水分移動シミュレーションを行うことによって、灌漑が地下水に与える影響について考察する。

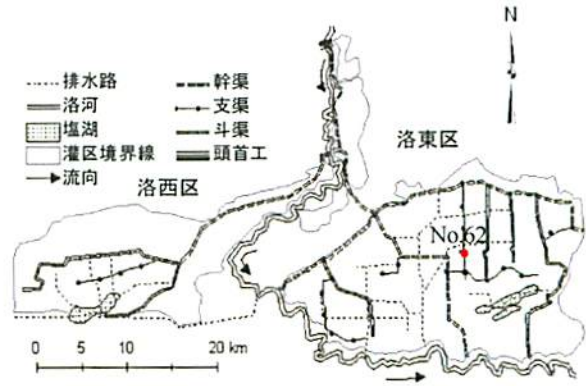


図1 洛惠渠灌区概要

2. 地下水挙動と水質分布

洛惠渠灌区の洛東地区(32,000 ha)(以下灌区と呼ぶ)を対象として、点在する井戸の地下水深(ここでは地表から地下水面までの距離)、電気伝導度(EC)、pH、陽イオン( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ )、陰イオン( $\text{F}^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^{2-}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ )をそれぞれ計測し、その分布と経年変化を調べた。

2.1 地下水深の空間分布

図2と図3はそれぞれ2004年3月、2007年3月の地下水深の空間分布を表したものである。地下水深が5mよりも浅い井戸が灌区中央部に集中しており、その周囲に地下水深5~10mの井戸が散在している。灌区では北部から南部へと地下水が流動することがわかっており、灌区中央部の地下水深が浅いのは地下水流動が緩やかであるためと考えられる。また、両図から経年変化を見ると2007年3月は地下水深が増加していることから、地下水位は低下傾向にあると思われる。

2.2 ECの空間分布とその経年変化

図4と図5はそれぞれ2004年3月のECの

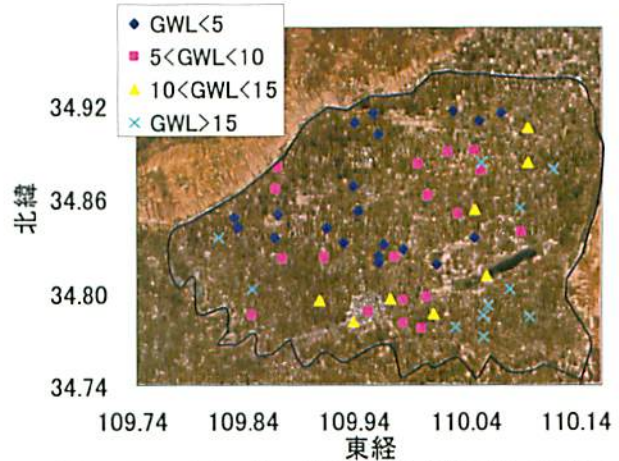


図2 2004年3月の地下水深(GWL)空間分布

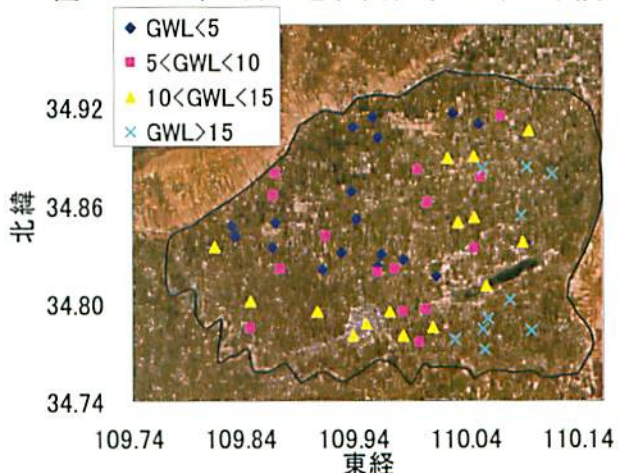


図3 2007年3月の地下水深(GWL)空間分布

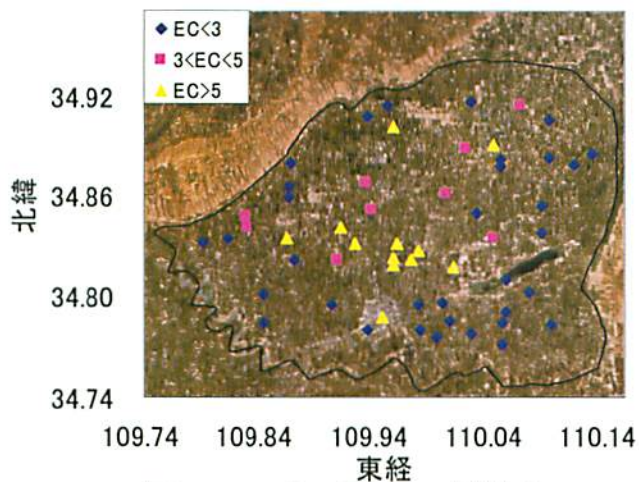


図4 2004年3月のEC空間分布

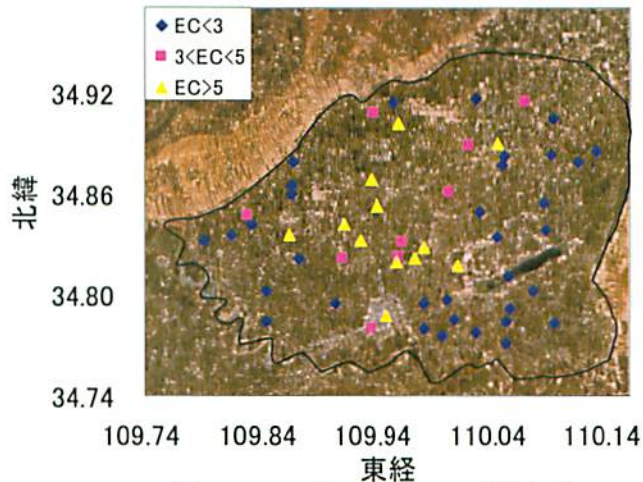


図5 2007年3月のEC空間分布

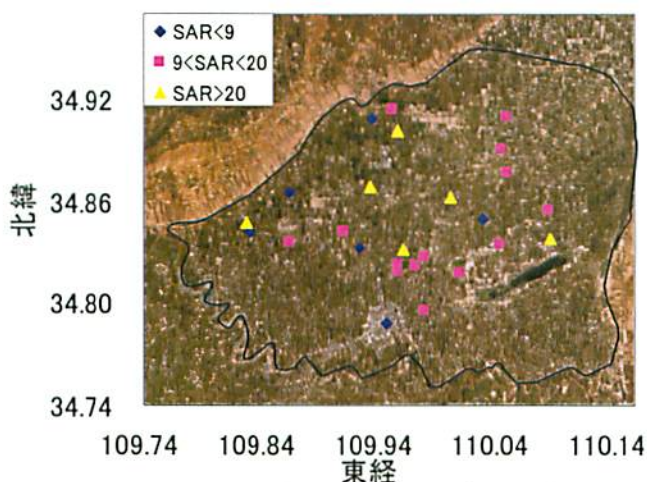


図6 2004年3月のSAR空間分布

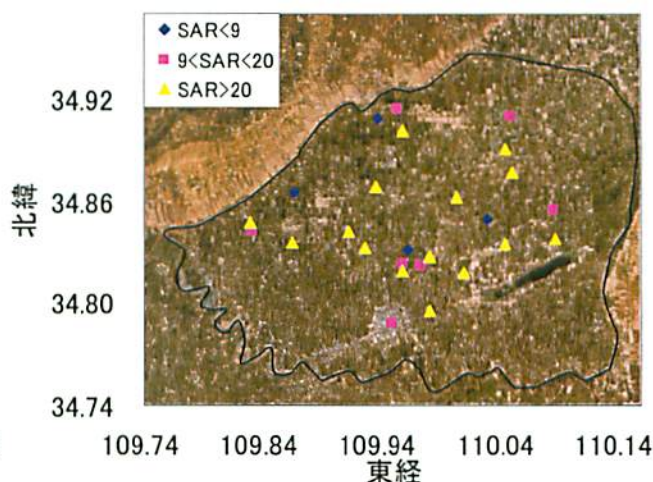


図7 2007年3月のSAR空間分布

空間分布, 2007年3月のECの空間分布を示している。図4, 図5から北部及び中央部の地下水ECが高く, 南部ではECが低い傾向にあることがわかる。また, 特にECの高いEC>5の井戸は灌区の中央部に集中している。このことから, 灌区中央部では灌漑に地下水を使用するのは困難と考えられる。経年変化を見ると, ある程度変化は見られるもののさほど大きな変化はなかった。

### 2.3 SARの空間分布と経年変化

2004年3月の地下水のSARの空間分布を図6に, 2007年3月のSARの空間分布を図7にそれぞれ示す。SARとは灌漑水の水質指標の1つで $Mg^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$ に対する $Na^+$ イオンの割合である。SARが高い地下水を灌漑に使用した場合, 土壌のソーダ質化をひきおこして土壌の通気性や透水性が低下する恐れがある。FAOの灌漑水水質基準ではSARは9未満が望ましいとしている。SARは下記の式で求められる。

$$SAR = Na^+ / \{ (Ca^{2+} + Mg^{2+}) / 2 \}^{1/2} \quad (1)$$

ここで $Na^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ の単位はmeq/Lである。図6, 7から灌区のSARは全体的に高いことがわかる。また, 経年変化をみると2007年3月のほうが2004年3月より全体的にSARが高くなっているのが見てとれる。この傾向が続くと灌区で土壌のソーダ質化が深刻化する可能性がある。

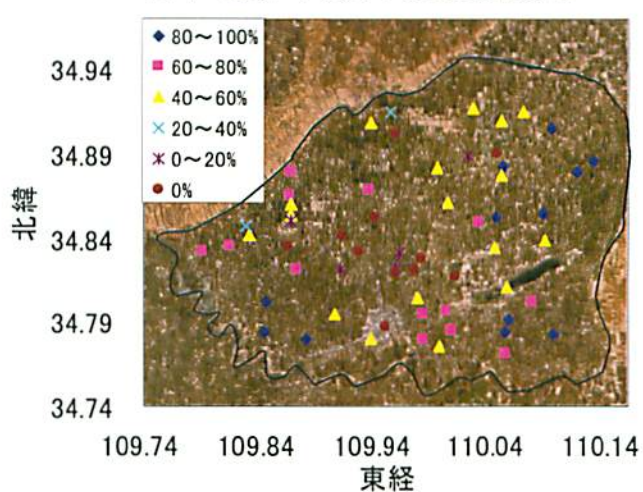


図8 リンゴに対する地下水の適性分布

## 2.4 リンゴに対する適性分布

灌区では近年リンゴやナツメなどの果樹の栽培面積が増加している。しかしリンゴの耐塩性は低く、EC の高い水を灌漑水として使用した場合収量の低下が予想される。そこで、灌区の地下水を使用した場合どの程度の収量が見込めるかを図 8 に示した。図 8 から、80~100 %の収量が見込める井戸は全体の 5 分の 1 程度であり、EC が高い地下水を持つ井戸が多い灌区中央部では、地下水を灌漑に使用した場合ほとんど収量は望めないと考えられる。このため灌区中央部ではリンゴなどの耐塩性の低い作物を栽培する場合、河川水のみを使用する必要があると考えられる。

## 2.5 地下水深と EC の関係と経年変化

図 9 は 2004 年 3 月と 2007 年 3 月の地下水深と EC の関係を表したものである。FAO の灌漑水の水質基準では、EC が 3 未満であることが望ましいとされている。図 9 から、両年ともに地下水深が 10 m より浅い井戸で EC が高いことが見て取れる。これは地表下 10 m 以内の下層土に含まれている可溶性塩類の溶出、上流からの高 EC を持つ地下水の流入および地下水流動が緩やかであることが原因と考えられる。また、両年のグラフにほとんど差が見られないことから、経年変化はほとんどないことが分かった。

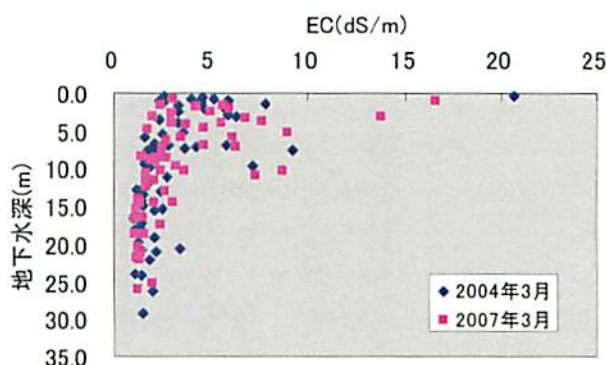


図 9 地下水深と EC の関係と経年変化

## 3. 圃場での水分移動

灌区の灌漑は、大量の水を少ない回数与えるという方法なので浸透損失は大きく、多量の灌漑水が下方に流れ込む。この際に土層中の可溶性塩類も流出していると考えられ、実際に図 9 から地下水深が浅い箇所で EC が高いことが分かっている。しかし、灌漑水がどの程度の深さまで浸透するかは明確には分かっていない。そこで HYDRUS-1D を使用して灌区の圃場を対象に数値実験を行い、水が土層中をどのように移動しているかを調べた。

### 3.1 解析方法

HYDRUS-1D は US Salinity Laboratory (米国農務省塩類研究所)において、開発された 1 次元土中水分・塩分移動予測用プログラムである。HYDRUS-1D には水分移動、溶質移動、熱移動、二酸化炭素輸送など様々な機能があるが、本研究では水分移動のみを扱う。土中の水分移動には van Genuchten - Mualem モデルを用い、水分移動パラメータは土壌の粒径組成から Neural Network Predictions を用いて推定した。その結果を表 1 に示す。上端境界条件に大気境界条件を与え、下端境界条件を地下水面とした。計算期間は 2007 年 1 月 1 日から 2007 年 12 月 31 日までで、最大時間刻み幅を 1 日とした。地質図から地表下 10 m までは黄土であり、図 9 から EC が高い値を示したのは地下水深が 10 m までであるため、土層は 10 m の単一層とした。定常状態の解を求めるために、2007 年 1 月 1 日の蒸発量、地下水深を境界条件として含水量が変化しなくなるまで計算させることによって求め、これを初期状態の水分分布とした。数値実験をするに当たって、灌漑する時期と灌漑水量を決定する必要がある。本実験では根の吸水プログラムを使用していないため、根の吸水による蒸散量が考えられていない。よって通常の灌漑をした際の水分移動とは差異が生じる。そこで、綿花の植え付け前の裸地に灌水する 3 月下旬を対象に水分移動シミュレーションを試みた。

表 1 水分移動パラメータ

$\theta_r$	$\theta_s$	$\alpha$	$n$	$K_s$	$l$
0.0661	0.4097	1.07	1.4757	0.0831	0.5

$\theta_r$ : 残留体積含水率  $\theta_s$ : 飽和体積含水率

$\alpha, n$ : フィッティングパラメータ  $K_s$ : 飽和透水係数(m/day)

$l$ : 間隙結合パラメータ

### 3.2 数値実験結果

図10は井戸番号62番近くの圃場を対象にした数値実験の結果である。図の青線が灌漑を行った日の水分分布、赤線が12月31日の水分分布である。図から日数が変化しても下層の水分分布はほぼ変化してないことが分かる。これは土層の透水係数が非常に低く、灌漑水が下層へ移動していないため、地下水へ流入する水量が極めて少量になったと考えられる。また、地下4~8m付近でわずかではあるものの体積含水率が

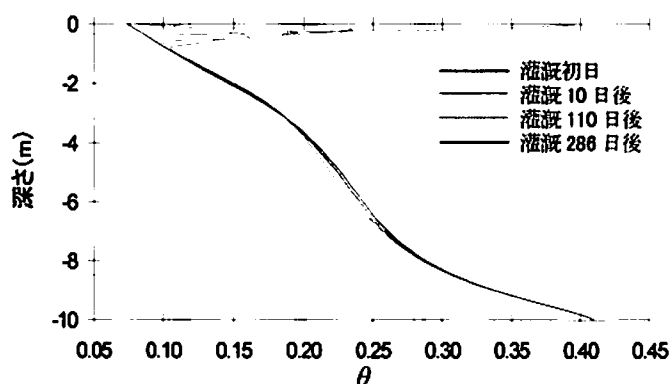


図10 体積含水率の分布

変化しているが、それより下層では変化していない。このことから、おおよそ深さ8m付近が灌漑による浸透水が影響する限界の深さではないかと考えられる。以上のことから、灌漑が地下水に与える影響を考えると、比較的浅い水深であるならば多量の灌漑水が地下水に流出し、それに伴って土層中に含まれている可溶性塩類も溶出するため、地下水の水質が悪化すると考えられる。しかし、深さ8mよりも深く地下水が流れている場合においては、その水質にほとんど影響を与えないと考えられる。本実験では垂直移動のみを考えているため、水の水平移動は考慮していないが、実際の圃場では水平方向も無視できない。したがって、表層部の水はこの結果よりも早く移動することが予想され、実際の灌漑に伴って影響される限界深さはもう少し浅くなる可能性がある。これを明らかにするためには2次元の水分移動シミュレーションが必要と考えられる。

### 4. まとめ

本研究では灌区の地下水深と水質特性を調査しその分布と経年変化を示した。また、栽培面積が増加しているリンゴに対する地下水の灌漑水に対する適性分布を明らかにした。更に、灌漑が地下水に与える影響を考えるためHYDRUS-IDを使用して数値実験を行った。その結果、灌区の地下水深が若干ではあるが低下する傾向にあることが分かった。ECについては目立った経年変化はないものの灌区の中央部に高ECの地下水が集中していた。また、地下水のSARは灌区全体で高く上昇傾向にあることが明らかになった。この地下水を灌漑に使用した場合、土壌のソーダ質化の危険があり注意を要する。リンゴに対する灌漑水としての適性が良好な井戸は灌区全体の5分の1程度で、灌区中央部では地下水利用を前提とする栽培は困難なことが分かった。また、地下水深が10mよりも浅い地下水のECは高い傾向にあり、この原因として比較的地下水深が浅い地点では可溶性塩類の溶出が考えられる。地下水深が10mより深い井戸の低ECは上流部からの流入および緩慢な地下水流動が原因と考えられる。本研究では水分移動は垂直移動のみとし、根の吸水を考慮に入れないで数値実験を行った。したがって、今後はこの2点を考慮した水分移動シミュレーションを行うことで、実際に灌漑を行った際の水分移動を明らかにする必要があると考えられる。

### 参考文献

- (1) D. Rassam, J. Simunek, and M. Th. van Genuchten (2004) : HYDRUS-2Dによる土中の不飽和流れの計算, 農業土木学会土壌物理研究部会 HYDRUS グループ, pp. 1.1 - 1.53
- (2) FAO (1989) : Water quality for agriculture, FAO Publication No.29 pp. 7 - 9
- (3) 春田朋子 (2006) : 中国洛恵渠灌漑地区における土壌塩類集積とその要因解析, 平成17年度鳥取大学大学院修士論文, pp. 51 - 55
- (4) 福本群 (2008) : 灌漑が地下水挙動に与える影響の評価に関する研究, 平成20年度農業農村工学会講演要旨集, pp. 928 - 929