

# 中国・黄土高原チェックダム農地における塩類集積と地下水位変動特性に関する研究

水利用学分野 東條 雅行

キーワード：塩類化メカニズム, 土壌凍結, HYDRUS-1D

## 1.はじめに

中国・黄土高原は黄河中流域に位置し、世界で最も水食の被害が深刻な地域の一つである。黄土高原での水食の60~90%がガリ(侵食谷)内から発生しており、このガリにおける土砂流出を防止する最も効果的な工学面での対策としてチェックダムシステムがある<sup>1)</sup>。このシステムで建設後初期のダムは砂防、洪水調節や灌漑用貯水池として利用される。その後、土砂の堆積により平坦な土地が形成され、その土地は農地利用される。有機物を多く含む表層土が堆積するため形成されるダム農地は平坦かつ肥沃であり、斜面農地に比べて労働生産性と土地生産性が高い。しかし、ダム農地における塩類化の問題は顕在化しており、さらにその発生メカニズムはまだ明らかになっていない。

先行研究から、中国・陝西省子洲県曹峁(Cao Mao)ダム農地での塩類集積には、土性よりも地下水位が大きく影響することがわかっている<sup>2)</sup>。そこで本研究では曹峁ダム農地において塩類集積の現状を把握し、地下水位変動特性を解明してその要因を明らかにすることを目的とした。

## 2.研究対象地および調査概要

### 2.1 研究対象地

本研究では中国・陝西省子洲県の小河沟(Xiao He gou)・曹峁ダム農地を対象とした。対象地の年平均気温は9.3℃、年平均降水量は427.5 mmで半乾燥気候に属する。農地面積は36 haあり、天水農業でメイズ、ヒマワリが主に栽培されている。堤体より上流側1.6 kmの地点から上流端にかけて、塩類集積による耕作放棄地が確認されている。

### 2.2 調査概要

対象地の地下水位変動特性を明らかにするために、雨量計1基、地下水位観測井4本にロガー付水位計を設置して2009年9月から2010年9月までの降水量と地下水位を観測した。Fig.1に対象地と観測機器の設置位置の概要を示す。また降水に対する地下水位の応答を定量的に表すために、日ごとの地下水位変動量を目的変数とし、降水量を説明変数として重回帰分析を行った。さらに地下水位の上昇に対する降水の地中への縦浸透と、側方山腹斜面流出の影響を明らかにするためにHYDRUS-1Dによる土壌水分移動の数値実験を行った。

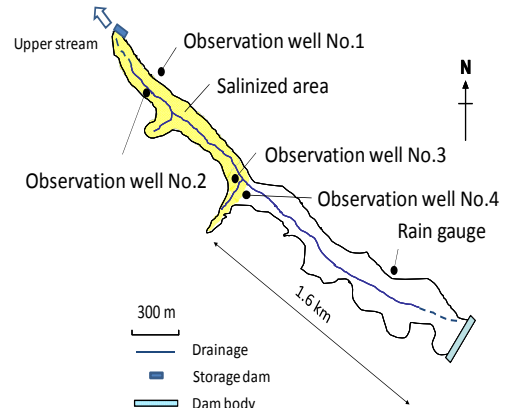


Fig.1 Outlines of Cao Mao dam farmland

耕作放棄地である堤体から1.6 km付近の塩類集積状況と季節変動を見るために、2010年の3, 6, 9月の調査で堤体から上流側1.9~1.3 kmの範囲において、40地点で表層と深さ50 cmの土壌を採取した。その土壌の飽和抽出溶液から電気伝導度(ECe)、pHeを測定し、ナトリウム吸着比(SARe)を算定した。さらに、そのSAReの値をUSDAが提唱する経験式<sup>3)</sup>に代入し、交換性ナトリウム率(ESP)を求めた。調査で明らかにした地下水位と塩類集積の季節変動から、塩類集積の発生メカニズムを考察した。さらに地下水位変動の観測結果と土壌分析結果から、降水による短期的な地下水位の上昇と下降が塩類集積に与える影響を調べるために、HYDRUS-1Dを用いて溶質移動の数値実験を行った。

## 3. 結果および考察

2009年9月から2010年9月までの降水量と地下水位変動の観測結果をFig.2に示す。2009年9月7日から12月13日までの降水量のデータは雨量計の観測結果を用い、2009年12月14日から2010年4月30日までは対象地から最も近い気象観測所の観測結果を用いた。なお、5月1日以降の降水量データは欠損している。地下水位変動データの欠損は地下水位が水位計の測定範囲を下回った期間があったためである。観測井No.4については2010年6月5日から観測を開始した。

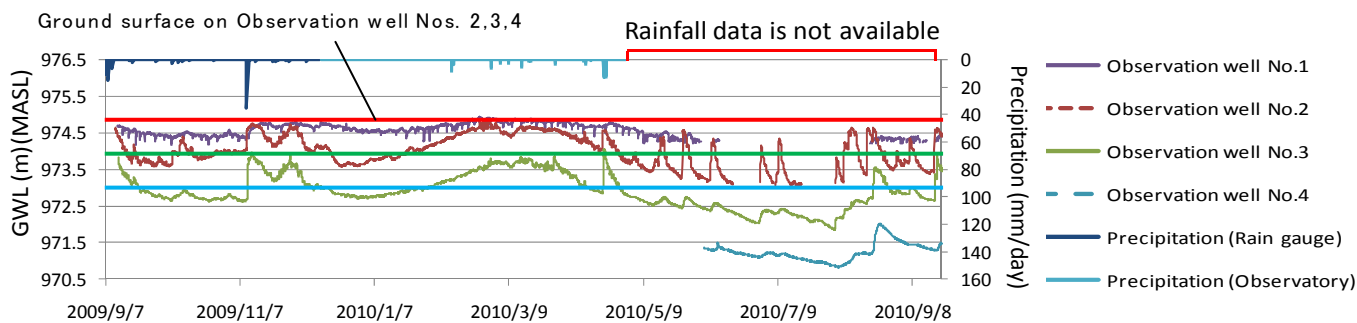


Fig.2 Fluctuations of groundwater level

Fig.2の結果から、長期的な地下水位変動特性として季節的な地下水位変動に着目して考察した。また、短期的な地下水位変動特性として降水に対する地下水位変動の応答に着目して考察した。さらに空間的な地下水位変動差を明らかにするために各観測井の地下水位変動を比較した。

### 3.1 季節的な地下水位変動特性

Fig.2に示す観測結果から、大きな降水がない2010年1月上旬から3月中旬に、観測井 Nos.2, 3の地下水位は緩やかに上昇し、3月下旬以降に下降する傾向が見られた。地下水位変動の測定結果と気温の関係をFig.3に示す。2009年12月下旬に日最低気温が $-20^{\circ}\text{C}$ 近くに達した後、地下水位の上昇傾向が確認された。また、気温が $0^{\circ}\text{C}$ を上回る日が多くなる3月下旬から、地下水位の下降傾向が見られた。これらの現象は、冬季の低温で上層の土壌が凍結する際に、排水路周辺の土壌も凍結するため、下層の未凍結の地下水流が堰止められ、地下水位が上昇したと考えられる。そして春季の気温上昇に伴う排水路周辺部の凍結土壌の融解により、地下水位下降の傾向が見られたと思われる。

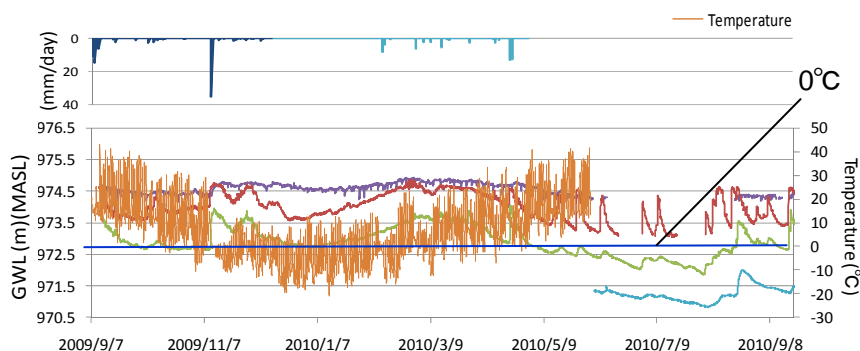


Fig.3 Fluctuations of groundwater level and temperature

### 3.2 短期的な地下水位変動特性

#### 3.2.1 降水に対する地下水位の応答

2009年11月10日に35.4 mm/dの降水があった。この降水時の30分ごとの地下水位変動と降水量をFig.4に示す。また、Table 1に降水の開始から地下水位の上昇がピークに到達するのに要した時間(ピーク到達時間)を示す。ピーク到達時間は観測井 No.1で164.5時間、No.2で55.0時間、No.3では

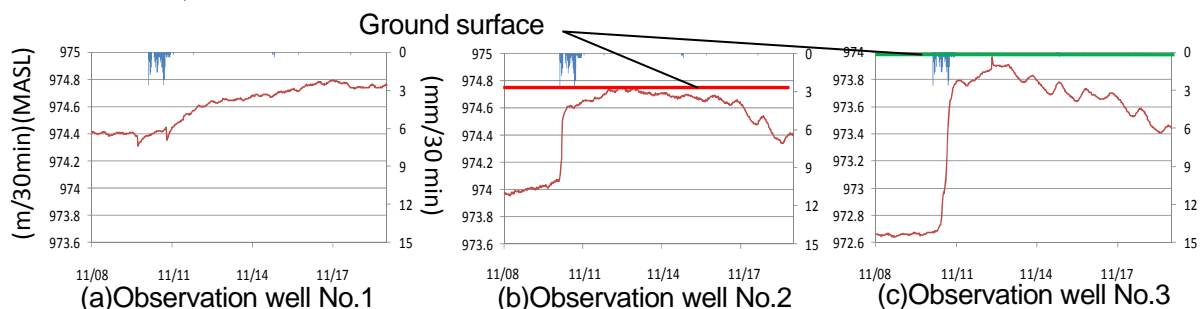


Fig.4 Fluctuations of groundwater level (2009/11/8-2009/11/18)

53.0時間であった。また、その地下水位の上昇幅はNo.1で0.40 m、No.2で0.67 m、No.3で1.29 mであった。観測井 Nos.2, 3の地下水位はほぼ地表面まで達した。これらのことより、対象ダム農地において大きな降水があった際の、地下水位上昇に要する時間は約2日間であることがわかった。No.1の地下水位上昇が大きく遅れたのは、地表面から地下水面までの距離が約13 m

Table 1 Response of GWL from the rain event

Well No.	Start of rain event	Peak of GWL rise	Required time (Hour)
1		2009/11/16 23:00	164.5
2	2009/11/10 2:30	9:30	55.0
3		7:30	53.0

と長く、降水が地下水面に到達する時間が長いと思われる。

次に、降水に対する地下水位の応答を定量的に調べるために重回帰分析を行った。2009年9月7日から12月13日までの日単位の地下水位変動量を目的変数とし、7日前までさかのぼった降水量を説明変数とした。その分析結果から、本研究対象ダム農地において、降水による地下水位上昇への影響は降水当日が最も大きかった。また、その影響はおよそ3日間継続することが示唆された。この結果は観測井 Nos.2, 3 におけるピーク到達時間とほぼ一致した。

### 3.2.2 HYDRUS-1D を用いた土壌水分移動の数値実験

2009年11月10日に降った降水 (35.4 mm/d) の前日までの現地条件を再現した後に、9日間にわたり地下水位への影響の数値計算を行った。計算結果を Fig.5 に示す。計算結果から、地下水面 (圧力水頭が 0 cmH<sub>2</sub>O の点) にはその影響は達していなかった。すなわち、数値実験では降水のみによる地下水位の上昇はほとんどなかったという結果が得られ、降水当日に地下水位がほぼ地表面まで上昇した観測井 No.3 の観測結果とは大きく異なった。

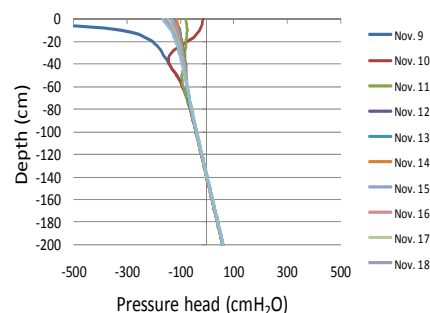
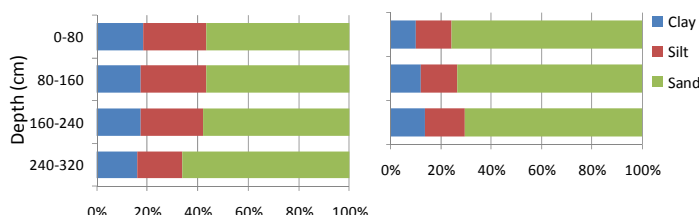


Fig.5 Result on the calculation of the water flow

このことから、曹峯ダム農地での降水による地下水位上昇には、降水の縦浸透以外の要因が大きく影響していると考えられた。また上流側に位置する観測井 No.2 と下流側に位置する No.3 のこの降水による地下水位の上昇開始はほぼ同時であった。これらのことから、曹峯ダム農地の地下水位の上昇には、降水時のダム農地側面の山腹斜面からの表面流出が大きく影響していることが示唆された。

### 3.3 空間的な地下水位変動差

Fig.3 で降水量のデータが欠損している 2010 年 5 月 1 日以降においても、降水が原因と思われる地下水位の一時的な上昇が確認された。さらに観測井 Nos.2~4 でその変動に大きな差が見られた。観測井 No.2 の地下水位変動の降水に対する応答は Nos.3, 4 に比べて大きかった。また観測井 Nos.3, 4 を比較すると、2010 年 8 月 5 日頃から 20 日頃までの地下水位の上昇幅は、No.3 ではおよそ 1.5 m であったのに対して、No.4 ではおよそ 1.0 m であった。このことから、耕作放棄地に設置した観測井 No.3 の地下水位は、耕作地に設置した観測井 No.4 の地下水位よりも上昇しやすい傾向が確認された。ここで、この地下水位変動差の原因の一つとして考えられる土性に着目した。観測井 Nos.3, 4 付近の土壌と、堤体から 2.5 km 上流地点の粒径分布を比較した。Fig.6 に各々の粒径分布を示す。粒径の区分は国際法に基づき行った。堤体から約 2.5 km 上流側の土性は観測井 Nos.3, 4 の地点よりも粗粒であった。ここで、観測井 No.2 が位置する堤体からおよそ 2.1 km 上流地点の土性が、堤体からおよそ 2.5 km 上流側の土性に近いと考えると、観測井 No.2 において降水が原因と思われる地下水位の大きな応答は、透水性が大きく粗粒な土性の影響によるものと考えられた。一方、観測井 Nos.3, 4 の土性を比較すると大きな違いは見られなかった。このことから、観測井 No.3 の地下水位が No.4 よりも上昇しやすい原因として、土性以外の地形的な要因が考えられた。



(a) Observation well Nos. 3,4 (b) At 2.5 km from the dam body

Fig.6 Grain size distribution

### 3.4 塩類集積の現状と季節的変動

塩類集積の現状把握を目的とした土壌サンプルの分析結果のうち、表層の E<sub>Ce</sub> の時間的変動に着目した。2010 年 3, 6, 9 月の表層の E<sub>Ce</sub> と堤体からの距離の関係を Fig.7 に示す。表中の赤線は塩性化の指標 (4 dS/m) を表す。結果から、耕作地である堤体から上流側 1.6 km までにはほとんどの地点で塩性化の基準値を下回る値を示した。一方、耕作放棄地である 1.6 km より上流側では基準値を上回る値が多く見られた。さらにそれらの値は 3 月から 6, 9 月になるにしたがって高くなる傾向が見られた。

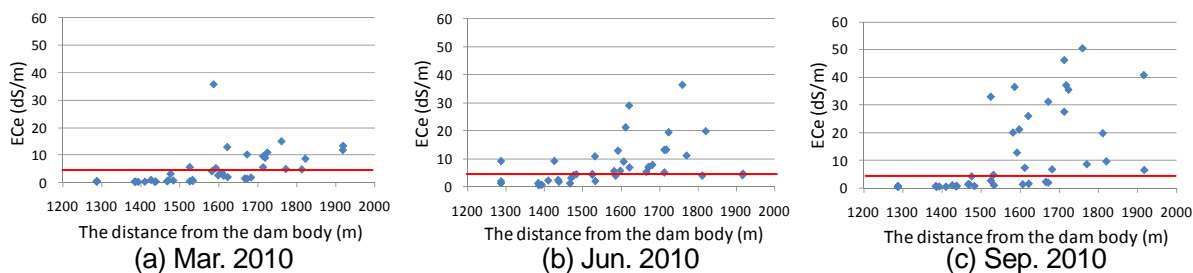


Fig.7 Ece values of the soil samples on ground surface

### 3.5 塩類集積発生のメカニズム

#### 3.5.1 地下水位の季節的変動による塩類集積

ダム農地における地下水位変動のモニタリング結果から、地下水位は冬季に上昇し、春季に下降する変動を示すことがわかった。また、この季節的変動には気温が大きく影響していることが示唆された。さらに、この地下水位変動特性と表層土壌の Ece の時間的な変動を合わせると以下のようなメカニズムが考えられた。まず、冬季の低温で土壌が凍結すると地下水位は上昇する。その後、春季に気温が上昇すると凍結していた土壌は融解し、さらに蒸発散量も増加することと高い地下水位から毛管上昇によって土壌水が表層に移動する。その結果、塩は地表面に集積し塩類集積が発生する。

#### 3.5.2 HYDRUS-1D を用いた溶質移動の数値実験

2009年11月10日に降った降水 (35.4 mm/d) による観測井 No.3 の地点における溶質分布の変化を初期条件とした。そこから、降水に伴って上昇した地下水位の低減過程を再現して、溶質移動後の分布を見た。本研究では塩化ナトリウム (NaCl) の移動を想定して実験を行った。計算結果を Fig.8 に示す。計算結果から、2009年11月10日に降った 35.4 mm/d の降水では、下方に流下した塩が地下水位の低減過程で毛管上昇によって地表面に集積するが、NaCl 濃度は地表面から約 60 cm までは降水前の初期濃度よりも低くなった。以上のことから曹峯ダム農地において、35.4 mm/d のような大きな降水による地下水位の上昇は表層への塩類集積を促進しないことが考えられた。

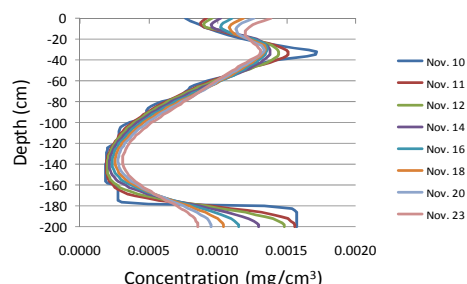


Fig.8 The result on the calculation of the solute transport

### 4.まとめ

本研究において、チェックダム農地の地下水位変動と塩類集積に関して以下のことがわかった。

- 1) 降水に対する地下水位の応答は速く大きい。その応答は降水当日が最も大きく、ダム農地側面の斜面からの表面流出を主とする浸透の影響が大きいことが考えられた。
- 2) 地下水位は冬季に上昇し春季に下降する傾向がある。この傾向は気温と密接に関係し、また春季の土壌の融解と蒸発散量の増加に高い地下水位が相まって、塩類集積が発生することが示唆された。
- 3) 塩類集積の発生過程は、冬季に凍結した土壌が春季に融解することと高い地下水位が相まって発生する毛管上昇と、夏季の高い蒸発散能による毛管上昇が主であると思われた。

曹峯ダム農地の地下水位上昇の主要因がダム農地側面の山腹斜面からの表面流出の浸透であることが示唆された。このことから、地下水位を下げる対策としてダム農地周囲への承水路設置が有効と考えられる。また、冬季の地下水位上昇を抑制する対策が必要である。今後の課題として、地下水位上昇の主要因であるダム農地側面の山腹斜面からの表面流出の浸透を定量的に明らかにすることと、地下水位観測を継続的に行い、雨季の降水と地下水位変動の関係を明らかにすることが挙げられる。

参考文献  
 (1) Zhang, T., (1993) : Discussion outline on Loess Plateau, Environment Press of China, p. 109 (2)上村江里佳 (2010) : 中国・黄土高原における持続可能なチェックダムシステム構築に関する研究, 平成21年度鳥取大学修士論文 (3)USDA(1954): Diagnosis and improvement of saline and alkali soils, Agriculture Handbook No.60 pp.29-30