

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. はじめに

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(表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1)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

一般的な除塩技術にリーチングとスクレイピングがある。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。しかし乾燥地は、洗い流す大量の水の確保が難しい。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な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。

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

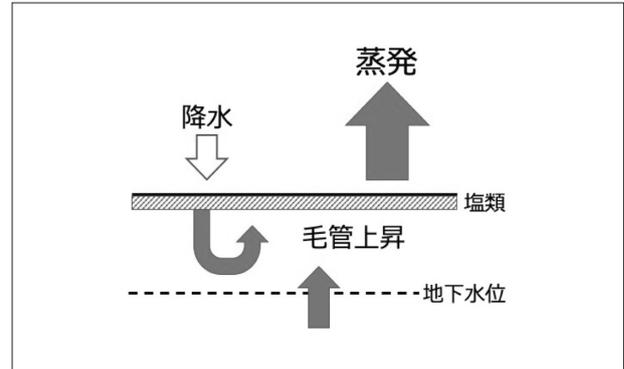


図1 塩類集積が起こる土中水の動き

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2)を精製水50mlが入った容器に5g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。

(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。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 (47%)	ケイ酸カルシウム、酸化カルシウム、鉄、マンガン他 [4]

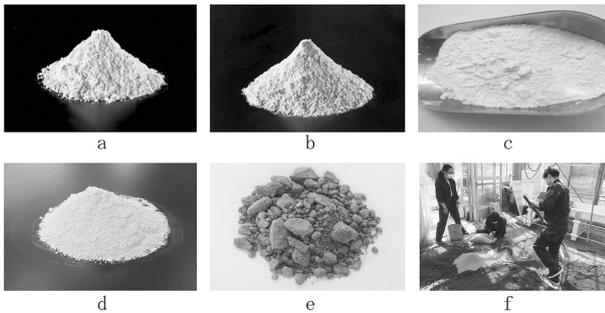


図2 石灰質資材 (a: 消石灰 b: タンカル c: ケイカル d: 石膏 e: 転炉スラグ) とf: 塩害土壌作成の様子

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3cm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3cm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5cmに毎日100ml、パナソニック社自動灌水装置EY4200で供給する。
- ⑤Control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る技術である。実験装置と石マルチは図3の通りである。

- ⑥1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。

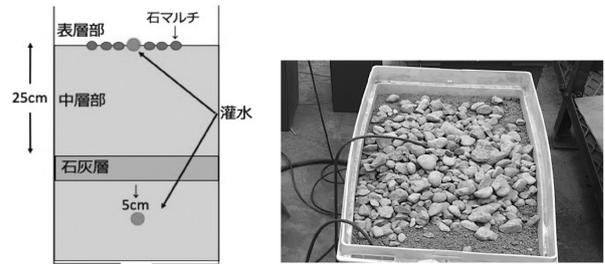


図3 抑制試験装置

(5) 実用化試験

ガラス温室の地面に長さ1m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2cmの石灰層 (図4) 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5cm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。

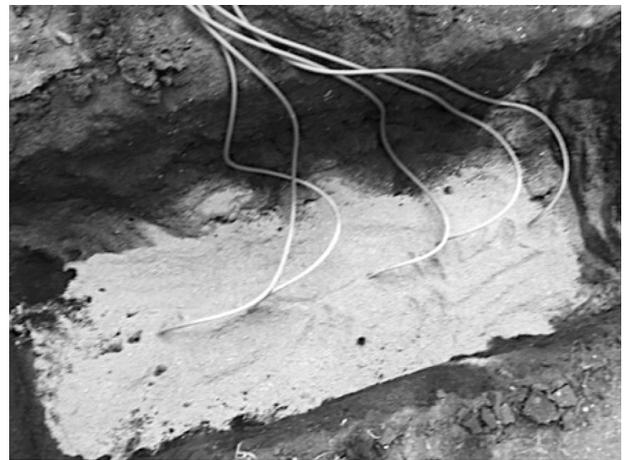


図4 石灰層

(6) ナトリウム吸着試験

- ①Ca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5cm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	ベントナイトの体積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ため、消石灰量を増やして固化させた

3. 結果と考察

(1) 試験環境

実験はガラス温室で行った。5週間の温室内の気温の推移は図5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。

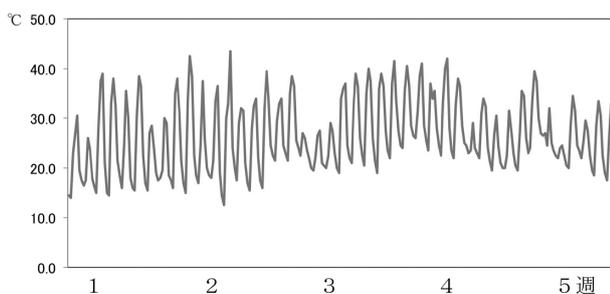


図5 温室内気温(°C)の推移

(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。

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6)。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7)。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は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。

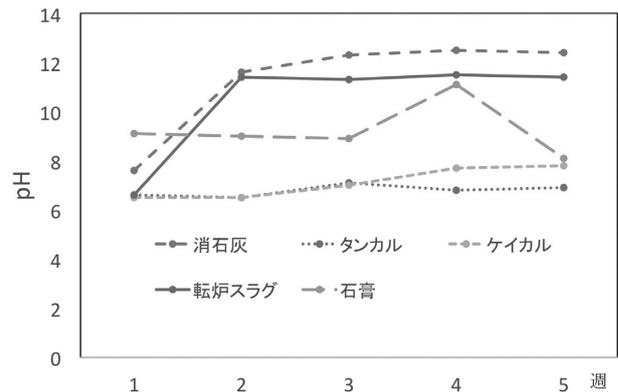


図6 pHの推移

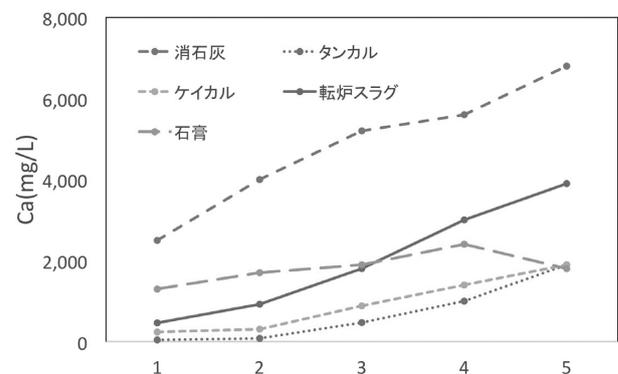


図7 Caイオン濃度の推移

(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8に示した。

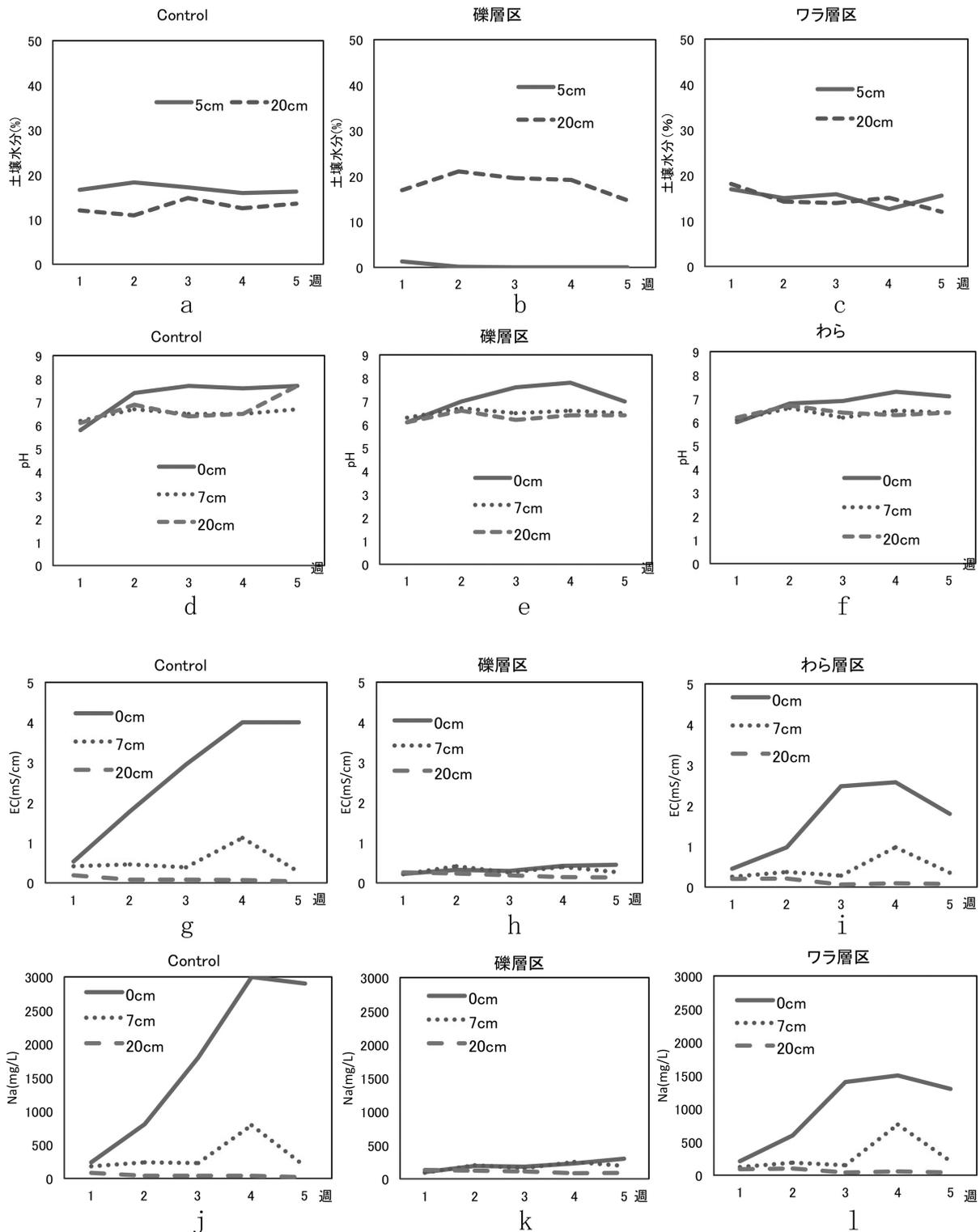


図8 5週間の土壌成分の推移 (土壌水分: abc, pH: def, EC: ghi, Na: jkl) 左からControl、礫層区、ワラ層区

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C B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、C B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壤水分を貯水し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9に示した。

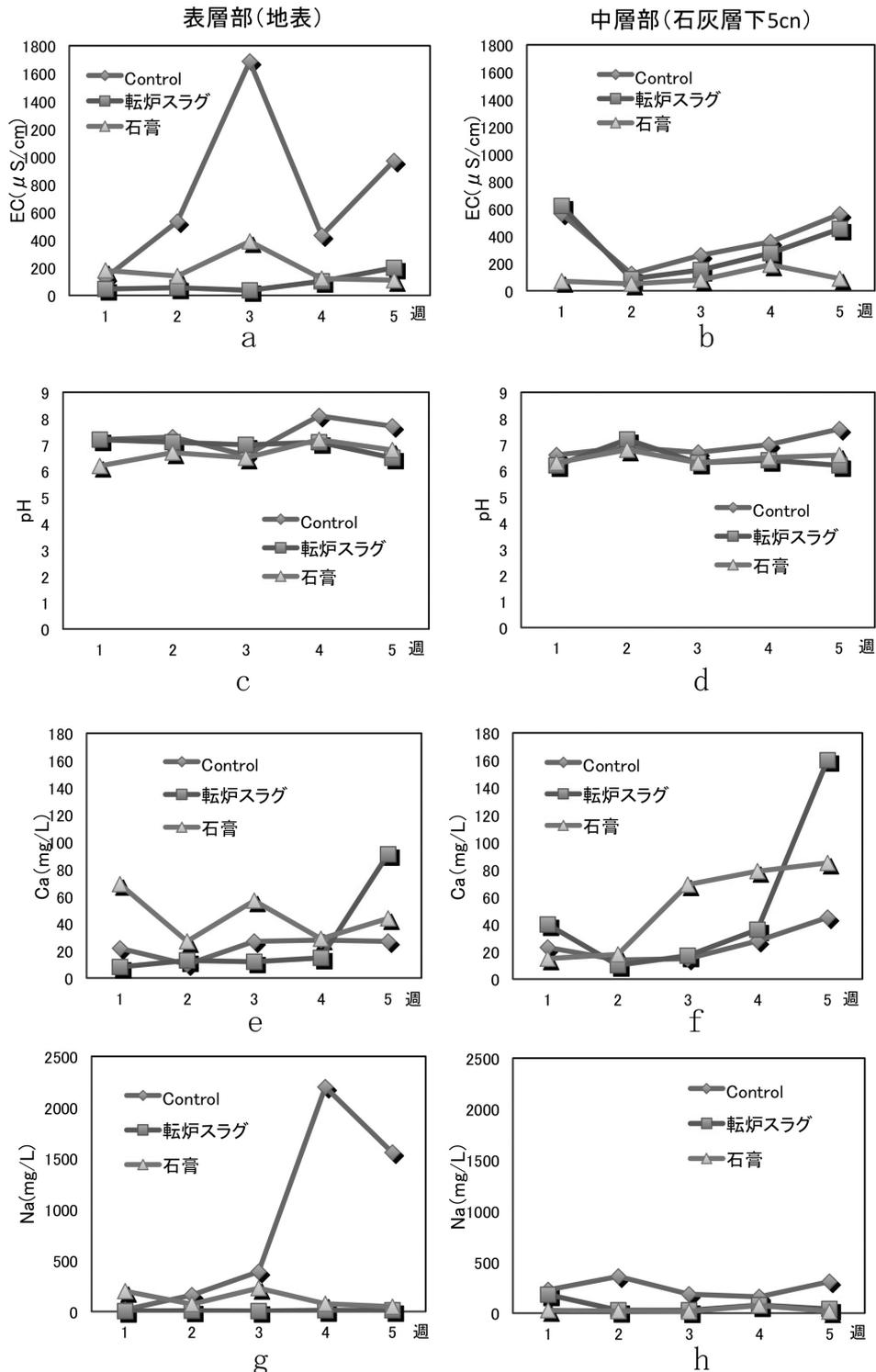


図9 5週間の土壌成分の推移 (pH: ab, EC: cd, Ca: ef, Na: gh)、左は表層部 (地表)、右は中層部 (石灰層下5cm)

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が土壤粒子に吸着されたため、大きくアルカリ性に傾かなかつ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 μ S/cmと高くなった。多くの野菜の最適ECは500 μ 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 μ S/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。

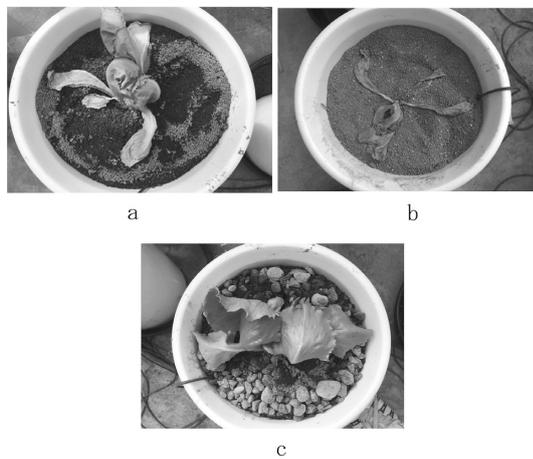


図10 レタスの栽培試験 (a: Control b: 礫層区 c: 石灰層)

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10)。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細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11)。その結果は図12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。

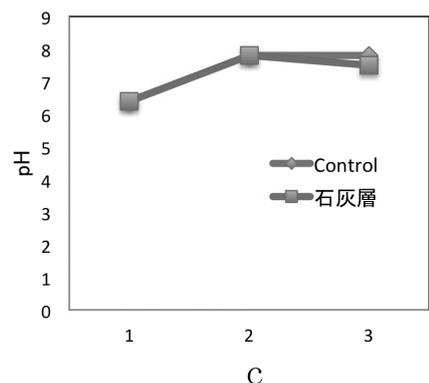
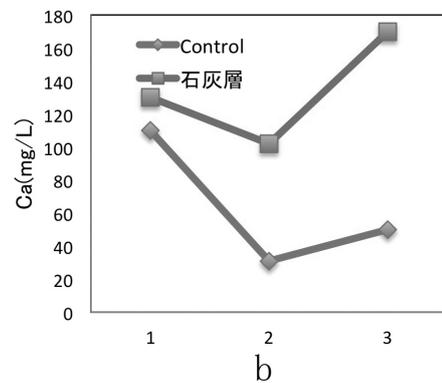
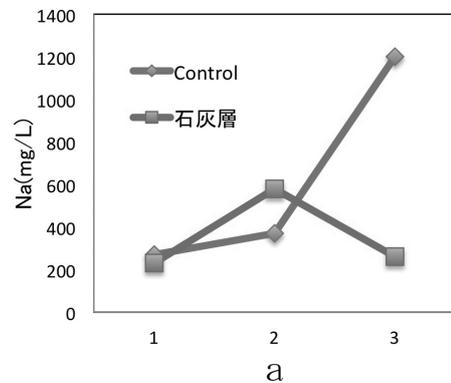


図11 温室内での実験

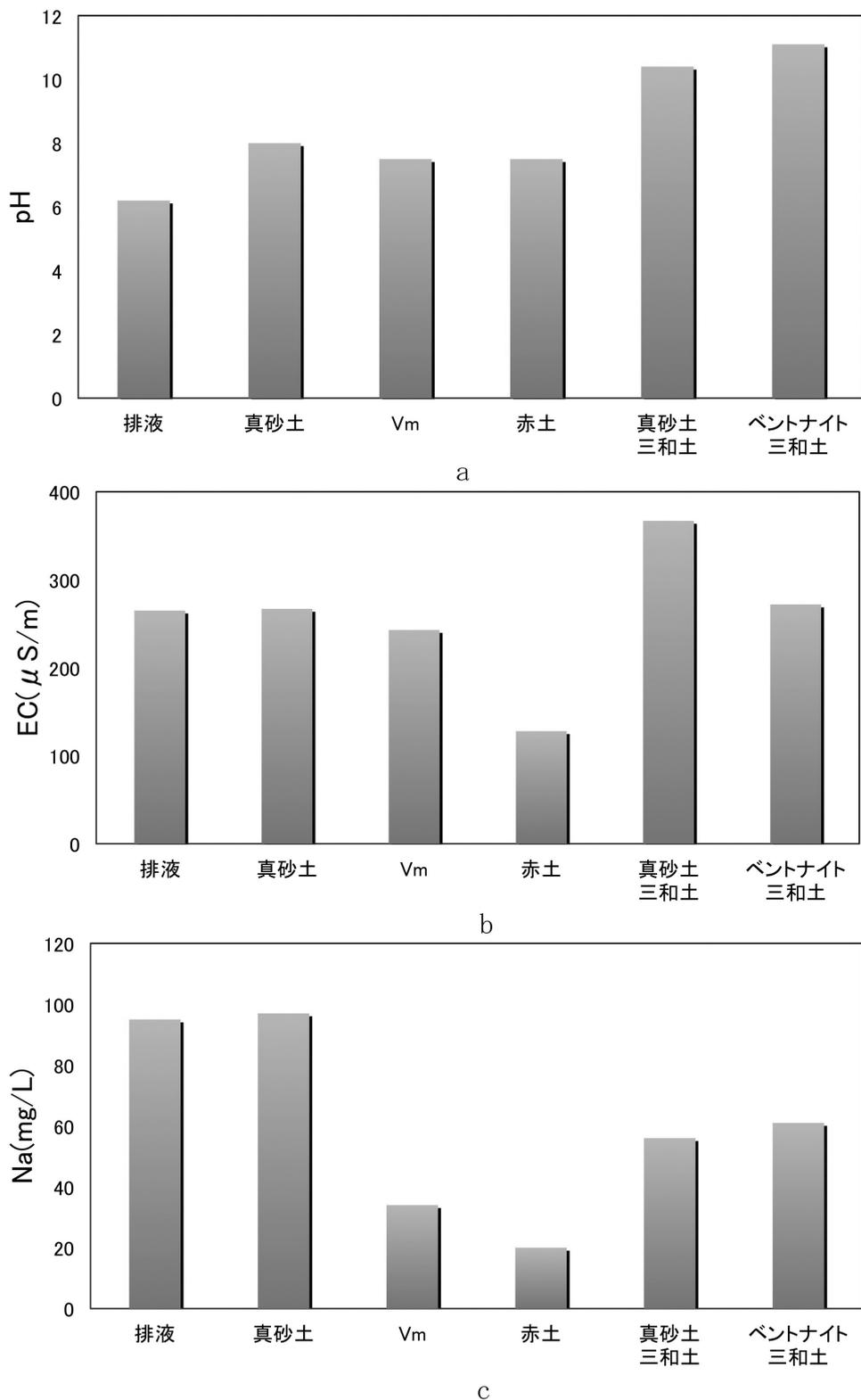


図12 ガラス温室内の土壌成分の推移 (a:pH b:Na c:Ca)

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年神奈川県の換算式Cl (mg/100g) =166×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/100g

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

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。

(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13に示した。

表6 廃液の水質

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

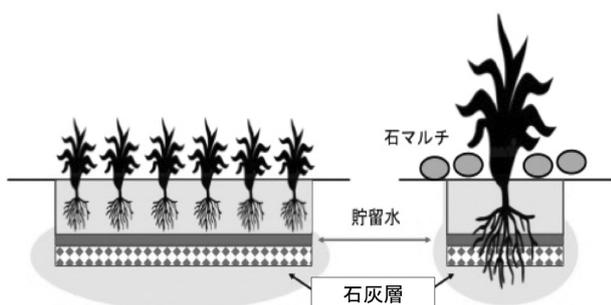


図13 塩分を含んだ廃液の浄水 (pH:a, EC:b, Na:c)

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。

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、土壌に付着している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大量の水が必要になるが、この技術を用いると土壤水分の動きだけで塩類集積を抑制できる可能性がある。つまり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。私たちは検討の結果、転炉スラグを奨励する。なぜなら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。またケイ酸カルシウムや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からである。製鉄産業が世界各地に存在することを考えると実用性が高いと考えられる。圃場への適応を図14に示したが、石灰層を設けただけでなく、表層に散布するなど簡易な方法で試すことができる。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。また従来のリーチングではNaを含んだ排水が問題となっている。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を含んだ水を三和土や土壌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。

青森県立名久井農業高等学校
Flora Hunters