

助成番号 9913

## 塩類動態に基づく環境土地利用計画に関する研究

助成研究者：安富 六郎(東京農業大学 地域環境科学部)

共同研究者：穴瀬 真(東京農業大学 地球資源環境研究センター)

渡辺 兼五(東京農工大学 農学部)

東城 清秀(東京農工大学 農学部)

三原 真智人(東京農業大学 地域環境科学部)

チャイナム(タイ土地開発局技官)

カン・ヤクバ(東京農業大学 地域環境科学部)

本研究は3つの部分から成り立っている。第一はタイ現地の水位観測。第二は毛管水の移動実験。第三はその数理モデル化、および、土地利用図の作成への試みである。

## 1. 地下水位変化による土壌の塩性化の測定

東北タイでは塩性土壌が発生しやすい。コンケン周辺で地下水の年間変動を測定した。この水は塩分濃度と共通の濃度を有すると考えられる。地下水の測定は水圧測定管(ピエゾメータ)によった。その結果、年間を通じて平均地下水位が2mよりも浅くなると平均塩分濃度(EC)は急激に上昇することがわかった。これは塩分が表面で濃縮された結果である。水位の低いところでは、毛管水の表面上昇が表土に達しにくく、表土の塩性化は起こりにくい。地下水位が1m未満のところでは毛管上昇速度も大きく水分供給が著しいので、容易に発生すると予測される。このような場合に毛管水切断で土壌の塩性化を防ぐことができる。アフリカや中近東の乾燥地域でみられる混農林業は植物によって塩分上昇を抑える機能を利用した栽培法と考えられる。このような機構を明らかにして環境に適した土地利用を検討することがこの研究の目的である。

## 2. 毛管上昇切断の実験と塩分濃縮モデルの作成

木綿繊維を用いて人工の植物根群を作成し実験を行った。シリンダーに充填された砂層内部に地下水面から一定の高さで木綿繊維による人工根圏を作った。この人工根圏において土壌内の水が木綿繊維に吸収される。この繊維の他端を吸湿瓶内に導き、吸収された水分量を計測した。一般に根圏が最終毛管高さに比べ低い場合、その場所での水分移動フラックスは大きく、毛管上昇の切断は困難である。しかし根圏が毛管上昇限界高さ付近ではフラックスは小さいので根圏における水分吸収により毛管上昇流を抑えることが可能であることが分かった。また、適切な植生をどの程度の密度で植えれば塩分上昇を抑えられるかについて考察した。

## 3. 土地利用図の作成

塩害は表層土における地下水からの塩分供給によるものと仮定し、塩類蓄積の機構を数理モデルを用いて解析した。この数理モデルにより水位の変化に伴う塩分上昇のレスポンスの時間算出が可能となる。地下水の高さの変動状況やその速度が分かれば地下水位コントロールの精度を高めることができる。毛管上昇に伴う塩害の防止法の一つとして地下水位の低下があるが、このほかに毛管水上昇の限界高さ付近では根圏によって毛管を切断できると考えられるので、複合栽培形式の導入は塩分集積防止対策に役立つであろう。さらに、地下水位地図から塩害対策のための土地利用図を作れることが明らかになった。



助成番号 9913

## 塩類動態に基づく環境土地利用計画に関する研究

助成研究者：安富 六郎 (東京農業大学 地域環境科学部)  
 共同研究者：穴瀬 真 (東京農業大学 地球資源環境研究センター)  
 渡辺 兼五 (東京農工大学 農学部)  
 東城 清秀 (東京農工大学 農学部)  
 三原 真智人 (東京農業大学 地域環境科学部)  
 チャイナム (タイ土地開発局技官)  
 カン・ヤクバ (東京農業大学 地域環境科学部)

## 1. 研究目的

水資源の枯渇と質の低下は世界的に大きな問題となりつつある。その場合、常に土壌の塩類化防止の方法が最大の課題となる。

乾燥地例えば東北タイでのコンケン、およびアフリカのモーリタニアなどでは、地下水塩分による表層土壌の塩類化が農業生産の大きな障害になっている。塩分の上昇を少なくするには作物の複合栽培が経験的に優れていると言われている。アグロフォレストリーによる樹木と牧草との複合栽培方法では上層に存在する水分はおもに上方の作物に利用され、下層の水分は下層にある根群に利用され、相互に補完的な水分の効率よい利用がみられる (Lovenstein1989)。しかし、その栽培技術は経験的なものに止まっている。ここでは地下水の変化による土壌の塩分増大の過程を実測し、土壌塩分集積の防止のための2層根圏利用の可能性と塩類動態に基づく複合栽培のための土地分級の研究を行った。

## 2. 研究方法

①研究は現地の地下水の変動観測および②それから得られた結果に基づいた地下水位の毛管上昇のコントロールの室内実験を行った。さらに③それらの結果を解析して地下水の影響を考慮した土地分級方法を提示した。

## 3. 結果と考察

## 3-1 現地観測の結果と考察

現地観測の事例としてタイのコンケン南西約30kmに設けられた波状の地形の周辺地域には多くの塩類化土壌や非塩類化の土壌が地域の地形に関係して分布している。この地域には塩類化土壌の多くは低地にみられる。年間降雨は935mmで雨季には低地多くが洪水領域に入る。乾季には地面からの水分蒸発が盛んであり、調査地域での年間蒸発量は2020mmなので降雨量の約2倍である。標高(海拔)は164m~209mにあり、波状地形地域では乾季の地下水の浅いところでは表層に塩類が最も多く集積する。地下水は季節的に変化するが、場所による年間変動の地区格差が大きい。このため、画一的な大規模土地利用開発は難しく、むしろ地形に合わせた小規模水資源開発(SSD)が適切とされている。台地には通常は畑地利用で、ユーカリ、キャッサバなどが栽培される。低地は水田となっている。このような地形に約36箇所の地下水観測のためのピエゾメータを設置した。設置された場所は地形に応じて選択され、約5km×5kmの範囲に36箇所である

(タイ土地開発局)。

i) 地下水上昇による土壌の塩性化の測定

砂質土壌では土壌水のECはその土の間隙に存在する水のもつECにほぼ近いと考えられる。ここで測定されるEC値は現地での地下水観測の年から3年間の塩分濃度を示すECの経年変化を観測した。

ii) 年次別にみるEC変動

図1に示されているように初年度(1996)のEC値は1年経過後(1997)に初期濃度の数倍に上昇する。とくに地下水位面が地表面下2mよりも浅いところでは塩分濃度上昇の傾向が強く現れる。これに対して2m以下の深いところではほとんど濃度上昇は見られない。2年後(1998)には前年に比べ大きな変化は見られないが、わずかの事例をのぞきほとんどが若干の増加傾向を示している。図1全体に増加の傾向にあることがわかる。

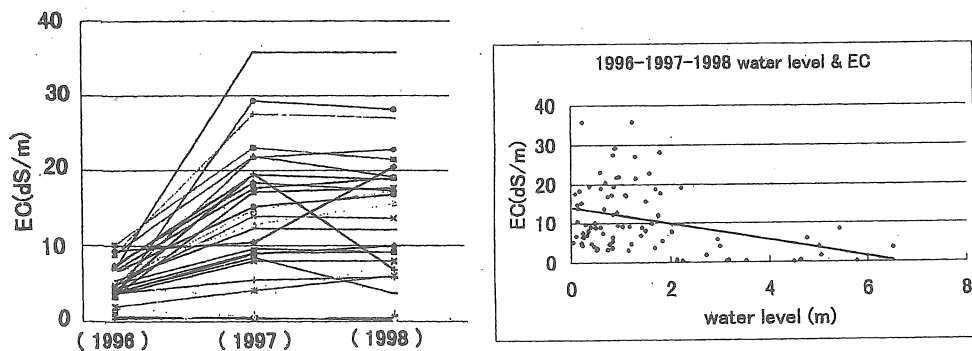


図1 年度別にみた地下水のEC値変動 図2 年間の平均地下水位(m)に対するEC値(平均)の分布

iii) 各観測点の3年間の平均地下水位と各年次のEC値の変動

3年間の平均地下水位とその3年間の平均ECとの関係を(図2)に示した。年間を通じて平均地下水位が2m以下と浅くなると平均塩分濃度(EC)は急激に上昇することがわかる。このことは地下水に含まれていた塩分が表面で濃縮されて濃度を高めた結果であると考えられる。地下水位の低いところでは、毛管水の表面上昇が地表に達しない限り土壌の塩性化は起こりにくいことを示す。とくに地下水位が1m未満まで高まったときには表層は毛管上昇圏内となるので塩分水供給が著しく、表土の塩集積が容易に発生すると考えられる。この場合、塩分の毛管水切断ができれば、塩類化防止ができるので土地の有効利用が可能である。乾燥地域でみられる2層根圏の栽培は植物による塩分上昇を抑える方法がどの程度適用可能かについて考える。このためにさらに、室内実験による確認が必要である。

3-2 切断層による毛管上昇水の抑制実験の結果と考察

3-2-1 ガラスビーズによる実験

土壌中の塩類化を防ぐために暗渠が用いられることがある。しかし暗渠では敷設密度がかなり高くない限り、毛管上昇を防ぐことができないと考えられる。毛管上昇を遮断するために砂などの粒径の大きい粒子を毛管上昇高さ以上の厚さで層状に敷くことが考えられ

るが、少なくとも粗粒径のものが必要となる。

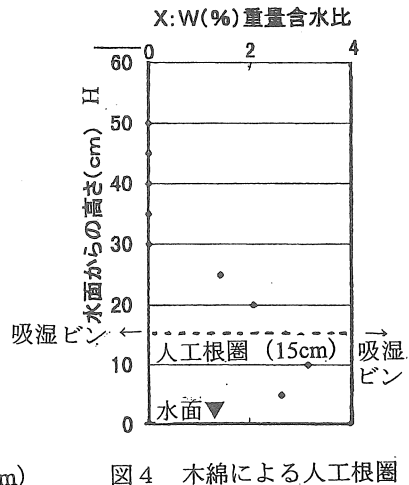
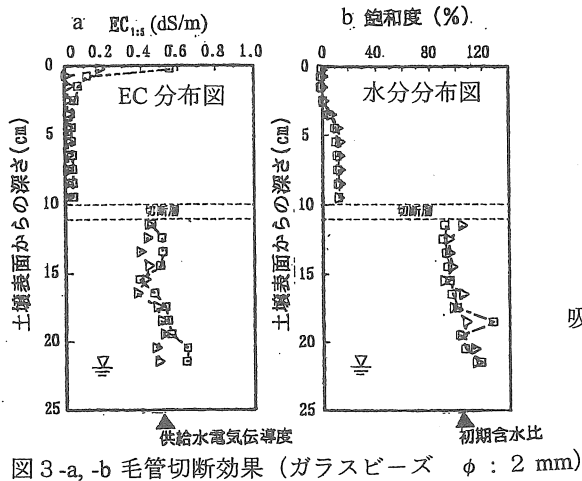
シリンダー(φ=10cm)高さ25cmに標準砂(表1)を充填し、その一部に粒径2mmのガラスビーズをつめた層(厚さ1cm)を地下水面より10cmの高さに設置した。シリンダー下方より塩水を毛管上昇させ、毛管上昇がほぼ平衡に達した段階で各層のECを測定しその分布を図示した。砂層によってはほぼ完全に毛管の切断が行われていることが分かる(図3)。なお切断層を設けない場合の毛管上昇高さは25cmであり、毛管上昇先端は完全にシリンダー上端まで達している。

表1 標準砂の粒径組成

粒径(mm)	0.0052	0.074	0.105	0.250	0.425	0.850	1.0
累積重量%	0.0	0.189	2.313	91.545	99.99	99.99	100.0

表2 砂柱充填の状態

含水比	粒子比重	充填密度	間隙比
0.0274%	2.627	1.58	0.663



### 3-2-2 人工根圏による実験

地下水の上昇を抑えるために植物の根圏を有効に利用するために人工の植物根群を作成して木綿繊維を用いて作成し実験を行った。

この木綿繊維による人工根圏は土壌内の毛管水を吸収し、その吸収された水分は繊維内を移動する。この繊維の他端を吸湿剤を入れた吸湿瓶内に導き、吸収された水分の移動が計測できる(図4)。

ランプ芯で作成した人工根をシリンダーに充填した砂層内部に水平に埋める。この状態

表3 毛管上昇過程における高さHの水分上昇（図4）  
フラックス q（標準砂と細砂）

	Hcm	flux q(cm/sec)
標準砂	23cm	$1.9 \times 10^{-5}$
細砂	52cm	$2.9 \times 10^{-5}$

i) 毛管上昇領域内に人工根圏を設置した場合

地下水面からの毛管上昇による量フラックス q は人工根圏によって  $2.3 \times 10^{-8}$  m/s 程度が吸収出来るにすぎないことが計測された。

一方、表3に示されるように毛管によつての上昇水分フラックスは  $1.9 \sim 2.9 \times 10^{-5}$  cm/s であり、毛管による水分上昇を完全に押さえるには、この人工根圏の吸収能力を実験に用いたものの1000倍程度に増さなくてはならない。したがってこのような方法での毛管水上昇過程での土中水分変化を抑えることは出来ないことがわかった。

ii) 毛管上昇領域外に人工根圏を設置した場合

水分移動は蒸発散によつてのみ行われるとした場合に人工根圏の効果を検討する。毛管上昇時に、測定された水分移動を解析した結果、このような場合では 2 mm / day 程度の毛管上昇を抑えることはできるが、通常 7 mm/day もある乾燥地の蒸発散量を押さえることは難しいことがわかった。しかし適切な作物を用いることによつて吸水能力の高い根圏域を形成できれば切断効果はある程度は可能性であると計算でききる。毛管上昇量を根圏でカットオフするに要する根圏の吸水能力が分かれば、実際の植生による場合、どの程度の栽植密度によつて塩分上昇が抑えられるかを試算できる。毛管上昇域外の場合には塩害に強い作物を栽培すれば、その根圏による水分吸収量だけ塩分上昇への抑制効果はあると思われる。今後、実際の植物を栽培しての実験が必要である。

#### 4. 塩分集積機構の解析

塩害は表層土の塩分蓄積が地下水からの供給によるものと考え、その蓄積の機構を数式と機械モデルを用いて検討した。塩害の防止には地下水の上昇を抑えることが重要であることが実験的に明らかにした。

##### 4-1. 塩分の土壌中の蓄積の要因

要因は主に毛管水の上昇による塩水の供給速度、および蒸散速度 (Et) にある。この両者の因子は地下水位の深さ (Z) に関係がある。毛管水が上昇する高さは、毛管水を昇させる間隙分布の幅が狭いときは明瞭に一つの値として高さが決まるが、土粒子構成の粒径分布幅が大きいときは毛管上昇高さはそれぞれの径のよつて異なるので境界面は拡散的であり、一つの値として決まらない。

タイの実測例に見られるように、毛管水の先端が地下0~2m層内に達するとき表層土の塩分集積に大きな影響が見られるように、毛管水の顕著な影響圏内にある場合には、土壌内の塩分濃度は急速に上昇すると判断される。しかし2mよりも深い領域では蒸発による塩分の大きい濃度変化はなかったことから、明確な2つの領域すなわち毛管領域内（図

5参照) と毛管領域外では塩分集積の挙動が大きく変わると判断される。

室内実験では標準砂を用いて行い15日放置後の塩分集積について調べた。表3に見られるように毛管上昇の高さは水面より26cm程度であり、それよりも高いところでの塩分集積は激減することが実験的に測定できる。

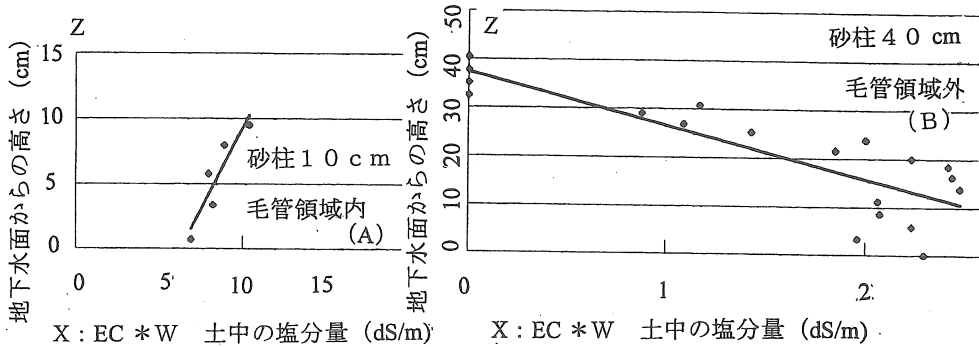


図5-a,b 毛管上昇領域内と外における塩分集積状態(15日放置後)

- a 毛管水領域内 (砂柱10cmの場合) (A)
- b 毛管水領域外 (砂柱40cmの場合) (B)

4-2 蒸発量と塩分蓄積

蒸発散は地下水からの供給塩分を濃縮させるが、雨水は希釈させる。塩分集積は平均的には蒸発散量が雨水と灌漑水供給量を上回る時に発生しやすいと考えられるので、ここではその差し引きされた蒸発散のみを因子と考える。地下水が上昇する時は塩分供給はプラスであるが、下降する場合はマイナスとなることも考えられる。しかし地下水表面からの毛管高さは地下水の下方に移動する時に、必ずしも追従した挙動をとるのでなく、おおくの場合は宙水のようにその位置に残される。従ってその塩分の蓄積のごく一部しか持ち去らない。ほとんどの量はそのまま不可逆的に残される。

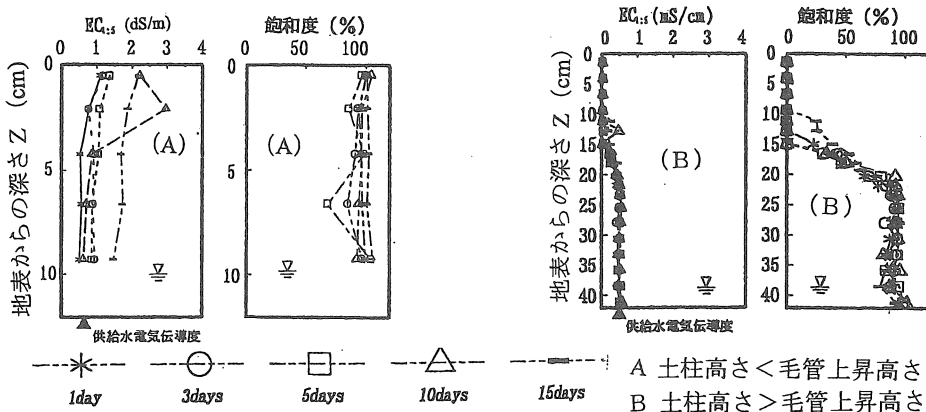


図6 地表からの深さ (Z) の EC1:5, 土壌水分 (飽和度) の時間変化

タイ、コンケンの事例では地下水位の年間変動の最大値は乾季と雨季では20m以上あることもあり、最小でも実際には年間の地下水の変動は数mあることが実測されている。

したがって毛管水の上昇先端が地表下1m以内に進入してくることがあれば、毛管上昇高さは粒径が細かければ1m以上は容易に上昇することが考えられる。このような場合その表土層内での塩分集積が進行する。塩分移動速度は蒸発速度に密接に関係している。

図7-1に示されるように蒸発散(Et)(この場合は蒸発)は地下水位と密接な関係がある。地下水位が地上面(GL)から低下するほど、すなわち深くなるに従ってEtは減少する。Etには3つの領域についてそれぞれ異なった変化がある。①地下水位が地上面GLにあるとき最も大きい。GLからの距離Zの増加にしたがってEtは減少する領域=毛管上昇領域内(A)。②Zが十分増加する(地下水面から離れる)とEtが著しく減少する領域=毛管上昇領域外(B)。さらに③(A)と(B)領域の中間領域として遷移領域(I)がある。この遷移領域とは毛管上昇の限界を示す領域であり、土粒子径の分布領域が幅広いほど(I)領域の幅が大きくなる。砂層ではこのようにEtを抑えることが塩類集積防止に必要であるから、いかにして地下水位を低め、土地利用期間中に(A)領域のみに維持するか重要となる。

#### 4-3 毛管上昇の速さ

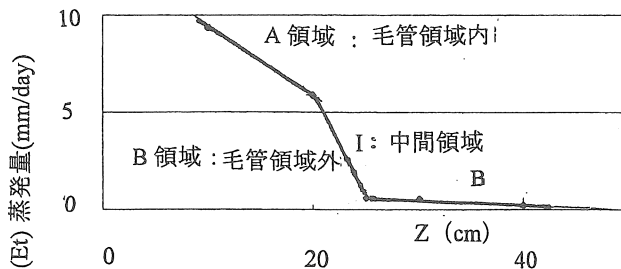
##### i) 1日以内の短時間内毛管上昇の速さについて

この場合毛管水の上昇段階では含水比(W)、および土壌のもつ換算電気伝導率(EC)を平均的な値(定数)とすれば、砂質土では24時間で最終高さの85%以上が上昇する。全体の完了時間が7日以上要することから、この1日は全体のタイムスケールから見ると比較的短時間の領域に属するであろう(図6)。

##### ii) 1日を越えた場合の緩やかな毛管上昇について

毛管が90%程度の上昇を終えた段階ではWは高さZに関してほとんど一定である(図6、7-2)。塩分増加は蒸発・蒸散によって起こるが、実測における表層の変化について、毛管水の上昇範囲外にある領域(B)は、そうでない毛管上昇範囲内にある領域(A)と比

#### 4-4 地下水位による蒸発量Etの変化



(Et) 蒸発量(mm/day) の (Z) 地表からの深さ(cm)

A 毛管領域内の場合 Et と 地下水位

B 毛管領域外の場合 Et と 地下水位

図7-1 地下水位と蒸発(散)の関係

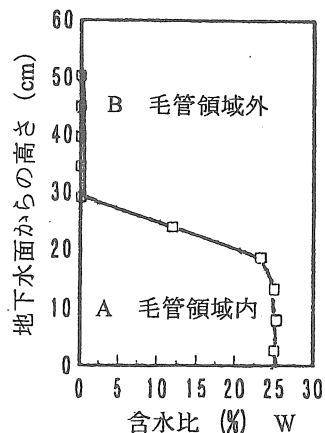


図7-2 毛管水領域内外の水分分布



べてきわめて少量の水分損失があるのみである。(A)領域にあるか、(B)領域かは地下水位と粒子特性によって決まる。したがって地下水位の管理は塩類化防止に重要な意味を持つ。(A) 領域と(B) 領域の蒸発比率は約10 : 1以上と大きな差がある。

地下水位変動によって生ずる時間当たりの塩分供給量は含水比の変化速度に関係深い。毛管上昇における含水比の時間変動分は塩分濃度拡散項(拡散移動)とダルシー則による移流項(移流移動)の加算として表される。図に示されるように室内実験の実測によると、地下水面の変化における土壌表面からの水分移動速度、すなわち蒸発散は平衡に達すると、塩分集積は時間とともにほぼ直線的に増大する。すなわち塩分増加の時間割合は一定であることが実験的に確かめられる(図8)。

#### 4-5 塩分集積の数理モデル

砂質土壌の塩分移動・集積の方程式は体積含水率  $\theta$  が一定の時次式で示される。

$$\frac{\partial (C \theta)}{\partial t} = \frac{\partial (D \frac{\partial C}{\partial Z} - qC)}{\partial Z} \quad (1)$$

但し C : 溶液濃度、  $\theta$  : 体積含水率、 t : 時間、 D : 濃度拡散定数  
 Z : 土壌の垂直方向距離、 q : ダルシーの式による流束(フラックス) この場合定常流で const. 実験のグラフから  $\frac{\partial C}{\partial Z} = \alpha$  したがって右辺の第1項はZでさらにZで微分するから0となる。第2項はqが連続であるから一定であるから、  $\frac{\partial qC}{\partial Z} = K$  とすれば。

$$\frac{\partial (C \theta)}{\partial t} = K \quad (2)$$

したがって  $C \theta$  は時間にしたがって増大する。すなわち土壌塩分の増大は、時間経過にしたがって増大する。増大の傾きは毛管水領域内(A) と外(B)では異なり、高さにたいする増大の程度は(A)  $\gg$  (B) である。時間経過が短ければ塩分集積も少ない。年間を通して(A) の状態(図7参照)どのくらいの累積時間  $\Sigma \Delta T$  あったかが算出されれば、地域の年間塩分集積量  $(EC \cdot W)$  が計算できる(図8)。土地利用管理にはこのようなデータがあればその利用価値は高い。

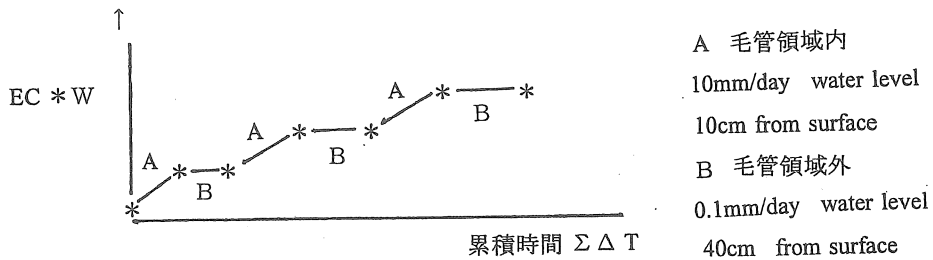


図8 塩分集積の時間による変化

以上の調査実験から次のことが分かる。

塩類の土壌への供給は地下水から行われるが、その影響は地下水が浅くなるに従って表層土に大きな影響を与えると考えられる。とくに1 m以内の浅い地下水はその毛管水上昇によって表層土を急速に塩類化させる。このようなことから地下水位の分布地図を作成して、その水位が地上から十分に低い地帯、表層に近い地帯に区分することが、塩類か対策として利用できると思われる。

### 5. 土地利用管理のための土地分級

地下水位の状態を土地分級の指標にすることは、塩害防止策として、有効である。いま、地表面から1 m以内の層に、地下水位からの毛管上昇先端が到達しない土地では塩の地表での集積は起こらないと判断できる。もし上昇してもその経過日数が少ない場合は、塩分の集積はその滞在日数に比例するので、その年間の積算蓄積量が算出できる。このような毛管水の上昇によって塩分集積量の分級を基礎にした土地分級が可能となろう。

塩分蓄積のリスクの高いところ、低いところなど、状態に応じた塩害防止の最も適した対策が考えられる。植生の根圏を用いる方法も条件さえ整えば適応できるであろう。次はその1例とした組み合わせ例である。

表4 年間の塩分蓄積量からの土地分級表例

	切断層	根圏による抑制
Type A	○	×
Type B	×	○
Type I	△	△

- 効果あり
- × 効果なし
- △ あまり効果ない

Type A :  $EC * W * \Sigma \Delta T > \text{作物栽培に支障がでる量}$ 。  $\Sigma \Delta T$  : 年間に毛管水の影響を大きく受ける積算時間

Type B :  $EC * W * \Sigma \Delta T < \text{作物栽培に支障がでる量}$ 。

Type I : A,B の中間

### 5. まとめ

砂質土壌では地下水の上昇は急速であり、一旦上昇が起こると地下水位を下げててもその影響が残るので、塩類化を防ぐには毛管の上昇の切断を行うことが望まれる。地下水位低下を促進する排水機構が必要である。

地下水上昇の上限によって強く影響される土層では根圏による塩分制御を利用する複合栽培は必ずしも有効でなく下方に毛管切断層を設ける必要がある。しかし地下水からの毛管上昇の影響を大きく受けない層においては根圏の適切な配置（種類、栽植密度）によって

下方からの塩分の移動を抑制できると思われる。地下水位管理が塩類化防止にもっとも重要である。

#### 6. 今後の研究の展開

以上の調査および考察から、さらに実際の圃場での地下水位と蒸発散の関係をさらに明確にして塩害防止のための土地利用図およびその調査方法のマニュアル作成が望まれる。

#### 引用文献

1. H.M. Lovenstein, P.R. Berlimer and H.van Kenlen:Runoff Agriculture in Arid Land ; Coference on Agroforestry,Principles and Practice, July 1989 Edingurgh
2. 中村 友紀 土壌中の塩類移動に関する研究 東京農工大学農学部修士論文 1994
3. E. Bresler, B.L. MacNeal, D.L.Carter ; Saline and Sodic Soils, Springer-verlarg pp119 (1982)

### Environmental Land Use on the Basis of Saline Water Content in Water Table

Rokuro YASUTOMI	Faculty of Regional Environment Science, Tokyo University of Agriculture (TUA)
Makoto ANASE	Tokyo University of Agriculture
Kengo WATANABE	Faculty of Agriculture, Tokyo University of Agriculture and Technology (TUAT)
Seisyu TOJO	Faculty of Agriculture, TUAT
Machito MIHARA	Faculty of Regional Environment Science, TUA
Chaiyanam Dissataporn	Land Development Department of Thailand
Kane YACOUBA	Faculty of Regional Environment Science, TUA

#### Summary

##### 1. The measurement of water table level and its quality through the year around.

The north-east Thailand is in the region of sodic soils. The sodic soil is generated by the capillary water rising and condensing in soil surface. Khon-Kaen district produces a lot of soils affected by salinity. The salinity concentration of water table and their levels will represent the state of soil salinization. The Electric conductivity values of the water were measured with piezometer for several years near by this area. The water levels and EC values had a big change, season by season. The mean values of EC and water level show simple curves, that is, the lower the water level is, the lower the salinity. To prevent salinization, this result shows that the cutting of capillary water rise by roots will be possible except in strongly governed layer by the capillary water. Water table less than 1 meter from the ground level will be in the area much affected by salinization. The economical way for protection against salinization will be the cutting off of capillary movement by plant roots. A crop with deeper root zone can intercept the saline water rising and protects a crop with shallower root zone in the multi- crop cultivation

##### 2. Experiment of capillary cutting off

An artificial roots connected to desiccator bottles to absorb capillary water was made using the cotton fibers of many candle wicks. The artificial roots system was prepared for absorbing the capillary water. The root was set in sandy soil at several height above the water level. The uptake absorbed by the root was a small amount of water in total, so that it was not enough to intercept the capillary rising when the rate of water transferred by capillary movement was high. This method of capillary cutting off by roots will be only available to the water flux of capillary rise is rather small. The cutting effect will be only expected at the top layer of maximum capillary rising. This investigation will show the possibility of the multi-crop cultivation to prevent the soil from salinization.

##### 3. Analysis of salinity condensation in the surface soil and making a soil classification map using EC values.

A material transfer model was proposed to investigate the salinity condensation dynamism in the soil- water system. This model predicts what change of the salinization will be going on in the surface soil. Finally The study shows us that a soil classification map for environmental land use of agriculture can be made using the relation between EC and ground water level.