

I 要旨

世界には十分な農業用水を確保できない乾燥地や半乾燥地が広く存在する。これらの地域の開発途上国では、人口増加に伴う深刻な食糧問題を抱えている。そのため灌漑農業が行われているが、強い日射により土壌水分が塩類を溶かしながら蒸発し、土壌表層に蓄積する塩類集積が発生している。塩類集積は作物の生育を阻害するため耕地が使えなくなり大きな問題となっている。塩害対策として、大量の水で塩類を洗い流すリーチングが行われている。しかし十分な水が確保できない乾燥地には適さない。そこで私たちは、地下約30cmに設置した転炉スラグ、軽石、植物残さで作った石灰層と蒸発してくる土壌水分の動きを利用して塩類集積を抑制するシステムを開発した。

このシステムは、①土壌中の自然な水の動きだけで除塩できる節水型技術であること、②植物の生育に必要なカルシウムや微量成分を土壌に供給できること、③大型施設設備、電気や石油エネルギーが不要であること、④製鉄の副産物である転炉スラグの有効利用ができることなどの長所がある。

気候変動による砂漠化が進む現在、この簡単で安価な技術は乾燥地・半乾燥地の持続的農業に大いに貢献できるものである。今後は世界で広く活用してもらえるようさらに研究を深め、実用化に努めていきたい。

II 目次

- 1 序論
- 2 研究材料と研究方法
- 3 成果と考察
- 4 結論と今後の展望
- 5 参考文献

III 報告書で使用する略号及び頭文語

CB: Capillary barrier

EC: Electrical Conductivity(mS/cm);

Ca: Calcium(mg/L);

Na: Natrium(mg/L);

Vm: Vermiculite

IV 謝辞

研究にあたって石灰質資材についてご教授いただいた吉野石膏株式会社、塩害土壌の製作方法をご指導いただいた鳥取大学の方々に心からお礼申し上げます。

V 研究報告

土壌水分の動きと転炉スラグで 塩類集積を抑制するシステムの開発



青森県立名久井農業高等学校

Flora Hunters

1 序論

世界には土壌の塩類集積が発生している乾燥地や半乾燥地の開発途上国が、アフリカ、アジア、南米などに広く存在している（図1、表1）[1]。塩類集積とは降水量以上に蒸発量が多いため、塩類を含む土壌水分が蒸発し、地表付近に塩類を集積させる現象（図2、3）である。さらに近年は、灌漑農業を進めるため簡易な用水路が作られているが、そこからの漏水も原因となっている。塩類が集積した土壌では植物が生育できず砂漠化につながるうえ、人口増加に伴う食糧問題を抱えている途上国では耕作できず深刻な問題となっている。

表1 塩害地域の面積（100万 ha）

地域	塩性土壌	ソーダ質	合計
オーストラリア	17.6	340.0	357.6
アジア	194.7	121.9	316.5
アメリカ	77.6	69.3	146.9
アフリカ	53.5	26.9	80.4
ヨーロッパ	7.8	22.9	30.8
世界全体	351.2	581.0	932.2



図1 塩害地域の分布

一般的な除塩技術にリーチングとスクレイピングである[2]。リーチングは土壌を耕して石膏（硫酸カルシウム）を散布し、大量の水で塩類を地下に浸透させる技術で、私たちの住む東北で発生した東日本大震災の際にも用いられた[3]。しかし乾燥地は、洗い流す大量の水が確保が難しい。また塩類が集積した土壌を削り取るスクレイピングも大型機械が必要のためコストに難がある。さらにどちらの技術も対症療法で塩害抑制にはつながらない。開発途上国で必要なのは安価で簡単な塩類集積の抑制技術だと私たちは考えた。



図2 塩類が集積した圃場

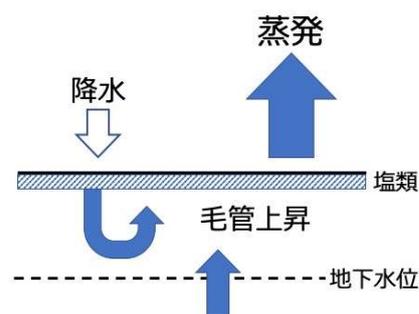


図3 塩類集積が起こる土中水の動き

そこで私たちは、地下に転炉スラグの石灰層を埋設して塩類集積を抑制する仕組みを考案した。これは、わずかな降雨や地下から蒸発してくる水分が石灰層を透過する際に Ca イオンを溶出させ、土壌に吸着されている Na イオンと交換して塩類集積を抑制するアイデアである。人工エネルギーや大量の水を必要とせず、自然の土壌水分の動きを利用した持続可能なシステムは、開発途上国の食料問題の解決に大いに貢献するものと期待している。

2 研究材料と研究方法

(1) 塩害土壌の製作

- ①赤玉土（粘土）と川砂を 7 : 3 の割合で混ぜる。
- ②水に食塩と液肥ハイポネックス（6-10-5）を溶かし土に混ぜて乾燥させる。配合は土壌体積の 20%の水に食塩 0.8%、さらにハイポネックス(6-10-5)を加え 2000 倍液を作る。

(2) 石灰質資材の選択試験

- ①各石灰質資材(表 2、図 4)を精製水 50ml が入った容器に 5 g 浸漬してラップで蓋をする。
- ②pH と Ca 濃度を 20 日間測定し、石灰層に用いるのに適した石灰質資材を選択する。

表 2 石灰資材の主成分

石灰質資材名	主成分
消石灰（アルカリ分 70%）	水酸化カルシウム
タンカル（50%）	炭酸カルシウム 微量（マグネシウム）
ケイカル（47%）	ケイ酸カルシウム 微量（マグネシウム）
石膏（25%）	硫酸カルシウム
転炉スラグ（47%）	ケイ酸カルシウム、酸化カルシウム、鉄、マンガン他 [4]



a 消石灰



b タンカル



c ケイカル



d 石膏



e 転炉スラグ



f 塩害土壌の作成

図 4 石灰質資材(abcde)と塩害土壌作成の様子 (f)

(3) C B 効果の特性試験

- ①Ca を溶出させるには石灰層に水を貯える必要がある。そこで軽石とワラの 2 種類の層(表 3)を地表から 15cm 下に厚さ 3cm で設置し、層の 5cm 下から灌水する。
- ②C B (キャピラリーバリア) 効果とは毛細管上昇遮断効果をいう[5]。粒径の違う土や礫層を設けることで毛細管現象により進んでくる水分の動きを遮断するとともに、層付近に貯水できるため古くは高松塚古墳、現在では産業廃棄物処理施設の漏水対策として用いられている伝統的土木工法である。

表 3 C B 試験区

試験区	内容
Control	無処理（塩害土壌だけ）
礫層区	直径 3 cm の軽石を地表 15cm 下に厚さ 3cm で埋設
ワラ層区	ワラ（植物残さ）を地表 15cm 下に厚さ 3cm で埋設

(4) 塩害抑制試験

- ① 深さ 60cm、容積 65L のプラスチック容器に塩害土壌を充填する。
- ② 無処理の Control と各種石灰層を内蔵した区を設ける。
- ③ 石灰層は厚さ 3 cm とし、石灰資材と軽石、ワラを混ぜて地表から 25cm 下に設置する。
- ④ 土壌水分は降雨と地下水を想定して表層と石灰層の下 5 cm に毎日 100ml、パナソニック社自動灌水装置 EY4200 で供給する。
- ⑤ Control 以外は石マルチを施す。石マルチとは直径 2cm 前後の小石を地表に敷いて土壌水分の蒸発を抑制する南米の農園で用いられている技術である。実験装置と石マルチは図 5 の通りである。
- ⑥ 1 週間毎に土壌の表層部、中層部の pH、EC、Na 濃度、Ca 濃度を測定し、それぞれの塩害抑制能力を評価する。

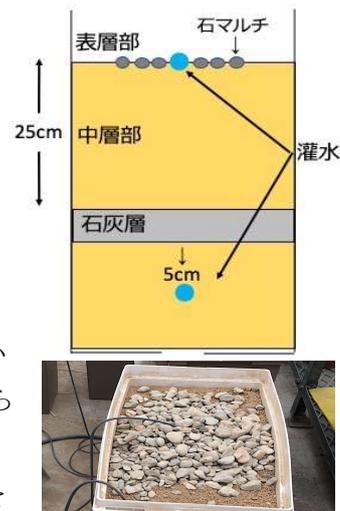


図 5 抑制試験装置

(5) 実用化試験

ガラス温室の地面に長さ 1 m 幅 40cm 深さ 25cm の穴を掘り、転炉スラグとワラ、軽石で作った厚さ 2 cm の石灰層 (図 6) を作り埋めもどす。温室のため雨が降らないので石灰層の下 5 cm に毎日 500ml 灌水して、塩類集積が抑制できるか土壌分析する。



図 6 石灰層

(6) ナトリウム吸着試験

- ① Ca イオンと交換された Na イオンは土壌深く浸透し、暗渠排水などで河川などに排出される。また Cl は陰イオンで土壌に吸着されないのこちらも排出される。しかし大量の塩類が流出すると下流域でまた塩害が発生する恐れがある。そこで土壌を Na の吸着フィルターとして使用できないか下表の試験区を設け、Na の吸着試験を行う (表 4)。三和土 (たたき) とは消石灰と砂で土を固化させる日本古来の土木工法で、民家や寺社の土間や相撲の土俵に使われている。
- ② 測定は、プラスチックの筒状容器にそれぞれの土壌や三和土を厚さ 5 cm に充填し、食塩を水に溶かして作った塩水を流し込み、透過水の pH、EC、Na イオン濃度を測定する。

表 4 ナトリウム吸着試験の試験区

試験区	内容
真砂土区	砂質土壌
ベントナイト区	膨潤性粘土
バーミキュライト (Vm)	粘土鉱物 (苦土蛭石) ※焼成処置していないもの
赤土区	火山灰粘性土 (関東ローム層など)
真砂土三和土区	真砂土の体積 1 に対して、砂 0.5、消石灰 0.2 を混ぜ、水で練り固化されたもの。
ベントナイト三和土区	バントナイトの体積 1 に対して、砂 0.5、消石灰 0.3 を混ぜ、水で練り固化させたもの。粘土は微粒子で真砂土と同じ体積でも表面積が大きいいため、消石灰量を増やして固化させた。

(7) 測定方法

pHはLAQUAtwin-pH-11B、Caイオン濃度はLAQUAtwin-Ca-11を用いて測定した。Naイオン濃度はLAQUAtwin-Na-11、EC(電気伝導度)はLAQUAtwin-EC-33Bを用いて測定した。すべてHORIBA社製である。また気温は温度ロガー(KN Laboratories)で測定した。

3 結果と考察

(1) 試験環境

実験はガラス温室内で行った。5週間の温室内の気温の推移は図7の通りである。最高気温45℃と乾燥地の気温を再現できていることがわかる。

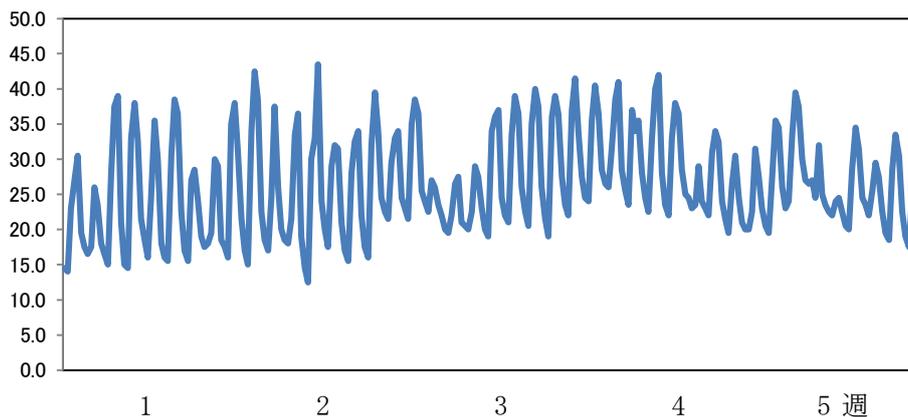


図7 温室内気温(°C)の推移

(2) 石灰質資材の選択試験

石灰層に適した石灰質資材を選択するために、精製水に各資材を浸漬して5週間pHとCaイオン濃度の変化を測定した。

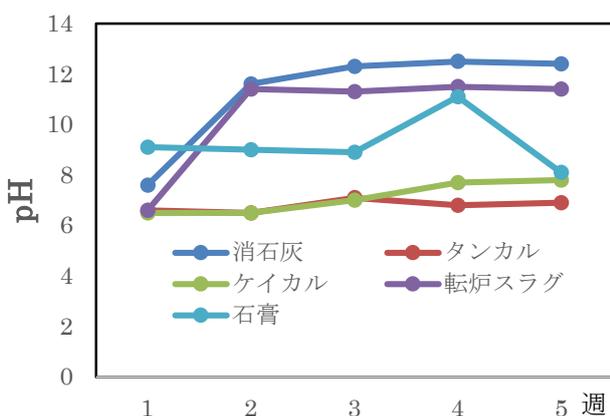


図8 pHの推移

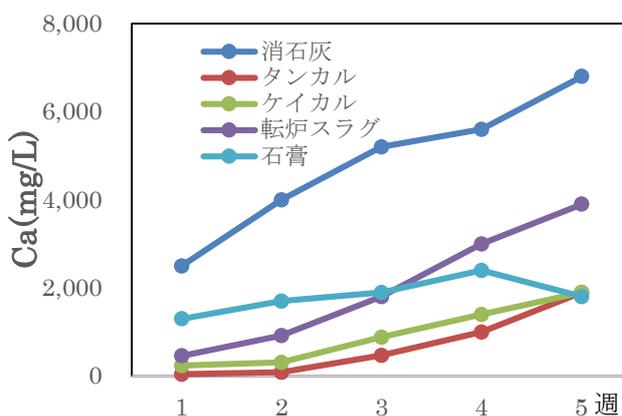


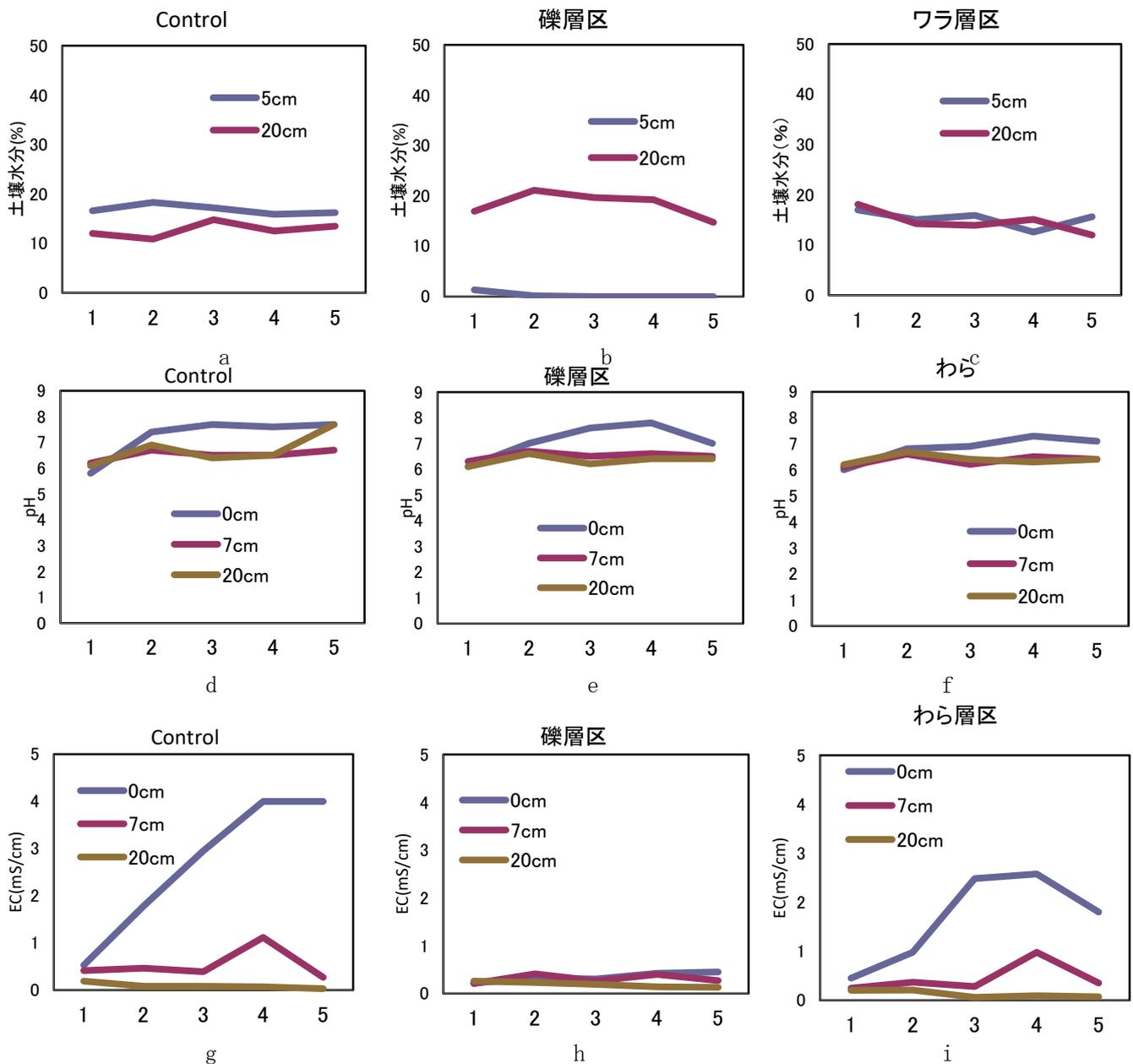
図9 Caイオン濃度の推移

測定の結果、pHでは消石灰、転炉スラグが浸漬後すぐ上昇した(図8)。特に消石灰はpH12.5以上と強アルカリ性を示した。しかしタンカルとケイカルは、ほとんど中性のままであった。またCaイオン濃度でもpHと同じ推移を示した(図9)。これによりCaイオン濃度がpHと深く関係していることがわかった。また炭酸カルシウムは水に溶けにくく、ケイ酸カルシウムも溶解するのに時間がかかる。タンカルとケイカルのCaイオン濃度とpH

が上昇しないのはそれが理由だと考えられる。また同じケイ酸カルシウムが主成分の転炉石灰がすぐCaを溶出したのは、わずかに含まれる酸化カルシウムの影響によるものと思われる。この実験の結果、耕地で栽培することを考慮して、石灰層には消石灰ほどpHが上昇せずにCaを多く溶出する転炉スラグと石膏を用いて研究を進めることにした。

(3) C B効果の特性試験

石灰質資材からCaを溶出させるには、水を石灰層付近に貯める必要がある。土壌の中に礫層を設けるとC B効果で地下水の毛細管上昇を遮断でき、周辺に貯水できることがすでにわかっている。しかし完全に水分の上昇を遮断してしまうと、表層が過乾燥となり作物が栽培できなくなる。そこで適した石灰層を考案するため、軽石の礫層と植物残渣のワラ層ではC B効果がどのように違うのか5週間探ってみた。なお土壌水分の測定箇所は地表から5cm下、そして礫層やワラ層の5cm下の2点、pH、EC、Naは地表から0cm、7cm下、そして20cm下の3点とした。結果は図10に示した。



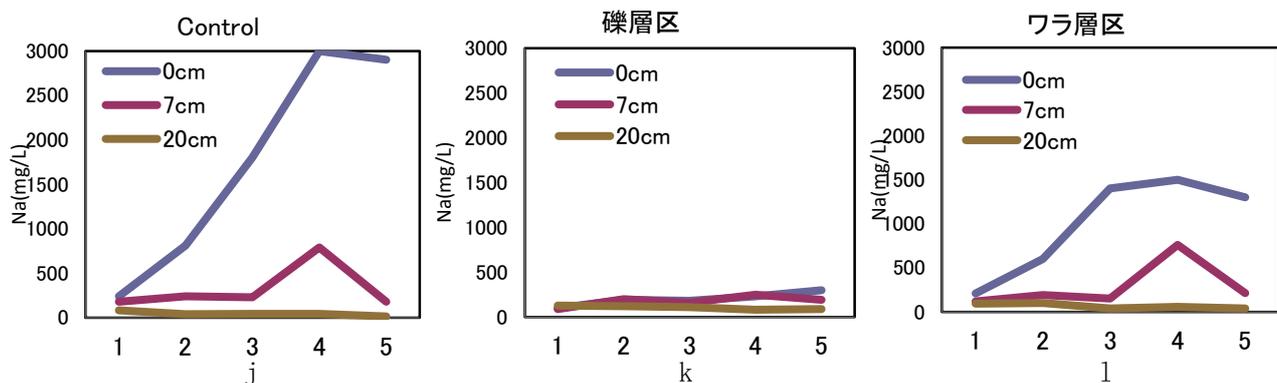
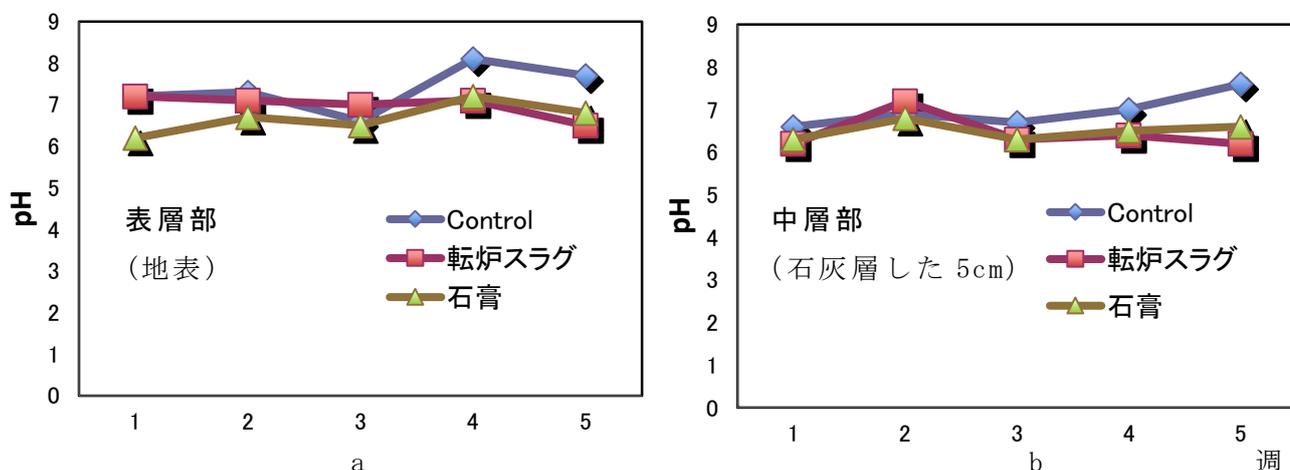


図 10 5 週間の土壌成分の推移（土壌水分：abc、pH：def、EC：ghi、Na：jkl）左から Control、礫層区、ワラ層区。横軸は週。

塩害土壌だけ充填した Control、そして礫層区、ワラ層区とも灌水部付近の地表から 20cm 下には十分な水分があった。しかし地表 5cm 下では Control 及びワラ層区とも作物が生育できる水分があるにもかかわらず、礫層区では 0%であった。このことから礫層は毛細管現象で上昇してきた水分を遮断できるが、ワラ層は完全に遮断できないことがわかった。また pH はどの区も中性付近であり、層を設けても作物栽培するうえで支障がないことがわかった。ところが EC と Na 濃度では、Control の地下 5cm で大幅に上昇している。EC は Na 濃度に影響を受けるので、地表付近で塩類集積が起きていると考えられる。しかし礫層区では、地表でも EC と Na 濃度が低い。これは礫層の CB 効果で、塩分を含んだ水分の上昇が妨げられ、その結果塩害を抑制したと思われる。ワラ層区は Control と礫層区の間となった。これはワラ層の CB 効果が不完全なため、水分を少し透過させ、それにより EC と Na 濃度をやや高めてしまったものと考えられる。以上の結果から総合的に評価すると、塩類集積を抑制し、なおかつ農業を持続させるのに適した層は、CB 効果で貯水する礫と水分を適度に透過させる植物残さのワラの 2 つを組み合わせるのが効果的と判断した。

(4) 塩害抑制試験

実験の結果、石灰質資材として石膏と転炉スラグを用いることにした。また上昇してくる土壌水分を貯水し Ca を溶出させ、さらに Ca を含んだ水分を表層部へと送るために、石灰層に植物残渣のワラを混ぜることにした。また貯水力をより高めるために直径 2cm 前後の軽石も石灰層に混ぜ、土壌成分の変化を 5 週間測定した。結果は図 11 に示した。



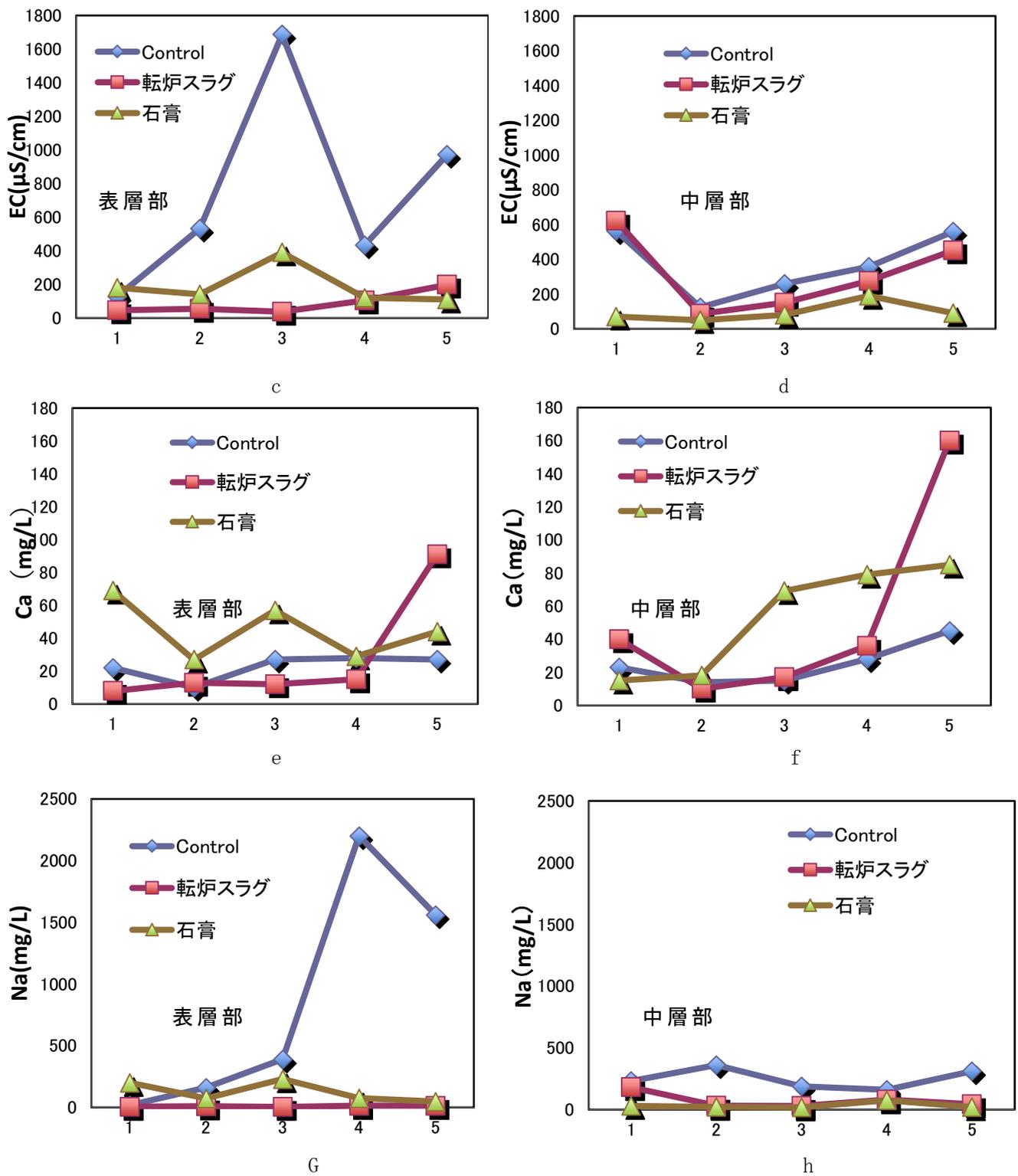


図 11 5 週間の土壌成分の推移 (pH : ab、EC : cd、Ca : ef、Na : gh)、左は表層部 (地表)、右は中層部 (石灰層下 5cm)

pH はいずれの区の表層部、中層部とも中性で推移した。これは石灰層から溶出した Ca が土壌粒子に吸着されたため、大きくアルカリ性に傾かなかったからだと考えられる。これにより石膏、転炉スラグの石膏層を設けても、作物栽培に支障がないことがわかった。EC では Control の表層部で約 $1700 \mu\text{S/cm}$ と高くなった。多くの野菜の最適 EC は $500 \mu\text{S/cm}$

前後、高い EC でも栽培できる小麦やトウモロコシでも $1000 \mu\text{S}/\text{cm}$ 前後であるため、この状態では栽培が難しい。明らかに塩類集積が起きていると思われる。また中層部では転炉スラグも時間が経つごとに EC がやや高くなっている。EC は Na にも Ca にも影響を受ける。Ca 濃度の推移を見ると中層部で転炉スラグが 4 週間経つころから高くなっているため、この EC 上昇は Ca の影響を受けていると考えられる。さらに Control の表層部では、4 週目から Na 濃度が高くなっている。したがって表層部の Control の EC を上昇させたのは Na だと考えることができる。以上の分析から総合的に評価すると石膏、転炉スラグとも土壤の塩類集積を抑制できることがわかった。これは石灰質資材から溶出した Ca イオンが土壤粒子に吸着している Na イオンと交換しているからだと考えられる。



図 12 レタスの栽培試験（左：Control 中：礫層区 右：石灰層）

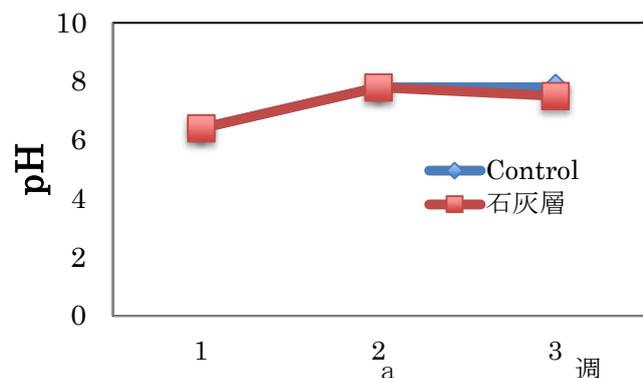
そこで鉢に塩害土壤を充填し、無処理の Control、礫層区、石灰層(石膏)の 3 区でレタスを栽培してみた(図 12)。灌水は鉢底に 1 日 1 回 100ml 行った。すると Control では徐々に葉が黄変してきた。おそらく塩害によるものと考えられる。また礫層だけを設けると毛细管現象が遮断されるので、実験開始わずか 2 日で萎れた。しかし石膏とワラ、軽石を混ぜて作った石灰層を施した鉢では、石マルチで土壤水分の蒸発を抑制した効果もあり正常に生育した。これにより石灰層を圃場に設けることで塩害地を栽培ができる農地に変えられることがわかった。しかし石膏は水に浸かり嫌気性状態になると硫化水素を発生する恐れがある。そのため実用化試験では転炉スラグを用いることにした。

(5) 実用化試験

実際にガラス温室で実験を行った(図 13)。その結果は図 14 のとおり、転炉スラグの石灰層を設けても土壤の pH は中性であった。また無処理の Control では Na 濃度が上昇し、塩類集積が発生しているが、石灰層を設けた区は抑制できた。石灰層区の Ca 濃度が高まっていることから Ca が徐々に溶出し、Na と交換されたことが推測される。



図 13 温室内での実験



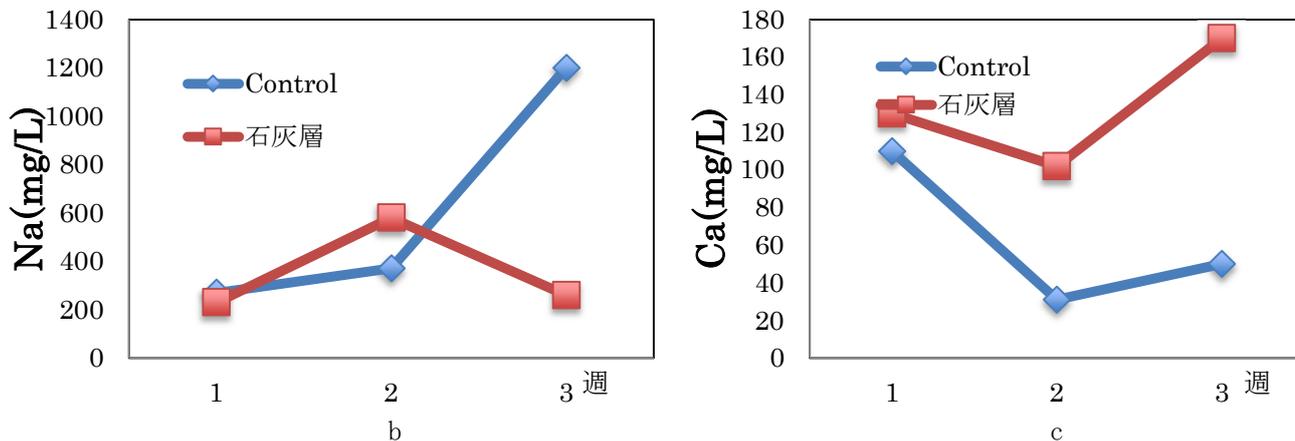


図 14 ガラス温室内の土壌成分の推移 (a:pH b:Na c:Ca)

表 5 は、実用化試験開始 12 週間後の EC と塩素の推定含有量である。塩素は平成 16 年神奈川県 of 換算式 $Cl(mg/100g) = 166 \times EC(mS/cm)$ を用いた [6]。その結果、石灰層を設けた区は塩素についても 60% 抑えていることがわかった。施設栽培を行う場合の塩素含有量はイチゴ、メロン、インゲン、ニンジンで 50mg 以上にだと生育障害が起きる。これにより世界で行われている施設栽培での塩類集積対策にも長期間効果があると考えられる。

表 5 ガラス温室内の 12 週間後の EC と推定塩素含有量

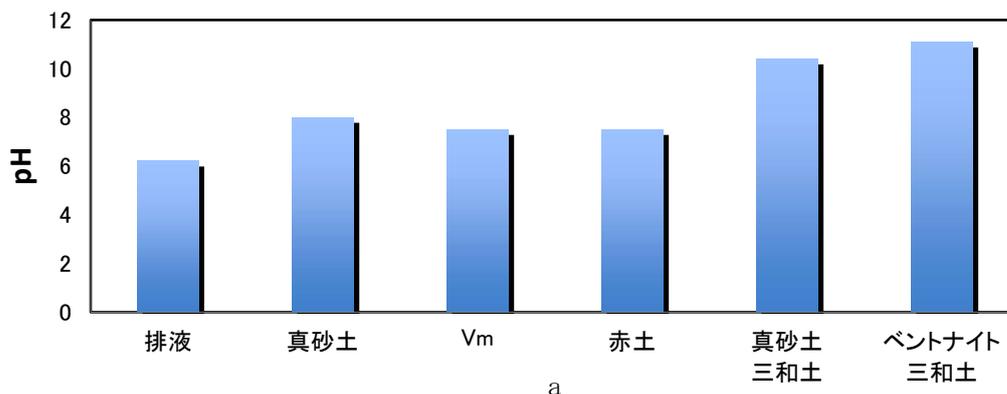
試験区	EC (mS/cm)	Cl (mg/100g)
Control	0.759	124.5
石灰層区	0.307	49.8

(6) ナトリウム吸着試験

土壌粒子から離れた Na は地下に浸透し、暗渠排水などにより河川へ排出される。Na が大量に排出されると下流の塩類濃度を高めるため、新たな塩害を発生させる可能性がある。そこで塩分を含んだ廃液を人工的に製作し (表 6)、排出する際、土壌で吸着できないか試験を行った。結果は図 15 に示した。

表 6 廃液の水質

人工廃液	水質
pH	6.2
EC ($\mu S/cm$)	265.0
Na (mg/L)	95.0



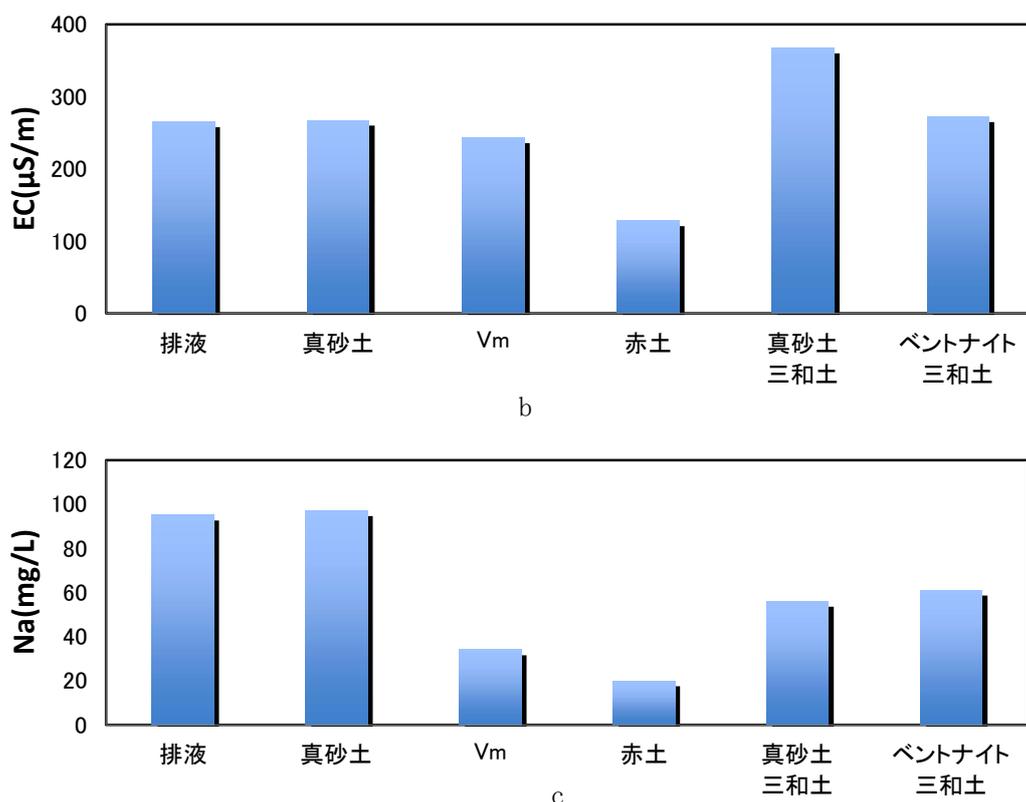


図 15 塩分を含んだ廃液の浄水 (pH : a、EC : b、Na : c)

実験の結果、廃液を土に透過させても pH では真砂土、Vm、赤土では大きな変化はなかった。しかし三和土加工した真砂土、ベントナイトでは pH がアルカリ性に傾いた。これは三和土に使われている消石灰の影響だと考えられる。しかし石灰のアルカリ水は二酸化炭素によって次第に中和されるので環境に及ぼす影響は小さいと思われる。また EC と Na は同じような結果となった。これは Na やカルシウムによるものと思われる。Na 濃度を見ると真砂土では、ほとんど浄化できないことがわかった。しかし Vm では 3 分の 1、赤土では 4 分の 1 まで減らすことができた。Vm は層構造をもった鉱物で、農業では畑の保肥資材として使われる。また私たちは実験で焼成処理した Vm より無処理の Vm の方が高い吸着力を持っていることを確認している。Vm で浄水できたのは、おそらく陽イオンの Na を吸着したためだと考えられる。また赤土は微粒子のため、表面積が大きい。そのため粒の大きな真砂土に比べ大幅に吸着力が高かったものと考えられる。真砂土の吸着力は低い。しかし三和土加工を施すと Na の浄化力が高まった。貝殻は Na の吸着剤として利用されている。三和土の消石灰は空気と反応して貝殻と同じ炭酸カルシウムとなることから吸着できたと考えられる。また三和土にしたため透過速度が遅くなり、そのため吸着しやすくなった可能性もある。またベントナイトは膨潤性粘土のため、廃液を流し込むとまったく透水性がなく浄化できない。しかし三和土加工すると、砂が混ざるため透水性が高まり、その結果、浄水できるようになったと考えられる。

世界にはさまざまな特徴をもった土が存在する。三和土は消石灰量を変えることでほとんどの土を固化できるので、Vm や赤土がない場合は現地の土壌で製作し浄化することができる。現地では排水口付近に浄水できる土の層を設けたり、三和土で浄化槽を作りそこを

透過させて排水するなど工夫することで Na 濃度を低下できる可能性があることがわかった。

4 結論と今後の展望

世界の乾燥地、半乾燥地の開発途上国で発生している塩類集積を抑制する研究に取り組んできた。私たちの開発した地下 30cm 前後にワラ、軽石、転炉スラグを混ぜた石灰層を設け、蒸発してくる土壤水分によって Ca イオンを溶出させ、土壤に付着している Na イオンと交換させる技術である。一般に行われる除塩技術のリーチングでは、10a あたり 150～200t、降水量換算で 150～200mm もの大量の水が必要になる。したがってこの技術は途上国に適した節水型の塩害対策技術である。研究では石膏と転炉スラグとも優れた抑制効果を確認できた。しかし石膏（硫酸カルシウム）は嫌気状態になると毒性の高い硫化水素を発生する可能性がある[7]。それに比べ転炉スラグは製鉄産業で排出される副産物で、その用途開拓が求められている。また日本ではケイ酸カルシウムの他に、マンガンなど微量元素を含むことから肥料として活用されているので乾燥地や施設園芸で発生する塩害抑制とともに増収も期待できる。製鉄産業が世界各地に存在することを考えると[8]、資源の有効利用という意味から私たちは転炉スラグを用いた石灰層を推奨する。

圃場への適応を図 16 に示したが、簡易な方法なので現地の人たちで施工可能だと考える。なお塩類集積を抑制できる期間については、実験期間が半年程度のため詳細はまだ確かめられていない。しかし転炉スラグの主成分であるケイ酸カルシウムは徐々に溶出することから、長期間の効果が期待できる。現在、Ca の溶出量から推測できないか検討している。また大量の水で土壤の塩類を洗い流すリーチングによる高濃度 Na を含んだ排水が問題となっている（図 17）[9]。これは本技術でも同じである。そこで暗渠排水から排出される Na を含んだ水を想定して三和土や土壤で吸着する実験も行った。実用化試験はまだ行っていないが、下流の塩害を軽減できる可能性があり、今後も研究を継続していきたい。

現在、世界中で気候変動による気象災害が発生している。日本においても大型台風による高潮で塩害が起きているため、簡易な方法で塩害抑制ができるこの技術の実用化を目指したい。そして農業高校生の視点でこれからも持続可能な食糧生産のため活動を続けていきたい。

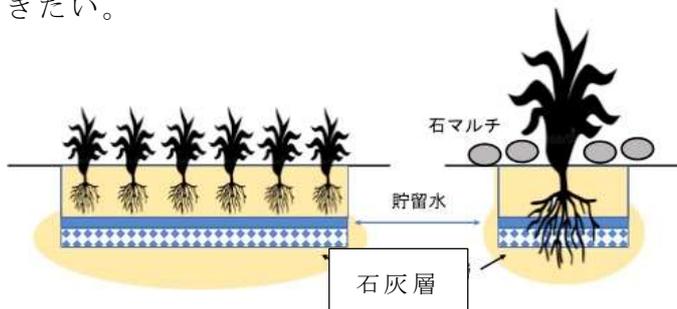


図 16 圃場での適応イメージ



図 17 暗渠排水から排出される塩水

5 参考文献

[1] Soil Salinity: Historical Perspectives and a World Overview of the Problem
https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-96190-3_2

- [2]ウズベキスタンにおける塩害農地の除塩対策（リーチング）の現状
http://www.jiid.or.jp/ardec/ardec45/ard45_key_note2.html
- [3]助演における石灰質資材施用の効果
<https://www.pref.miyagi.jp/uploaded/attachment/200648.pdf>
- [4]転炉スラグの農業利用技術の開発と普及
http://jppa.or.jp/archive/pdf/70_04_01.pdf
- [5]土のキャピラリーバリア機能を利用した雨水資源の保全・活用技術の開発
<https://agriknowledge.affrc.go.jp/RN/2030811617.pdf>
- [6]農地への海水の流入が農作物に及ぼす影響とその対策
<https://www.pref.kagawa.lg.jp/documents/12288/engai.pdf>
- [7]水に親戚した石膏ボードからの硫化水素発生
https://www.jstage.jst.go.jp/article/jswmepac/18/0/18_0_278/_pdf/-char/ja
- [8]主要国の祖鋼生産量
<https://www.nipponsteel.com/factbook/13-02.html>
- [9]塩害軽減のための浅層暗渠排水
https://www.jircas.go.jp/sites/default/files/publication/manual_guideline/manual_guideline--_58.pdf