

令和 4 年 5 月 6 日現在

機関番号：27101

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02278

研究課題名(和文)ハロファイトによる塩吸収と耐塩メタン発酵システムを用いた中央アジア塩害土壌の修復

研究課題名(英文) Soil remediation using halophytes and halophilic methane fermentation system for salinised area in Central Asia

研究代表者

安井 英斉 (Yasui, Hidenari)

北九州市立大学・国際環境工学部・教授

研究者番号：70515329

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,200,000円

研究成果の概要(和文)：ウズベキスタンの西端に位置するカラカルパクスタン自治共和国ヌクス市に設置した試験圃場で4種の好塩性植物 (*Atriplex nitens*, *Karekinia caspia*, *Kochia scoparia*, *Salsola dendroides*)を培養し、その生育ならびに体内に蓄積する塩の度合いを分析した。塩の蓄積は植物の生長がピークである9月頃に最大となり、いずれの植物も40-100 gNaCl/株で塩を蓄積していた。圃場の土壌はおよそ13 gNaCl/kg-乾重で塩を含有していたことから、これら好塩性植物を生育させることで、1株あたり3-6 kg-乾重土壌の塩を浄化できると予想された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

塩害土壌を生物学的に修復する手段のひとつとして、野生の好塩性植物を積極的に栽培することで土壌塩類の除去を検討した。塩害が顕著なウズベキスタンの農地で4種類の好塩性植物を試験的に栽培したところ、9月の最大生育期までに1株あたり40-100 gの塩を除去できることがわかった。このような実証実験は当地では初めてであったため、施肥や散水による植物生長と塩除去の促進を十分に明らかにすることはできなかったものの、おおむね1株あたり3-6 kg-乾重土壌の塩を浄化できると予想された。

研究成果の概要(英文)：Four kinds of halophyte species were cultivated in the test field at Nukus, Karakalpakstan, Uzbekistan (*Atriplex nitens*, *Karekinia caspia*, *Kochia scoparia*, *Salsola dendroides*). The salt removal peaked in September where the plant biomass was maximised. The species accumulated the salts with 40-100 g-NaCl equivalent per plant. *Atriplex nitens* seemed to have the highest salt uptake capacity among the examined species. The salt fraction of the soil in the test field was about 13.4 g-NaCl/kg-dry weight and categorised highly saline. From this, the plant-based soil removing capacity was calculated to be 3-10 kg-dry soil/plant/batch (= 40-100 g-NaCl/plant/batch / 13.4 g-NaCl/kg-dry soil).

研究分野：土木環境システム

キーワード：土壌修復 塩害 好塩性植物

1. 研究開始当初の背景

本研究の最終目標は、気候変動や不適切な灌漑によって世界で毎年 600 万 ha (九州と四国の面積に相当) もの塩害化が進んでいるアジア・アフリカ内陸部の乾燥地土壌を生物学的に修復できるシステムの提供にある。具体的には、土壌塩類を好んで蓄積する植物 (好塩性植物, ハロファイト) を嫌気バイオリアクタによってバイオマス分解することで塩を高濃度で分離回収するとともに、同時にバイオマス有機分のほぼ全量をメタンとして抽出・ガス資源化ができるバイオリアクタを開発する。また、対象の土壌で塩類吸収を最大化させるための好塩性植物の種・培養条件を実験的に把握し、ハロファイトによる塩害土壌修復手法を体系化する。これは、ハロファイトバイオマスの嫌氣的分解を司る耐塩性微生物の集積と、現地で収集されたハロファイトの増殖・嫌気分解処理の研究要素から成り立ち、塩害で荒廃した土壌の修復によって乾燥地帯の生態系と農業生産の回復を目指すものである。

2. 研究の目的

アジア・アフリカの乾燥・半乾燥地帯では内陸地の塩害が深刻化しており、例えば、ウズベキスタンではほぼ全ての農地が塩害に直面して農地の放棄や著しい生産減少に陥っている。人々の生活レベルの向上や人口増によって農産物の消費が急上昇している現在では、農地の確保は決定的に重要であるものの、塩害の拡大がこれを妨げている。また、アラル海のように塩害によって生態系が完全に破壊された事例もある。塩害を受けた土壌を修復する確実な方法は土壌中の塩類を表流水で物理的に洗い流すことであるが、内陸地ではその水自体が不足している上に、塩類が溶解した水は再び河川に入るため下流で再び塩の二次汚染を招いてしまう。これを解決するには洗浄以外の方法で土壌から塩を抽出・分離し、別の場所に固形物として隔離するしか方法がない。



図 1 乾燥・半乾燥地帯の塩害地域

また、これら乾燥・半乾燥地帯農地の土壌圏は、地下水位が浅く (1-1.5 m)、地下水の塩濃度が高い地勢特性を有している。そのため、灌漑によって土壌を地下まで湿潤させると毛細管現象によって地下水の塩水が上に移動して農地表面で塩が析出してしまう。これは微量の灌漑水を連続滴下する配管を農地の縦横に張り巡らす滴下灌漑法 (Drip irrigation 法) によって原理的には制御可能であるが、既に塩が析出している場所では塩害問題を解決できない。また、農地を粗放的に運用している地域では滴下灌漑を初めとする制御灌漑法は経済的に見合わない。

表 1 塩害土壌の修復戦略手法

戦略	内容	長所	短所
物理的手法	表流水による土壌洗浄	高速・確実	洗浄水による二次汚染
農業土木的手法	滴下灌漑法等による塩蓄積抑制	確実・水消費低	既塩害地で適用不可
生物学的的手法	好塩性植物による塩除去	安価・有価物回収 (?)	低速・仮説段階

一方、植物の中には、土壌の塩類を好んで蓄積する種類がある。これはハロファイトと呼ばれるもので、申請者による予備的なウズベキスタン野生ハロファイトの成分分析によれば植物乾燥重量換算あたり 40~47% もの塩を濃縮する性質がある。この植物を用いれば、速効性がある土壌洗浄よりも時間を要するものの、従来の農業の活動範囲内で生物学的に塩害土壌を修復できる可能性がある (表 1)。

現在の塩害対策は高速浄化を優先した土壌洗浄法が多用されている。これは作付け時期に先立った雨期の内に多量の表流水で土壌を洗浄するものであるが、乾燥地域の農業研究を主導する国際機関の一つである国際乾燥地域農業研究所 (ICARDA) の近年の調査によれば、アジア・アフリカの乾燥・半乾燥地帯において気候変動により雨期の時期がずれこみ、作付け時期前の洗浄を実施できない地域が急増しているという。このような従来の土木工学的的手法では対応できない塩害顕在化地帯は中央アジア・中近東・アフリカに亘る乾燥・半乾燥地帯とほぼオーバーラップしており、これらがハロファイトを用いた土壌修復の対象となり得る (図 1)。ハロファイトは、写真 1~2 に示すように、乾燥・半乾燥地帯の優占植物として野性的に繁茂している。これらは海水レベル以上に塩類を細胞 (液胞) に蓄積する性質があることから、今まで作物として利用することは薬効成分の抽出という例外的なケースを除いて考慮されていなかった。

しかしながら、塩害土壌を低コストで修復し、通常の作物生産に移行できるようにするには、農業の一環としてこのような植物の積極的栽培から一定の経済便益が得られる技術システム・社会システムの導入が不可欠である。このことを考慮して、土壌修復のシナリオを示したものが図 2 である。いかなる植物も生えない塩害砂漠に陥っている地域は土壌



写真 1 ブハラの塩害地域調査
(北九州市大, ICARDA)



写真 2 ブハラにおける好塩性植物
(*Amaranth sp.*) の優先地

塩害地の度合い	塩除去の必要性	運営の手段
ランク1 強度の塩害(塩害砂漠化)	有	水による土壌洗浄
ランク2 中度の塩害(耕作放棄)	有	Halophyteの栽培による塩除去
ランク3 軽度の塩害(作物生産量の減少)	有/無	耐塩作物の栽培
ランク4 塩害無し	無	通常作物の栽培

本研究による
修復のルート

↓
ランク2から
ランク3へ修復

図 2 塩害度合いに応じた土壌修復のルートとゴール

洗浄しか方策はないが、ハロファイトしか繁茂しなくなった耕作放棄地(ランク 2 の中度汚染地域)は、この植物を利活用することで耐塩性作物の栽培が可能でランク 3 に移行できるようになる。このためには、ハロファイトの人為的・積極的栽培による土壌浄化効果を工学的に定量・提示するとともに、回収したハロファイトの利活用技術の開発が欠かせない。

チミリヤゼフ植物生理学研究所(ロシア)と ICARDA がアラル海周辺の土壌を網羅的に調査した 2017 年の研究によれば、ほとんどの塩害土壌で塩の集積は表層の 30-50 cm に留まっていることが明らかになった。この厚みは成長の速い一年性のハロファイトの根圏深さとほぼ同じなので、これら好塩植物を栽培することで土壌に蓄積した塩を除去できるはずである。これによる土壌修復必要年数 T (yr) は、大まかに式-1 のように表すことができる。 T の値は、対象地域の土壌パラメータ S (土壌の塩含有率 約 5-10 g-S/kg-DS), ρ (土壌密度 約 1 kg-DS/L), H (浄化対象深さ, 約 0.5 m), r_s (栽培中の地下水からの塩上昇フラックス 0.0-0.3 g-S/m²/yr (?)) に加えて、植物固有のパラメータ r_B (ハロファイト増殖速度 kg-B/m²/yr) ならびに η_s (ハロファイトの塩含有率, 0.4-0.5 kg-S/kg-B) で定まる。従って、塩除去を左右する $r_B \eta_s$ を最大化する種・栽培条件を明らかにすることが土壌パラメータの分析とともに第一の研究目的となる。

$$T = \frac{S \cdot \rho \cdot H}{\eta_s \cdot r_B - r_s} \times 10^3 \quad \text{式-1}$$

ハロファイトに関する研究の歴史はかなり浅く、ICARDA 等によって 2000 年代に種の分類が開始されたものの、2010 年代以降でもほぼ生態調査の段階に留まっており、ハロファイトの生態が特に調査されているトルコ・ウズベキスタンの地域においても人為的栽培に関する研究はまだ実践されていない。本研究でこれによる土壌浄化手法を進めることで、表 1 に示した物理的・農業土木的手法に替わる新たな塩害修復技術を創造できるはずである。既存の塩害農地でも水分や N, P 等の養分を農業の一環として補給可能であり、これらの操作によって野生植物の生育速度を自生の 10 倍程度に高めることは容易である。この場合、ランク 2 の地域は数年の修復期間でランク 3 に移行できると見込まれる。

3. 研究の方法

ウズベキスタン国カラカルパクスタン自治共和国ヌクス市 Shortanbay 地区 (N 42°36' 56.9" 59°, E 28° 37.5, N 42°36' 56.6, E 59°28' 44.7) に図 3 のような 243 m² の圃場を作成し、施肥と給水を変えた試験区を設けて予備検討で選んだ 4 種のハロファイト (*Atriplex nitens*, *Karelinia caspia*, *Kochia scoparia*, *Salsola dendroides*) を 6 株/m² の密度で栽培した。当地は典型的な乾燥地の気候で、夏期の最高気温は 45°C に達する。これに伴い、日光が直射する土壌表層の温度は最高で 70°C に上昇する一方、日陰はこれよりも著しく低い 22°C に留まる。植物が生育する春期(3-5月)は 10-15 mm 程度の降雨があるものの、夏期-初秋期(6-10月)の降雨は 2-4 mm 程度に留まる。栽培試験を実施した 2021 年では、6 月-10 月の降雨は 4 ヶ月の合計で 10 mm 以下であった。温度と降雨の測定値を表 2 にまとめた。

土壌に N, P₂O₅, K として 1 ha あたりそれぞれ 90-180 kg, 50-80 kg, 40-60 kg を与えた系と無施肥の系の 2 系列を設け、それぞれに水の供給として天水のみ、6 月と 7 月に合計で 600-800 m³/ha を散水した条件で栽培試験を実施した。試験期間中の土壌におけるこれら栄養塩類の濃度と腐植質の含有率を測定した結果を表 3 に示した。

表 4 ハロファイトの塩組成

		<i>Atriplex nitens</i>	<i>Karelinia caspia</i>	<i>Kochia scoparia</i>	<i>Salsola dendroides</i>
Ash/Dry weight	g/g	0.14	0.18	0.14	0.15
Na	mg/g-ash	152	139	111	166
	meq/g-ash	6.61	6.04	4.83	7.22
K	mg/g-ash	171	60	245	137
	meq/g-ash	4.37	1.53	6.27	3.50
Mg	mg/g-ash	33	45	51	60
	meq/g-ash	2.72	3.7	4.2	4.94
Ca	mg/g-ash	68	39	152	47
	meq/g-ash	3.4	1.96	7.6	2.36
Cl	mg/g-ash	220	187	131	174
	meq/g-ash	6.21	5.28	3.7	4.92
Others	mg/g-ash	356	530	310	416
Na/Cl	mol/mol	1.06	1.14	1.31	1.47

次に、ハロファイトが吸収する塩類の量は植物の乾燥重量に比例すると仮定し、前述の表 4 の分析値をもとに株あたりの塩吸収量を図 4 のように求めた。株あたりの塩はハロファイトの成長に従って8月-9月にピークを示し、以降は老化によるバイオマスの減少によって低下した。食塩 (NaCl) 換算の塩吸収量はハロファイトの種によって多少異なり、*Atriplex nitens* と *Salsola dendroides* は 70-100 gNaCl/株で塩を吸収したことに対し、*Karelinia caspia* と *Kochia scoparia* とは 40-60 gNaCl/株ほどであった。9月以降に株から脱落したバイオマスの塩は土壌に戻るため、ハロファイトを8月頃に収穫することが土壌からの塩除去に最も効率的と考えられた。本実験では施肥と散水の効果はあまり明確でなく、*Salsola dendroides* だけが施肥と散水の両方をおこなった試験区で多量の塩を除去した。

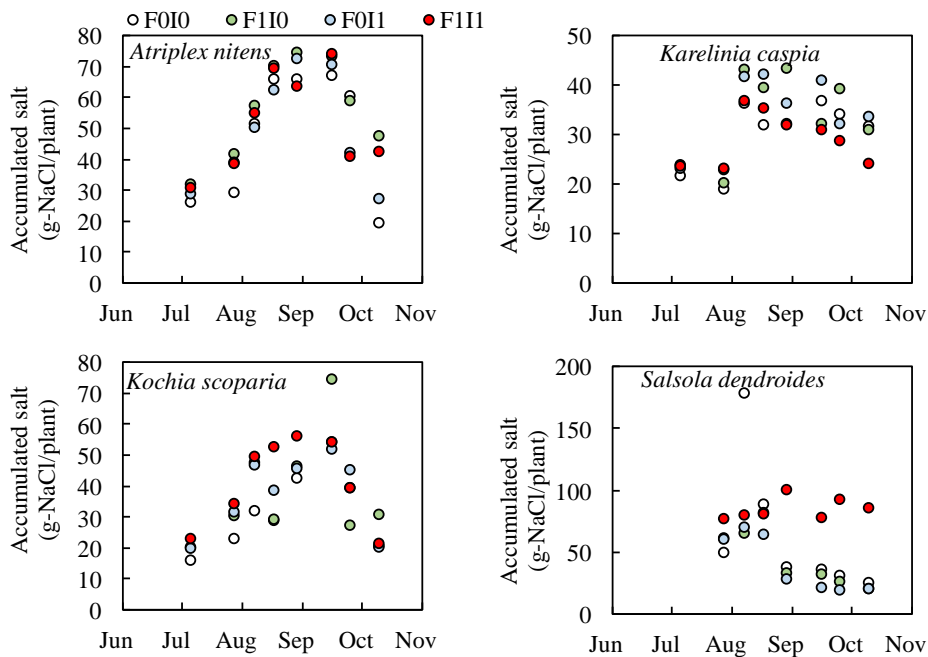


図 4 ハロファイトの成長に伴う塩の吸収
(FOIO: 無施肥+無散水, F1IO: 施肥+無散水, FOII: 無施肥+散水, F1II: 施肥+散水)

栽培試験期間中に合計で 128 検体の土壌を分析し、塩含有率の代表値として 13.4 g-NaCl/kg-乾燥土壌を得た。根圏の深さを 0.5 m、1 m³の土壌を 1,350 kg とそれぞれ仮定すると、ハロファイトで除去可能な塩は約 9,000 g-NaCl となる。ここで、前述の図 4 で最も塩の吸収が多かった *Atriplex nitens* (約 70 g-NaCl/株) を塩害土壌の修復に利用すると考えたとき 1 m²あたりの株数を 6 株と置くと、このハロファイトの栽培で 1 m²の土壌から 420 g の NaCl を 1 年で除去することが可能と予想される。栽培の場所でハロファイト以外の塩の流入と流出が無く、ハロファイトの塩除去速度が土壌の塩濃度に無関係と更に仮定すると、6 株/m²の栽培で土壌の塩がほぼゼロになる年数は 20 年と算出される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名	Kristina Toderich, Hidenari Yasui, Nataliya Akinshina, Matsuo Naoko, Ryosuke Endo, Timur Khujanazarov, Ana Shkineva, Zulfiya Sultanova, Alisher Qurbanov, Norikazu Yamanaka and Elena Shuyskaya
2. 発表標題	Circular Halophytes Mixed Farming (CHMF) to Improve Food Security in Salt-Affected Irrigated Arid and Semi-arid Ecosystems
3. 学会等名	DT14 International Conference of Arid Land Studies (国際学会)
4. 発表年	2021年

1. 発表者名	Olga Myachina, Kristina Toderich, Hidenari Yasui, Natalya Akinshina, Zulfiya Sultanova, Rimma Kim
2. 発表標題	Agrochemistry and Microbial Activities Under Halophytes Grown Under Different Salt Affected Soils
3. 学会等名	DT14 International Conference of Arid Land Studies (国際学会)
4. 発表年	2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>JST-JICAのSATREPS事業（アラル海地域における水利用効率と塩害の制御に向けた気候にレジリエントな革新的技術開発、代表校：京都大学、JST側研究期間2020/8/1-2026/3/31）において、本研究で得た知見を活用して強塩害土壌であるウズベキスタン国カラカルパクスタン自治共和国ヌクス市のkarabuga地区の試験圃場設計をおこなった。当該圃場では、本研究によって塩の除去が最も大きいことが明らかとなったAtriplex nitensを中心として土壌修復実験をおこなう予定である。当該国際共同研究ではUZGI、ウズベキスタン国立大学等が2021年秋期に造成した圃場の土壌特性を分析した。現地民間会社に外注した播種・栽培によって2022年春期-夏期にかけて土壌修復の度合いと植物の生長を計測する予定である。</p>	
--	--

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	遠藤 良輔 (Endo Ryosuke) (10409146)	大阪府立大学・生命環境科学研究科・講師 (24403)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------