

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

水利用学分野 上村 江里佳

キーワード：塩類集積，灌漑農業，HYDRUS

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である．特に黄土高原の水食の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．この技術の独自性は，建設初期は洪水調節や灌漑用貯水池として利用されるが，その後，土砂の堆積に従って平坦な土地が形成され，やがて農地として利用されることにある．さらに，ダム湖下流部に土砂が堆積した後は，上流に新たなダムを建設する．この過程を繰り返すことで，流域に連なったチェックダムシステムが形成される．このようにして形成されたダム農地は平坦かつ肥沃であるため，斜面農地と比べ作業効率も土地生産性も高い．しかしながら，ダム農地において塩類集積の問題は顕在化しており，しかも塩類集積が起こるメカニズムは明らかとなっていない．よって，本研究は，農地における塩類集積の問題に焦点を当て，持続可能なチェックダムシステム構築のあり方を農地利用の面から考察した．

2. 対象地区概要

本研究では，榆林溝と小河溝・曹峯ダム農地を対象とした．溝とは，日本で言う溪谷のようなものである．**図1**に榆林溝の概要，**図2**に曹峯ダム農地の概要を示す．榆林溝は流域面積65.8 km²，温帯半乾燥地域に属し，年間蒸発量1200～1800 mm，年間降水量450 mmであり，降雨は7月～9月に集中する．本流域では，1953年からチェックダム建設が始まり1992年までに大小合わせて121基のダムが建設されている¹⁾．また，小河溝・曹峯ダムは堤高48 m，堤頂長220 m，堤頂幅6 m，集水面積53 km²，貯水量849万 m³の大ダムである²⁾．1973年に建設され，2007年より農地として利用されている．農地面積は36 haであり，天水農業でトウモロコシを栽培している．また，ダム農地中央に位置する排水路は，自然の水の流れによって作られたものである．

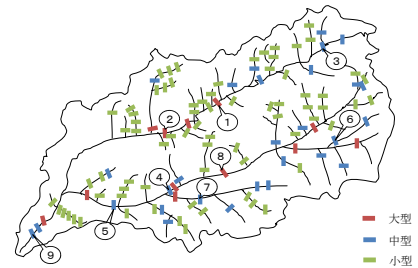


図1 榆林溝の概要

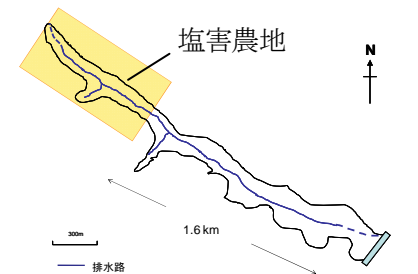


図2 曹峯ダム農地の概要

3. 塩類集積のメカニズムの解明

塩類土壌は集積する塩の量と組成により**表1**のように分類され³⁾，成因，防止，改良方法が大きく異なる．よって，農地の塩類集積の状態とメカニズムを明らかにすることが，適切な土壌管理を行うために必要となる．

表1 塩類土壌の分類

	正常土壌	塩性土壌	ソーダ質土壌	塩性ソーダ質土壌
土壌のECe(dS/m)	<4	≥4	<4	≥4
土壌のSARe	<13	<13	≥13	≥13
土壌のpHe	<8.5	<8.5	≥8.5	<8.5

3.1 溝における塩類集積

文献調査より，榆林溝をモデル溝とし，溝全体において塩類集積が生じやすい場所およびダムの規模の特定を行った．これらが特定されることで，ダム建設以前にダム農地での塩類集積対策を講ずることが可能になると考える．**図1**中の数字は**図3**中の数字に対応する．榆林溝では⑨が最下流に位置する．ここで，塩の移動は水の移動に付随することから，水の移動，およびその量に着目し，考察を進める．

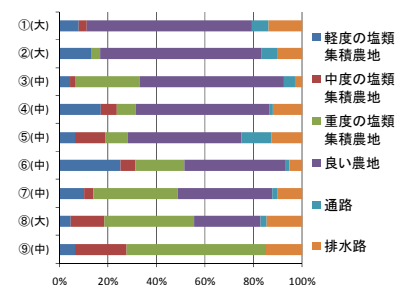


図3 ダム農地の状況

3.1.1 建設場所

上流側(③)にくらべ下流側(⑨)の方が塩類集積の被害が深刻なことが見て取れる．この理由として，下流側が上流側に比べ集水面積が広いいためダムへの水の流入が多いこと．また，上流側の原地盤は勾

配が急で水はけがよいのに対し、下流側は比較的平坦で水はけが悪いことが考えられた。

3.1.2 ダムの規模

同一水系にある④、⑤、⑧と別の同一水系にある①、②、③を比較した。先ほど述べた考察を踏まえると、下流側にある④、⑤の方で塩類集積がより深刻と考えられるが、上流側にある⑧の方が深刻であった。このことからダムの規模が大きいほどダムに滞留する水の時間が長くなるため塩類集積が起りやすくなるのではないかと考えた。しかしながら、①、②、③を比較した場合、下流にありかつ大型のダムである①、②の方が③より良好な農地であった。①、②の周囲にはダムが密集して建設されていることから、原地盤の勾配が急で土砂流出の多い地形であると推測される。よって、①、②のダム農地は、水はけがよく塩類集積が起りにくいと考えられる。つまり、原地盤の勾配が急な場所であれば大型のダムを建設しても塩類集積は起りにくいと推測できる。これらのことから、チェックダム建設地点の原地盤の勾配により、ダム築造後に形成されるダム農地の塩性化問題はある程度予測できると考えられる。

3.2 ダムにおける塩類集積

本研究では、曹岬ダムにおける農地の塩類集積の状態と塩類集積を起こすメカニズムを明らかにするために、土壌調査と地下水調査を行い、塩類集積に最も影響を与える要因を特定した。

3.2.1 土壌調査

2008年、2009年の現地調査にて土壌のサンプリングを行った。

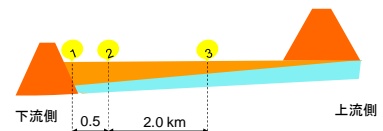


図4 サンプリング地点

図4はサンプリング地点を示している。なお、2009年の現地調査

では例年にない断続的な降雨に見舞われた。土壌の塩類集積状況

は、土壌飽和抽出溶液の電気伝導度 (ECe) と pH (pHe) およびナトリウム吸着比 (SARe) によって評価した。図5、6、7に2008年時の ECe, pHe, SARe の結果を示す。表1より、①は正常土壌、②は境界域にあるがソーダ質土壌、③は塩性ソーダ質土壌に分類される。また、2009年には同地点において Na^+ の多い土から Mg^{2+} の多い土に変わっていた。この理由として、調査時の降雨によるリーチングの影響が大きいと考える。次に、土性と塩類集積の関連性を見るために粒度試験を行った。図8は粒度試験の結果を示している。図8より、ダム農地形成過程において、粒径の細かい土粒子は堤体のそばまで運ばれ、粒径の粗い土粒子は上流側に沈澱していることがわかる。塩類集積は、砂質な土壌の方が粘質な土壌に比べ一般に起りにくいが、砂質な③周辺で塩類集積が生じていた。よって、曹岬ダム農地において塩類集積を起こす要因として土性の影響は少ないと考えられる。

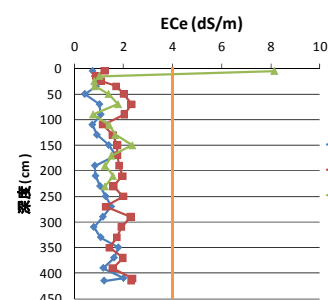


図5 ECe(2008年)

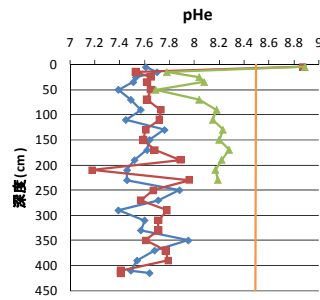


図6 pHe(2008年)

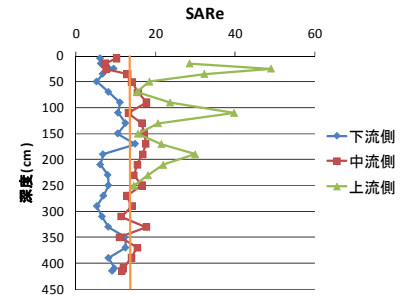


図7 SARe(2008年)

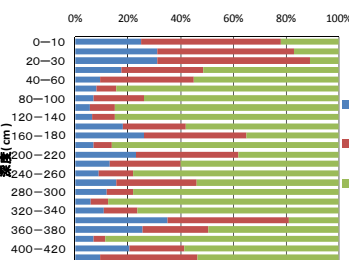


図8-a 下流側

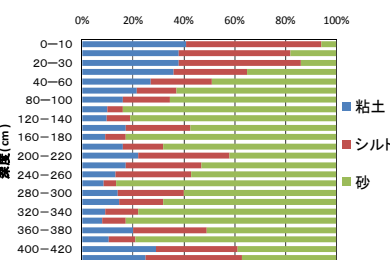


図8-b 中流側

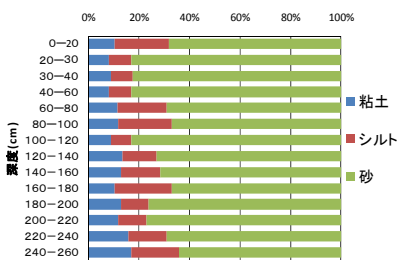


図8-c 上流側

図8 粒度試験の結果

3.2.2 地下水調査

2008年の調査において、地下水位 0.33 m の地点③にて塩類集積が確認でき、地下水位 4.2 m 以下の①, ②では確認できなかった。したがって、地下水位が塩類集積にもっとも大きな影響を与える要因と考えられる。ここで、地下水位は地表面から地下水面までの距離とする。また、上流側で地下水位が高い理由は、原地盤の勾配による。現在、天水農業が行われているが、より安定した収量を得るためには、灌漑の導入が不可欠となる。曹埠ダムにおける灌漑方法の一つに排水の再利用が考えられるため、この適否を考察した。表 2 に排水の水質および FAO によって提案された灌漑水として利用できる水質の範囲を示す⁴⁾。表 2 より、排水の Mg/Ca 比が基準より大きいことが分かる。この比が 1 より大きくなると作物がカルシウムを吸収できにくくなり、生育に大きな影響を与える。また、アメリカ農務省の灌漑水水質基準³⁾によると、この排水を利用する場合、EC 値から評価すれば、「透水性が良好な土壌ならば、耐塩性のかかなり強い作物に利用可能」である。また、SAR 値から評価すれば、「ほとんどすべての土壌および作物で利用でき、アルカリ障害の危険はない」と判断される。しかし、現地調査より曹埠ダム農地の水はけは悪く、透水性があまり良好でないことが分かった。よって、この水を利用する際は、耐塩性の強い作物を栽培するのが望ましいと考えられる。

表 2 排水の水質と FAO 基準

	排水の水質	灌漑水に利用できる範囲 (FAO)
EC(dS/m)	1.09-2.15	0-3
pH	8.05-8.06	6.0-8.5
Ca ²⁺ (meq/l)	2.15-2.78	0-20
Mg ²⁺ (meq/l)	12.7-34.6	0-5
Na ⁺ (meq/l)	20.5-35.0	0-40
SAR	7.36-8.16	0-15
Mg ²⁺ /Ca ²⁺	4.57-16.1	0-1

4. 塩類集積対策の提案

塩類集積を軽減するためには、一般に地下水位を地表面下 2 m 以下にする必要があり、その対策として適切な排水路の設置があげられる。本研究では、図 2 に示す塩害農地を対象とし、対策を行った際の排水能力と水分保持能力を数値実験により評価した。ここで、排水能力は地下水位の変化、水分保持能力は作物の根群域を想定した表層から 1 m までの圧力水頭の変化を用い、土壌水分が圃場容水量から生長阻害水分点の間にあるかどうかで評価した。

4.1 数値実験

数値実験には、HYDRUS2D/3D⁵⁾を用いた。HYDRUS2D/3D は有限要素法による分布型物理モデルであり、二次元不飽和土中の水分と溶質の移動予測プログラムである。本研究では水分移動の計算を、以下の手順で行う。

① 計算条件、各種パラメータの入力

計算期間を 2009 年 9 月 7 日~12 月 13 日とした。表 3 は土の水分移動パラメータである。残留体積含水率 (θ_r)、飽和体積含水率 (θ_s)、フィッティングパラメータ (α , n)、飽和透水係数 (K_s) は粒度試験の結果より決定される。降水量は曹埠ダム農地付近に設置した雨量計によるデータを用い、蒸発散量はブラネイ・クリドル法⁶⁾で算定した。

表 3 土の水分移動パラメータ

深さ(cm)	土性	θ_r	θ_s	α	n	K_s (cm/s)
0-20	砂質ローム	0.0466	0.4322	2.74	1.4669	1.07E-03
20-60	砂	0.0506	0.4495	3.64	1.7731	2.60E-03
60-100	砂質ローム	0.0498	0.437	2.65	1.4672	1.02E-03
100-120	砂	0.0527	0.4519	3.5	1.7666	2.49E-03
120-500	砂質ローム	0.0525	0.445	2.89	1.4956	1.17E-03

② 計算領域の設定

現地の状態を想定し計算領域を図 9 に示す。

③ 初期条件および境界条件の設定

まず、圧力水頭が変化しなくなるまで十分に長い時間の計算を行い定常状態の解を得た(手順 1)。次に、手順 1 で求めた計算結果を初期条件とし、現地の状態を再現した(手順 2)。その後、手順 2 で求めた計算結果を初期条件とし、計算条件の水分移動を計算させた。各々の境界条件を表 4 に示す。

	上部	下部	左側	右側	排水路
手順1	ゼロフラックス	浸出面	ゼロフラックス	ゼロフラックス	ゼロフラックス
手順2	大気境界	一定水頭 (4.67 mH ₂ O)	ゼロフラックス	ゼロフラックス	浸出面
手順3	大気境界	ゼロフラックス	一定水頭 (0 mH ₂ O)	ゼロフラックス	一定水頭 (0.2 mH ₂ O)

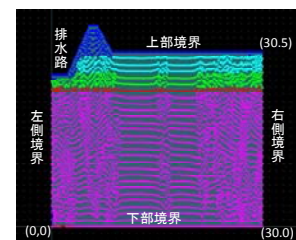


図 9 計算領域 (m)

4.2 適切な排水路の設置

排水路の深さと間隔を現状と変えることにより水分移動の評価を行った。対策は、Case1:排水路を掘り下げた場合(1 m, 2 m, 3 m)、Case2:排水路の間隔を変えた場合(排水路密度を現状の 1.5 倍, 2 倍, 3 倍とする)、Case3:排水路の深さを変え(1 m 掘り下げる)同時に排水路密度を変えた場合の 3 ケースを想定した。各々の対策による水分移動は 4.1 の手順に従って導き出した。

4.2.1 排水能力

図 10 に 4.2 で述べた対策を行った際の地下水位の変化を示す。現状のままでも時間をかければ地下水位は安全とされる 2 m まで下がる。しかし、対策を行うことで排水能力が高まり、目標とする深さまで地下水位を下げるのに要する時間も大幅に短縮されることが分かる。したがって、排水改良対策を実施すれば、排水能力が高まり、塩類集積の軽減につながると考える。

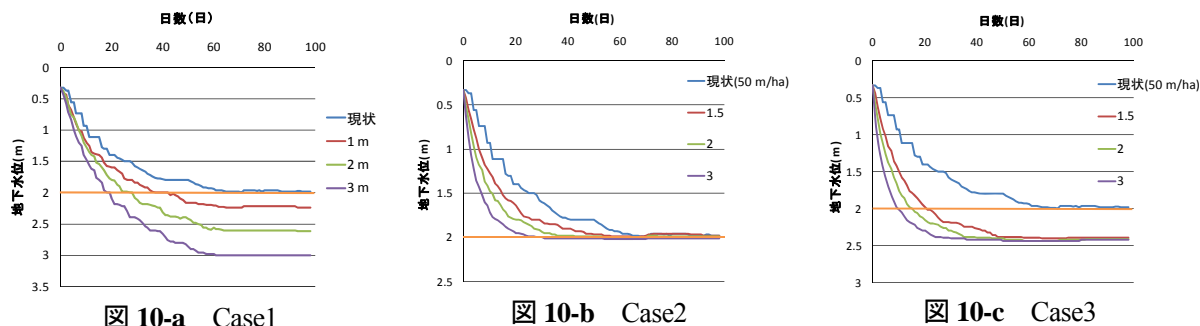


図 10 対策後の地下水位の変化

4.2.2 水分保持能力

Case1 で排水路を 3 m 掘り下げた場合において、表層から 1 m までの圧力水頭の変化を図 11 に示す。土壌水分は圃場容水量 (-0.31 mH₂O) から生長障害水分点 (-5.0 mH₂O) の間にあることが分かる。このことから、過剰排水による作物への水分ストレスは問題ないと言える。また、61 日目に 35.4 mm の雨が突発的に降った際も、湿害を起こすとされる最大容水量 (-0.01 mH₂O) ~ 圃場容水量の間に土壌水分は達していない。よって、対策後は乾湿害ともに問題ないと考えられる。

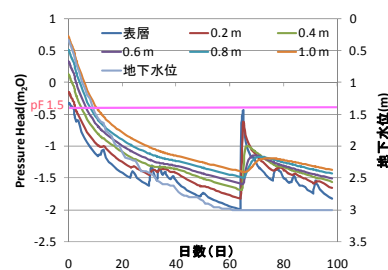


図 11 土壌水分の変化

4.3 数値計算のまとめ

2 m まで地下水位が下がるのに要する日数(日)を表 5 に示す。対策を行うことによって迅速な排水が可能

表 5 2 m まで地下水位が下がるのに要する日数(日)

現状	排水路の深さ			排水路密度			深さと密度		
	1 m	2 m	3 m	1.5倍	2倍	3倍	1.5倍	2倍	3倍
71	37	27	18	65	54	28	21	15	10

となること分かった。しかし、作物が正常な生育を維持する上で許容される湿潤状態の限界日数は把握できていない。今後は、作物の生育も考慮し、どの対策がベストであるのかを考える必要がある。

5. まとめ

本研究では、持続可能なチェックダムシステムの構築を目的に、ダム農地における塩類集積の問題に着目した。以下に明らかとなったことを示す。

- 1)ダム農地の原地盤の勾配を把握することにより、塩類集積の危険性のある程度評価することが可能である。
- 2)地下水位が塩類集積に対する主要因であることが分かった。よって、地下水位のコントロールが必要となる。
- 3)適切な排水路の設置により、地下水位がコントロールされ、塩類集積は軽減出来ると考える。

今後、継続的な水文観測を続けることにより、ダム農地の水収支、とりわけ地下水挙動を明らかにしていく必要がある。

参考文献

- 1)王建榮(2002): 坝地盐碱化防治探讨, 水土保持科研成果汇编, 黄河水土保持局绥德治理监督局, pp.216~218
- 2)高志林ら(1968): 子洲县志, 子洲县水利水保局
- 3) US Salinity Lab(1954): Diagnosis and improvement of saline and alkali soils, L.A. Richards, ed., Agriculture Handbook, No.60.USDA,
- 4) FAO(1985): Water Quality for Agriculture, FAO Irrigation and Drainage Paper No.29
- 5) 取出ら(2004): HYDRUS 2D/3D 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会 HYDRUS グループ
- 6) FAO(1970): Water Quality for Agriculture, FAO Irrigation and Drainage Paper No.24