

# キャピラリーバリアを利用した 節水型塩類集積抑制システムの開発



青森県立名久井農業高等学校 環境研究班

## 1. 序論

気候変動に伴い、水ストレスや砂漠化などの環境問題が世界規模で進行している。なかでも塩類集積による土壌の劣化は、アフリカ、アジア、アメリカ、オーストラリアなど世界各地の乾燥地・半乾燥地で発生しており、その面積は約 10 億 ha にもなる。しかしアジア・アフリカ地域では人口増加による深刻な食料問題を抱えている。そのため灌漑農業が行われているが、食糧増産と同時に深刻な塩害も引き起こしている。原因は適切な排水管理をしないまま過剰な灌漑を行うからで、地下水位が上昇し、強い日射のため水分が毛管現象によって土壌内の塩類を溶解しながら表層に蓄積するからである。

私たちが経験した 2011 年に東日本大震災では、計 2.4 万 ha の津波被害を受けた農地を除塩する方法として、石灰資材と大量の水で塩類を洗い流すリーチングという手法が効果をあげた。これは土壌粒子に吸着された Na イオンを石灰の Ca イオンで置換し、Na を下方に流す仕組みである。しかしリーチングに用いる水は軽度の塩害でも 1ha あたり 2,500 m<sup>3</sup>、ドラム缶にして 10,000 本も必要であり、水の少ない乾燥地には適さない。そこで毛管現象を土壌内に設けた礫層で遮断するキャピラリーバリア（以下 CB と記す）という土木工法に着目した。CB は砂など細粒の土層と礫など粗粒の土層を重ねた単純な構造で、細粒層から毛管現象で浸透してきた雨水を粗粒層で遮断し、層境界に貯水する毛管現象遮断技術である。私たちは、塩化カルシウムや転炉スラグなどの石灰資材と植物残渣を礫に混ぜた CB を土壌中に設け、塩害を抑制するシステムを思いついた（図 1）。CB の特徴である貯留水によって大量の水を使わずに徐々に石灰資材から Ca を溶出させ、土壌粒子に吸着された Na イオンを石灰の Ca イオンで置換できると考えたからである（図 2）。

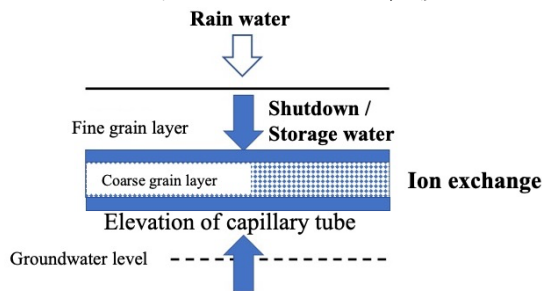


図 1 CB による塩害抑制のしくみ

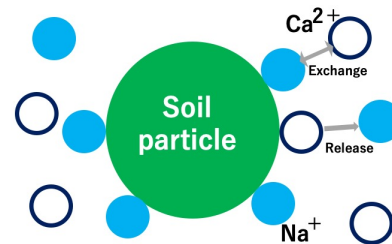


図 2 Na と Ca のイオン交換のイメージ図

## 2. 材料と方法

### 2.1 塩害土壌

ウズベキスタンを参考に砂と粘土を混ぜ、軽度塩害土壌を製作した。粘土は陽イオン交換容量が大きく異なるベントナイトとカオリナイトの 2 種類を用いた（表 1）。

表 1 作成した軽度と中度の塩害土壌の配合量及び pH と EC

	粘土	真砂土	NaCl	pH	EC (mS/cm)
軽度	ベントナイト 3 L	7 L	253 g	10	2.0
	カオリナイト 3 L	7 L	22.9 g	8	2.5

### 2.2 石灰資材

塩類集積を抑制するため、CB に塩化カルシウム（林純薬工業）、草木灰（有限会社秋又

水産工場)、転炉スラグ (ミネックス) の 3 種類の石灰資材を用いて効果を比較した。

## 2.3 実験装置

### 2.3.1 石灰資材の溶出実験

石灰資材からカルシウムなどがどれぐらい溶出してくるかを調べるために実験を行った。試験区は、塩化カルシウム、草木灰、転炉スラグの 3 種類とした。実験は、精製水 1 L を入れたビーカーにそれぞれの石灰資材を 100g 浸漬して pH、EC、Ca、Na を分析した。

### 2.3.2 イオン交換実験

塩類集積を抑制するためには石灰資材から溶出する Ca イオンによって土壌粒子に吸着している Na イオンを置換させる必要がある。そこでベントナイトとカオリナイトの軽度と中度の塩害土壌 100g に各石灰資材 10g を混ぜた土壌をビーカーに入れ、精製水を 1L 加え水質分析を行った (表 2)。

表 2 イオン交換実験の各試験区の名称と成分

<軽度塩害土壌>

試験区	石灰資材	軽度塩害土壌	試験区	石灰資材	軽度塩害土壌
LB-CC	塩カル 10 g	ベントナイト 100 g	LK-CC	塩カル 10 g	カオリナイト 100 g
LB-PWA	草木灰 10 g		LK-PWA	草木灰 10 g	
LB-CS	転炉 10 g		LK-CS	転炉 10 g	
LB	なし		LK	なし	

### 2.3.3 塩害抑制試験

半乾燥地を想定して CB の塩害抑制効果を調べるために実験を行った。実験では、底を切った直径 5cm のペットボトルを逆さに立て、地下水を想定した精製水を 50mL 入れた。体積比で赤玉土 7、砂 3 で作った軽度塩害土壌をその水位の 15cm 上まで充填した (図 3)。赤玉土は栄養分を含んでいない粘土質の赤土を乾燥させた土壌である。その上に 3 種類の CB を厚さ 1 cm で (石灰資材 12.5ml、稲わら 5ml、礫 7.5ml) 作り、さらにその上に塩化ナトリウムを添加しない土壌を 15cm 充填し、上から精製水を 15mL 注いだ。27°C の定温器で管理し、ウズベキスタンの雨季の雨量を参考に上から 3 日おきに精製水 15mL をかん水した。測定は 3 日おきにかん水前のペットボトルの重量、表土から深さ 2cm の土壌水分、地下水位の高さ、そして表土からの浸潤前線の深さを測定した。また 2 週間後、4 週間後に表土の pH、EC、Na、Ca を分析した。さら 4 週間後には CB の上下 3 cm の水分、CB の下 3cm の土壌の分析も行った。なお試験区は表 3 に示す。

表 3 塩害抑制実験の試験区の概要

試験区	概要
CC-CB	塩化カルシウム CB
PWA-CB	草木灰 CB
CS-CB	転炉スラグ CB
N	CB なし

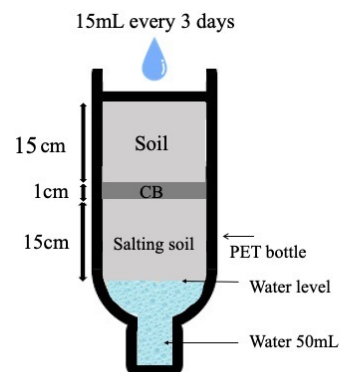


図 3 石灰資材以外の CB の材料の写真

## 2.4 栽培実験

CB によって塩分の集積を抑制できると作物の栽培が可能になる。そこで作物が育つか調

塩害に弱いレタスで栽培実験を行った。試験区は塩害抑制試験と同じのため省略する。

### 3. 結果と考察

#### 3.1 石灰資材の溶出実験

紙面の関係上、pHとCaだけを図4に示す。pHは木灰と転炉スラグで約12まで上昇した。これは草木灰と転炉スラグに含まれる強い塩基性の酸化カルシウムが溶出したからと考えられる。それに対して、弱塩基性の塩化カルシウムは約10までしかpHが上昇しなかったと考えられる。EC、Caは塩化カルシウムが最も高く、次いで木灰、転炉スラグの順であった。これは塩化カルシウムの水溶解度が42700 mg/Lと非常に高いため、短時間で大量にCaが溶出してCa濃度が大幅に増加したのに対して、草木灰と転炉スラグに含まれる酸化カルシウムの水溶解度は1190 mg/Lと比較的低く、増加は限定的であった。また転炉スラグでは8時間たったあたりからEC、Naとともにわずかに増加している。転炉スラグの主成分であるケイ酸カルシウムの水への溶解度は100mg/Lと低いが、カルシウムが約38%と草木灰の3倍以上も含まれているため、ゆっくりと増加したのではないかと考えられる。以上、塩化カルシウム、草木灰、転炉スラグともにCaが溶出することから、CBに用いる石灰資材として用いることができる可能性が高いことがわかった。

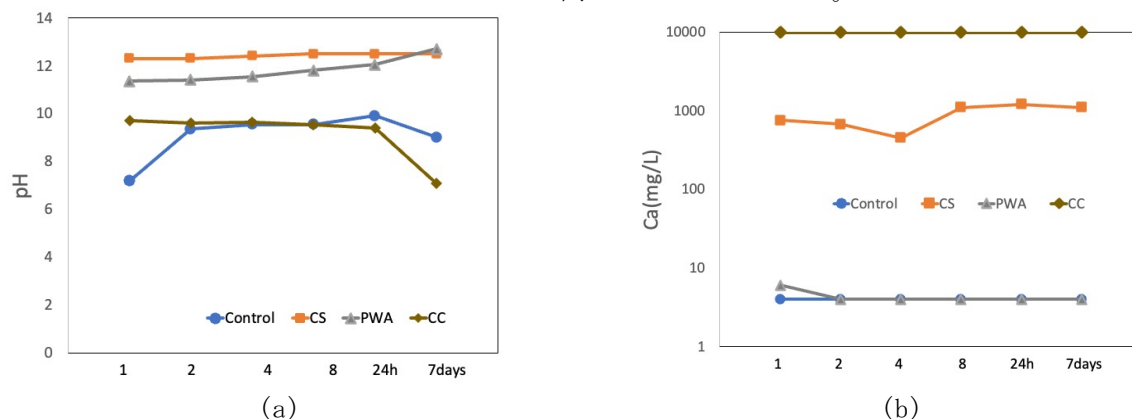


図4 石灰資材の溶出に伴う水質の変化 (a : pH, b : Ca)

#### 3.2 イオン交換実験

精製水に塩害土壌と各石灰資材を混ぜて浸漬したものと石灰資材を入れなかったものの水質分析を行った。その結果、Na濃度は、カオリナイト、ベントナイトともに塩化カルシウムが一番高く、次いで転炉スラグ、草木灰の順であった(表4)。塩化カルシウムは、Caを多く溶出することがわかっている。イオン交換はCaが土壌粒子に吸着しているNaと交換することで起こる。したがって不溶出Na量が少ないことから分かるように、塩化カルシウムによって最も多くイオン交換が行われ、Naが放出されたと考えられる。

表4 浸漬水のナトリウム濃度 (mg/L)

<軽度塩害土壌>

カオリナイト	溶出 Na	不溶出 Na
LK	58	24.4
LK-CC	95.5	4.9
LK-PWA	93	7.4
LK-CS	76	6.6

<軽度塩害土壌>

ベントナイト	溶出 Na	不溶出 Na
LB	840	163
LB-CC	1000	3.2
LB-PWA	930	91
LB-CS	1000	3.2

転  
炉  
ス  
ラ  
グ  
も  
ケ  
イ  
酸  
カ  
ル

シウムと酸化カルシウムを多く含む石灰資材である。そのためイオン交換は行われたと考えられる。しかし、ケイ酸カルシウムの Ca 溶出量は比較的少ないため、塩化カルシウムに比較して Na の放出が少なかったと考えられる。また草木灰の Ca はケイ酸カルシウムより溶出しやすい酸化カルシウムだが、約 10%しか含まれないため Na の放出が最も少なかったと考えられる。またイオン交換により溶出したと考えられる Na の溶出量は、石灰資材の種類にかかわらず、カオリナイトよりもベントナイトが多かった。ベントナイトの陽イオン交換容量は 80~100mEq/100g とカオリナイトの 3~15 mEq/100g よりも大きい。したがってカオリナイトよりも多く Ca を吸着し、Na を放出したと考えられる。

### 3.3 塩害抑制試験

分析の結果（表 5）、pH は CB に石灰資材を用いても極端に高くないことがわかった。これはカルシウムが土壌に吸着されたからであると推定される。表層の EC は、CB が不在の N 区で高い値を示した。Na が 222mg/L と増えていることから、明らかに塩類集積が起きていたことがわかる。また下層の Na 濃度は N と CC-CB で高くなっている。土壌に含まれている Na が土壌水分によって上昇していることが推測される。しかし、CC-CB では 2300 mg/L と Ca が増えている。CC-CB の EC が高いのは、Na ではなく、主に溶け出した塩化カルシウムの Ca によるものと考えられる。また Ca 濃度は溶出実験の結果と同じで CC-CB の次は転炉スラグを含んだ CS-CB、わずかな酸化カルシウムを含む PWA-CB の順で高くなった。さらに下層の Na 濃度は CC-CB が 88 mg/L と最も低く、SC-CB、PWA-CB の順となった。Ca と Na 濃度から考えると、CB から溶出された Ca により CB の下部で Na と Ca のイオン交換が行われ、塩類集積を抑制していたことが推測できる。なお表層の Ca では CC-CB が高く、SC-CB と PWA-CB もやや増えていた。礫だけで作る CB は毛管現象を遮断できるが水分が届かず表層は過乾燥になり、作物栽培ができなくなると推定される。本研究では CB に植物残渣を混ぜ、CB 下の Ca を含んだ貯留水を表層に届ける工夫を施した。植物残渣は植物繊維の毛管現象で水分を吸い上げる効果が期待できるからである。表層で Ca が増えていることは、貯留水が表層まで届いていることを示唆している。

表 5 塩害抑制試験における実験 35 日後の土壌分析結果

<表層>

試験区	土壌水分(%)	pH	EC (mS/cm)	Ca (mg/L)	Na (mg/L)
CC-CB	71.6	5.5	0.20	36.0	4.0
CS-CB	32.7	5.7	0.19	15.0	5.0
PWA-CB	32.2	5.6	0.08	11.0	3.0
N	37.3	6.2	1.02	10.0	222.0

<下層>

試験区	土壌水分(%)	pH	EC (mS/cm)	Ca (mg/L)	Na (mg/L)
CC-CB	69.4	5.5	7.93	2300.0	88.0
CS-CB	37.3	5.6	0.86	430.0	170.0
PWA-CB	40.3	5.5	0.94	29.0	200.0
N	42.7	5.6	1.53	15.0	380.0

### 3.4 栽培実験



栽培から4週間後のレタス苗の写真を図5に示す。植え付け7日後頃からは、CBを設けた区では生育を始め、葉を展開している。ところがCBのない区は葉の黄変が続き生育が大幅に遅れた(図5d)。レタスやエンドウマメなどはECが1.0 mS/cm弱でも生育に影響が生じる耐塩性が極めて低い作物である。特にレタスは過乾燥や土壌中のナトリウム濃度が高まるとカルシウム不足によるチップバーン現象という葉枯れが発生しやすい。CBがない区では塩類集積が始まっており、その結果、生理障害が発生したと考えられる。しかしCBのある区は、塩類集積を抑制するとともに、不足するカルシウムをCBが供給するので障害が抑制されていると考えられる。

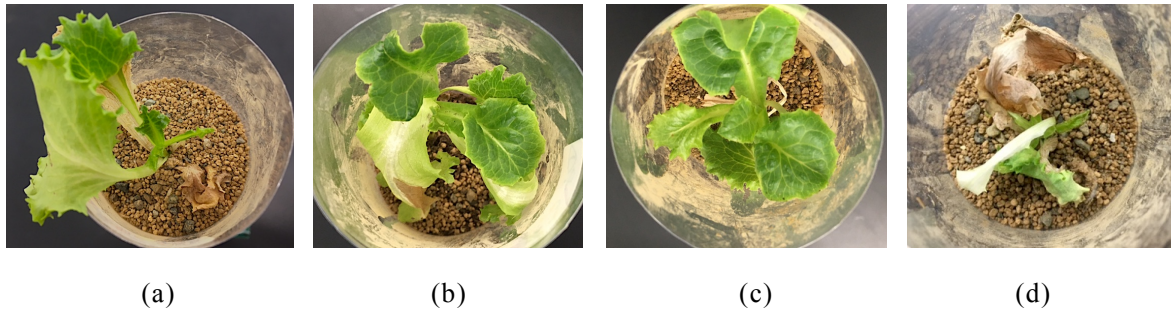


図5 栽培から4週間後のレタスの生育状況  
(a)CC-CB、(b)CS-CB、(c)PWA-CB、(d)N

#### 4. 結論

2年間取り組んだ研究で私たちは、現地で安価に調達できる資材を使って製作するわずか約1cmのキャピラリーバリアを地下15~30cmに埋設することで、乾燥地や半乾燥地でもリーチングのような大量の水を使わずに、塩類集積の発生を抑制できることを明らかにした。礫のCBで毛管上昇を遮断した貯留水でCBのCaを溶かしNaとイオン交換させ、その後、植物残渣の毛管現象で再び表層に水を届ける私たちのアイデアはとても効果的であった。また材料である石灰資材からカルシウムやマグネシウムなどのミネラル分が供給されるため、乾燥地や塩分の多い土壌で発生しやすい生理障害を抑制できることも証明できた(図6)。塩化カルシウムや草木灰、転炉スラグなどの石灰資材を混合することで、塩類集積抑制と作物の生育促進の両方に効果のあるCBを製作することができると考える。また、手に入りやすい塩化カルシウムや自給できる可能性が高い草木灰を利用できるので安価に施工しやすい。なお、用いる土壌によってCaの吸着量は決まっている。そのためこのシステムは、最も広く分布する軽度塩害土壌でその能力を発揮すると考える。このような土壌水分を利用して塩類集積の発生を抑制する節水型システムは今までなく、乾燥地や半乾燥地における食糧増産に伴う水不足の解決に大いに貢献できるものである。



図6 実験風景(左: ペットボトル装置作成、中: 塩カルCBの溶出、右: 栽培試験)