

報 文

乾燥地土壌におけるナトリウム、カルシウムの輸送と集積

松 本 聡\*

Transportation and Accumulation of Sodium and Calcium in Aridisol

Satoshi Matsumoto

Faculty of Agriculture, University of Tokyo

Summary

More than 30% of the surface of the earth consists of arid and semi-arid soils, which are generally too dry to produce good yields. If enough fresh water is available and the soil condition is suitable, these soils can be irrigated and used for arable land. These regions are therefore thought to be new promising lands for food production in the future. For this reason in past decades, much attention has been paid to arid and semi-arid soils and more agricultural development projects are being planned and carried out. However, many projects have failed in the past, and others fail even now, because some years after irrigation the salinity or alkali hazard increases.

The soil profile investigations of salts accumulation related to the depth of ground water level, some field experiments using lysimeter and model experiments in the laboratory to clarify the mechanisms of salt accumulation are illustrated in this paper.

From field investigations and lysimeter experiments of irrigated lands in Khuzistan State, Iran, the author presents the following cases to clarify the essential processes of soil salinization.

Case 1 was caused by the formation of shallow groundwater due to seepage from earth canals and intensive irrigation such as basin irrigation. This case was the most dominant to soil salinization development process in arid irrigated lands.

Case 2 was caused by the logging of irrigation water at the extremely hard pan formation under the plough layer caused by the compactness of tractor loading. This case was usually found in desalinized fields with clay-like texture. The hard pan is apt to become an impermeable layer logged with irrigation water, and provides a secondary site which functions to supply sodium salts to surface horizon.

Case 3 was caused by the addition of salts to the soil irrigated by water with high electric conductivity. Chemical analyses of the irrigation water applied to arid land in Iran, for example, showed that about 1.8kg of the total dissolved salts were contained in 1 m<sup>3</sup> of irrigation water.

Case 4 was caused by cultivation under the low leaching fraction resulting from the extremely high evapotranspiration of the dry summer. The lysimeter experiment revealed that cultivation during periods of high temperature and low humidity requires much irrigation water, as calculated by the leaching fraction, to keep soil salinity below a specified level.

The mechanism of salt accumulation in arid lands was also examined through the experimental pedology view. Experiments were carried out by using soil columns saturated with salt solution which capillary provides from the constant groundwater level. Most calcium and magnesium ions in the salt solution are adsorbed rapidly at the cation exchange sites of the soil when the solution contacts with

\*東京大学農学部

キーワード：乾燥地土壌、灌漑、ナトリウム、カルシウム、塩類集積機構

the soil. Large amounts of sodium ions, on the other hand, still remain in the form of free ions which moves easily with the soil solution. When the cation exchange sites adsorbing calcium and magnesium ions are dried out, these ions are detached from the sites and deposited on the surface of the soil column as salts. Furthermore sodium salt precipitation occurs directly from soil solution when the evaporation at the surface portion of the column proceeds.

**Keywords:** Aridisols, Irrigation, Sodium, Calcium, Salts accumulation mechanism

(Soil phys. Cond. Plant Growth, Jpn., 67, 3-10, 1993)

## 1. はじめに

およそ世界の土壌型の中で、海岸地域など特殊な塩性環境に分布する土壌を除けば、乾燥地土壌 (Aridisol) はもっとも高濃度に塩基類を土壌中に保存している土壌といえる。乾燥地土壌の母材は多くの場合、石灰と石こうに富むが、このことが必ずしも母材の特徴を示しているわけではなく、火山灰を含めてあらゆる母材の関与は考えられる。ただ、降雨が極端に少ないために、水を介しての土壌の化学的風化は遅く、気温の日較差が大きいため物理的風化が卓越して起こる。細かな粉体を呈する土壌の外観は一見、塩基の溶脱も進んだ土壌のように思えるが、塩基の大部分は土壌から洗脱されることなく、土層内に保存されているのが大きな特徴である<sup>1)</sup>。

近年、乾燥地土壌の土壌資源を対象とした砂漠開発、なかでも砂漠地における緑地開発、乾燥地灌漑農業開発は非常な勢いで展開されているが、砂漠という土壌生成的には、水の関与をほとんど受けることなく発達してきた土壌に人為的に水を導入するという営力 (インパクト) が加わると、水に可溶性塩類の行動が土壌断面を通じて急速に活発化し、塩性害として顕在化し、開発造成した地域の土壌の荒廃、さらには塩性害に基づく砂漠化を引き起こす<sup>2-4)</sup>。

ところで、乾燥地における灌漑に基づく土壌の塩性害は、灌漑によって、地下水位が上昇し、それに伴って毛管上昇する土壌水に溶解した土壌中の塩類とくにナトリウム塩、カルシウム塩あるいは地下水に含まれるこれらの塩が表層土で沈積するという機構によってこれまで、定性的に理解され<sup>5-7)</sup>、比較的単純な機作として受けとめられてきた。しかし、土壌塩性化の定量的な解析、個々のイオンの動態についての詳細な研究については意外に少ない<sup>8)</sup>。本稿では、乾燥地灌漑圃場で塩性害調査研究をより定量的な視点から捉え、さらにこの現象を塩性害発生機構の基本的法則性へと導くために、experimental pedologyの手法を用いて実験室的に解析した内容を述べる。

## 2. 乾燥地灌漑圃場における

### 土壌塩類化の発現機構の実際

#### 2-1. 灌漑水の導入で誘起される土壌中の塩の易動化

水の影響がほとんど関与することなく生成してきた乾燥地土壌に、ひとたび水が導入されると、その影響は急速にしかも明確に土壌中の塩の行動にあらわれる。土壌の塩性化の過程が地下水位の上昇、灌漑水による塩類の土壌への新たな持ち込み、圃場の水管理でどのように進行するか、現地調査をもとに述べる。

##### 1) 地下水位の上昇と土壌の塩性化

灌漑水路が土水路で施工されていたり、ファロー灌漑 (fallow irrigation) やベースン灌漑 (basin irrigation) のように一度に多量の灌漑水を供給する場合には圃場内の地下水は急激に上昇する。また、大型トラクターの踏圧により、作土直下にきわめて硬い盤層が形成され、この盤層の位置で停滞水が形成され、一時的にせよ地下水位が上昇する。

このように一次地下水位が土層の浅い部分に形成されると、地下水位面からの毛管水が表層土にまで容易に連結し、地表面の激しい蒸発散による吸引力で毛管水の上昇とともに、可溶性塩の表層土への移動集積が始まる。図1は典型的な乾燥地土壌地帯で調査した地下水位の位置と土層内に観察される集積塩の様相を示したものであるが、地下水位が70cm付近になると、極端に高い塩類土壌が生成されているのに対して、地下水位が2m以下にあるか、あるいは地下水位面より上層の部分に毛管水の上昇を切断する砂礫層のような空隙に富む土層が介在すると表層土への塩の集積は著しく抑制されることを示している<sup>9)</sup>。

図2には大型トラクターの踏圧で著しく硬化した盤層をもつ土壌断面での塩類の分布パターンと、土壌硬度計が示す土壌硬度の変化を示した。作土直下の著しく硬化した盤層の存在は灌漑水の一時的な停滞を誘起し、表層土への塩類の供給、および塩基のうちもっとも易動性の大きいナトリウムの表層土への移行が起こっていることを示している。

## 報文：乾燥地土壌におけるナトリウム、カルシウムの輸送と集積

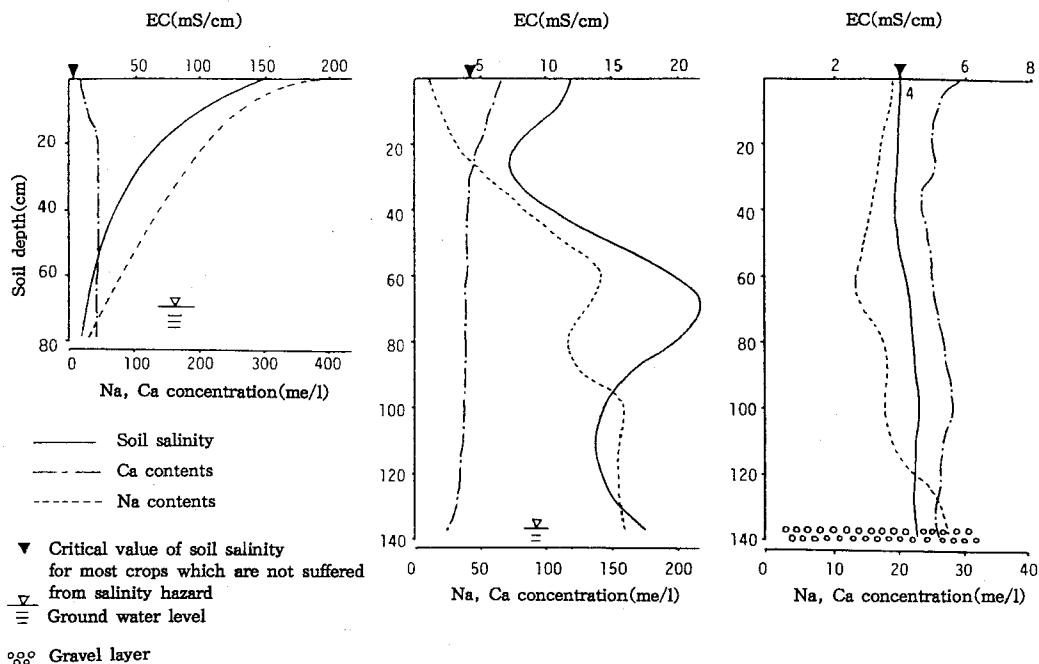


図-1 乾燥地における地下水位の位置と土壌断面での塩集積状況 (松本, 1988)

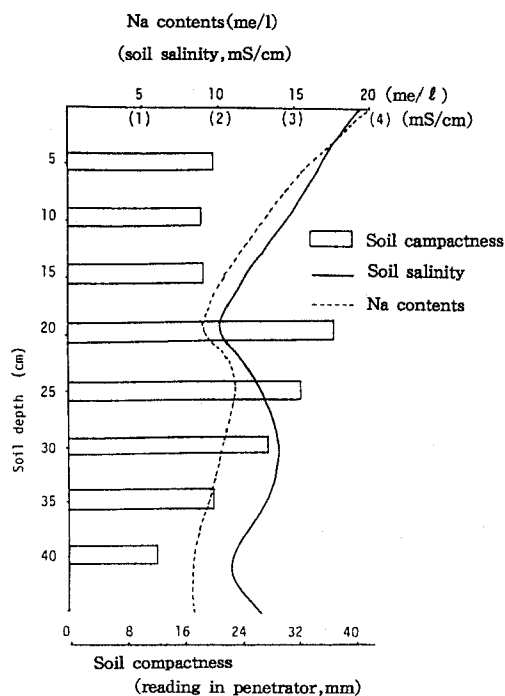


図-2 硬盤の形成と塩集積 (松本, 1988)

## 2) 灌漑水による塩の土壌付加

灌漑水に利用される水質は乾燥地農業では農産物の生産性、圃場の維持管理からみて非常に重要な意義を持っている。乾燥地において使用される灌漑水の水質は湿润地域のそれに比べて水に溶解する水溶性物質が非常に多く、それらは全可溶性塩 (Total Soluble Salts, TSS) と総称されているが、TSS濃度がきわめて高く、水質が悪化しているのが普通である。灌漑水の水質の良否は従来種々の評価法で評価されてきた<sup>10-16)</sup>。これらは、いずれも作物に対する塩性害の立場から、TSSとナトリウム濃度とに、とくに重きをおいている。USDAが提案した SAR (Sodium Adsorption Ratio,  $SAR = Na / [Ca + Mg] / 2$ )<sup>9)</sup> と TSS (便宜上、電気伝導度 (EC) であらわすことが多い) とから得られるダイヤグラムは、灌漑水の水質の良否を決定する指標として長く使用されてきたところである (図3)。

表1は乾燥地の灌漑圃場に用いられている灌漑水の一例外を種々の場所から採水し、その水質を調査した結果を日本の河川水の水質例とあわせて示したものである。表から明らかなように、乾燥地の供試灌漑水の TSS は 1,800 ppm であることから、このような灌漑水を灌漑に用いると、灌漑水 1 トンあたり実に 1.8 kg の塩を含むことになり、灌漑のたびに多量の塩類が一旦は土壌に加わることになる。もちろん、灌水により根圏域から洗脱する塩類もあるので、灌水のたびに塩類が土壌にそのまま

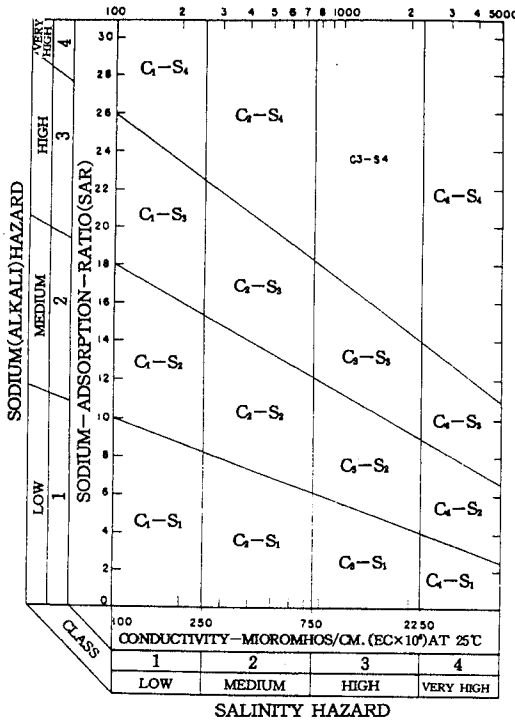


図-3 灌漑水評価の一例  
(U.S. Salinity Laboratory Staff, 1954)

沈積するわけではない。塩収支を把握しておくことは、乾燥地農地の圃場管理上、必須のことであるのは上記のような理由によるものである。排水収支型ライシメーターを現地圃場に設置して、その塩収支の例を示せば、表2の如くである。表2によればTSS濃度から計算した1ヶ月間に灌水により土壌に加えられた塩量(A)は排水でライシメーターより流脱した塩量(B)よりも多い。これを可溶性陽イオン、陰イオンでみると、土壌中に残留しやすいか、流脱しやすいかの程度はイオン種によって異なることが認められる。単純な塩収支(B)/(A)のみならば、ライシメーター土層中には、ナトリウムおよび硫酸塩は留まりにくく、重炭酸塩、塩素、マグネシウムおよびカルシウムは残留する傾向を示し、とくに重炭酸イオンは残留傾向が強いことが示された。

3) 排水量割合 (Leaching Fraction, LF) が土壌塩類濃度に与える影響

用いる灌漑水に含まれる塩類が土壌の塩類濃度に相当の影響を及ぼすこと、その影響の程度は根圏域から流脱する塩量によって決定されることを上記2)で述べた。このことを灌漑水量と排水量との比(排水量割合)の違いが土壌の塩類化にどのように影響するかを先のライシメーターで検討した(図4)。

図4の左は約2ヵ月間に760mmというの多量の灌水を行ったにもかかわらず、この間の排水量割合がわずか

表-1 乾燥地灌漑水と日本の河川水の水質比較の一例(松本, 1988)

sampling place	TSS (ppm)	EC ( $\mu\text{S/cm}$ )	Cations(me/ $\ell$ )				Anions(me/ $\ell$ )				Sum of anions	Na %	
			Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	Sum of cations	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>			
Nov. 2, '77													
Hail Abad dam	1,000	1,260	6.0	5.0	4.5	15.5	tr.	4.4	6.0	5.0	15.4	29.2	
Inlet	1,800	1,280	9.0	4.0	4.5	17.5	tr.	4.8	5.5	7.2	17.5	25.7	
Main canal	2,000	1,270	6.0	7.0	4.5	17.5	tr.	4.4	6.0	7.1	17.5	25.7	
Secondary canal	1,800	1,230	6.0	7.0	5.0	18.0	tr.	2.8	6.0	7.1	15.9	27.8	
Karkhe river													
Transparent solution	1,200	1,250	7.0	3.0	4.5	14.5	tr.	4.0	5.5	5.0	14.5	31.0	
Muddy water	6,000	1,280											
Sendai river(Tottori pref., Japan)													
May. 10, '77	-	71	0.3	0.2	0.3	0.8	tr.	0.2	0.3	0.3	0.8	37.5	
Oct. 1, '77	-	66	0.2	0.2	0.3	0.7	tr.	0.1	0.4	0.2	0.7	42.9	
Jan. 10, '78	-	60	0.2	0.1	0.3	0.6	tr.	0.1	0.3	0.2	0.6	50.0	

表-2 乾燥地現場でのライシメーターによる塩収支(松本, 1988)

	Amount of irrigation water ( $\ell$ )	Amount of drainage water ( $\ell$ )	Total soluble salts(g)	Soluble cations and anions(me/ $\ell$ )					
				Ca	Mg	Na	HCO <sub>3</sub>	Cl	SO <sub>4</sub>
Input(A)	680		681.6	2,130	4,686	2,471	1,874	2,769	4,643
Output(B)		55.2	443.7	1,208	2,404	2,435	338	1,364	4,345
(A)-(B)			238.9	922	2,282	36	1,536	1,405	298
(B)/(A)(%)			65.1	56.7	51.3	98.6	18.0	49.3	93.6

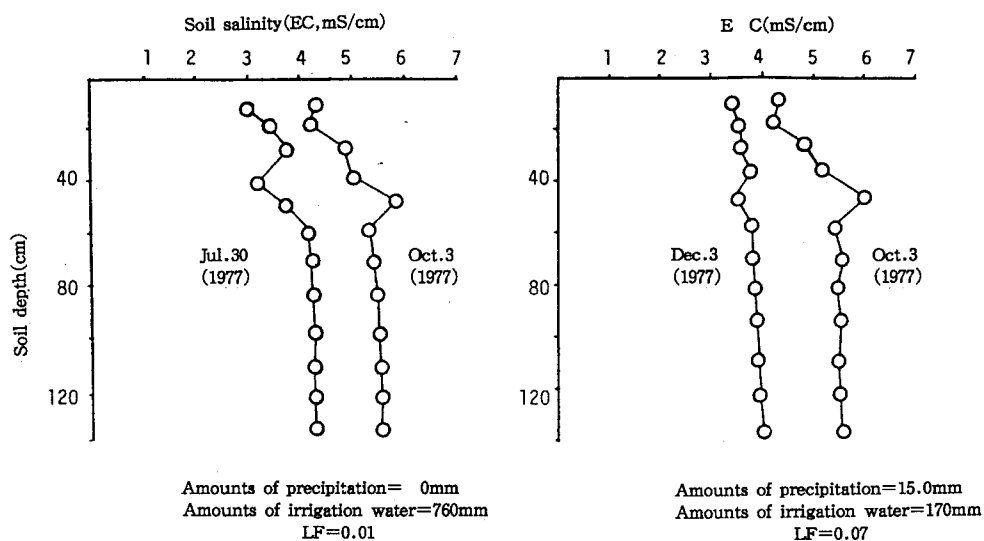


図-4 灌漑水量に対する排水量割合が土壌の塩類化に及ぼす影響(Matsumoto, 1985)

1%にすぎないというきわめて蒸発散量が多い状況のもとで、作物を栽培すると塩の土壌付加が急速に進行したことを示している。この場合、根圏域の土壌塩類化によって生ずる作物（この実験ではアルファルファを使用した）の減収は塩害がない場合に期待される収量の約25%減にあたるのが推定された<sup>17)</sup>。

一方、右の図は、塩類化した土壌がその後約2ヵ月間に170mmの灌水と15.2mmの降水量を得ただけで、これらの合計水量の7%に相当する排水量割合を記録し、排出される塩量が著しく増加したことによって土壌の塩類化が改善され、もとの非塩類土壌（土壌のECからみた塩類土壌の基準は、土壌の水飽和抽出液が4 mS以上の場合を塩類土壌としている<sup>18)</sup>）に修復されたことを示している。

上記の実験は7月30日から10月3日の高温乾燥期にあたる時期と10月3日から12月3日までの温暖湿潤期にあたる時期とで行ったものである。これらのライシメーター実験の結果を改めて示すまでもなく、乾燥地における伝統的な農法、すなわち、天水依存のドライファーマーミング (dry farming) が今日でも圧倒的に支持されている背景には、高温乾燥期における作物栽培がいかに塩類土壌を生成させやすいか、そして、その生成を避けるためには、いかに多量の灌漑水が必要であり、それが経済効率をいかに低下させるものであるかという事実があるからであろう。

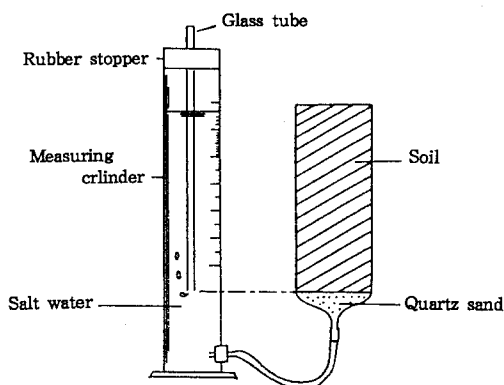


図-5 実験室内における土壌塩類化装置(松本, 1988)

### 3. 塩類集積過程の experimental pedology

土壌の生成過程は一般に長大な時間を要する。しかし、個々の生成要素、たとえば、土壌のグライ化作用などのように、実験室で簡単にモデル化できるものもある。土壌の塩類化も生成要素を抽出すれば、モデル化して短期間に塩類集積過程を追跡できる。すなわち、一定地下水位にある塩水の毛管上昇が土壌表面の蒸発によって駆動されるモデルを創製すれば、乾燥地圃場の灌漑による先の土壌の塩類化の重要な生成要素を抽出できると考えたのである。

図5は塩水（表1の secondary canalに示した水質にほぼ近いイオン組成とECをもつように市販の試薬品

を用いて調整した)を、一定の水位で土壌に毛管浸潤させて供給することができる装置としてのマリオット給水装置と土壌カラムを示している。土壌カラムに充填する土壌には重粘質な津の井土壌(津の井粘土、粘土鉱物はカオリン鉱物を主体としている)と砂丘砂(粘土含有量は0.5%ときわめて低い)の2種類を用い、土層の厚さは24cmとした。マリオット給水装置は体積表示を付したガラス円筒管を用いた。この装置を1セットとして、40℃、相対湿度35%±2%、無風の恒温・恒湿実験室に24セットを設置し、カラム土壌の表面が全体に湿潤した時点をも0週間目として、以後2~4週間ごとに上記実験室より土壌カラムを取り出し、土層を4cmごとに分取した土壌について種々の分析を行った。

図6および7は14週間にわたる塩水の毛管供給・上昇における蒸発量の積算値(蒸発量はマリオットタンクの塩水のレベル低下により求められる)と土壌表面(土層0~4cm部分をいう)における塩集積量を陽イオンの含量として求めたものを供試の両土壌でみたものである。

砂丘砂における土壌表層での塩集積量は、蒸発積算量とはほぼ同じ勾配で経緯しており、また14週間を通じて蒸発積算量および塩集積量の増加率はほぼ一定している。これらの事実は砂丘砂におけるイオンの動態は土壌水の動きと密接に関係し、土壌水の動きとはほぼ平行してイオンの動きも起こることを示している。土壌水とイオンの行動がほぼ同じパターンで推移する理由としては、イオン吸着体としての容量が砂丘砂では小さいことにあると考えられた。

これに対して、津の井粘土では、浸潤期間後期まで表層土の塩量は蒸発量よりも高い増加率で集積していき、その後集積量が停止あるいは若干減少傾向を示し、明らかに砂丘砂の塩集積パターンとは異なった。このことは、重粘な土壌中でのイオンの動態には土壌水以外に土壌粒子表面におけるイオンの吸着・脱着も関与し、時間の経過と共に吸着イオン量-脱着イオン量も増大するとみられる。したがって、この量が土壌水で運ばれた塩量に加わって表層土に沈積するため、その集積量の増加率は蒸発量よりも高くなると考えられる。

浸潤期間後期以後に認められる塩集積量の停止あるいはその漸減は土壌表面の集積塩によるクラスト形成(crust formation)が完了し、クラストが土壌表面から被膜となって浮き上がった時期と一致している。土壌表面から分離した塩被膜は土壌表面との間に3~5mmの気相部分を生成するために、あるいはクラスト内部に凝結水が付着して集積塩の一部が溶解するために、塩集積量が停止あるいは漸減しているものと思われる。実験室で得られたこのような塩のクラスト形成は乾燥地塩類

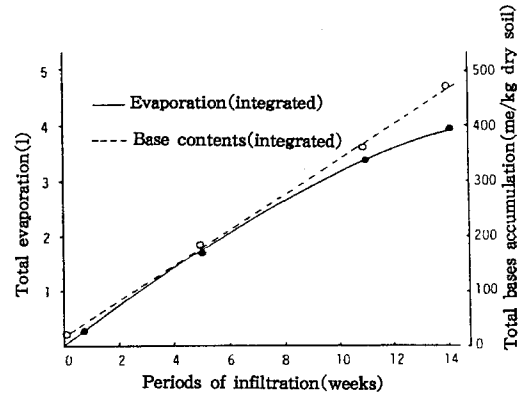


図-6 蒸発積算量と表層イオン集積量(松本, 1988)

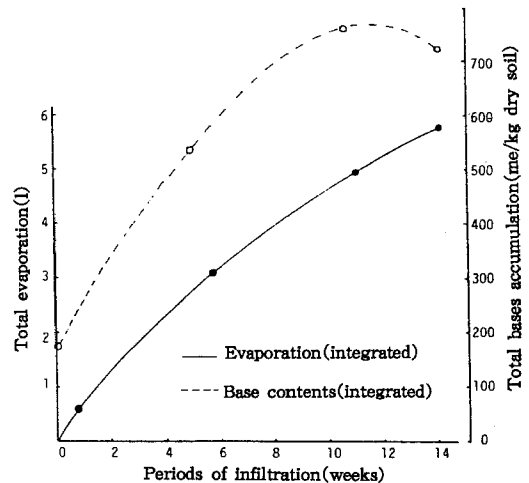


図-7 蒸発積算量と表層イオン集積量  
(津の井粘土)(松本, 1988)

土壌地帯ではごく普通に認められ、その形態的な特徴、すなわち2mm程度の厚さの塩クラストとそれに続く気相部分、さらにその下の土壌部分は直径2~4mm程度の団粒化した塩の屑粒状構造が発達している微細構造の形態的特徴は互いに酷似している。

図8は津の井粘土カラムを12週間にわたって経時的に順次取り出し、土層別に塩基の集積過程を追跡したものである。図中、soil depth 1, 2, ..., 6とあるのはカラム表層から4cmごとに分画した層位を示すもので、1は0~4cmの土層画分を表している。また、吸着態とは塩基が土壌粒子表面にイオン吸着して存在している形態のものをいい、1N-KCl溶液またはpH7, 1N-CH<sub>3</sub>COONH<sub>4</sub>溶液で置換浸出された塩基を意味している。さらに、遊離態とは塩基が土壌粒子とは独立して存

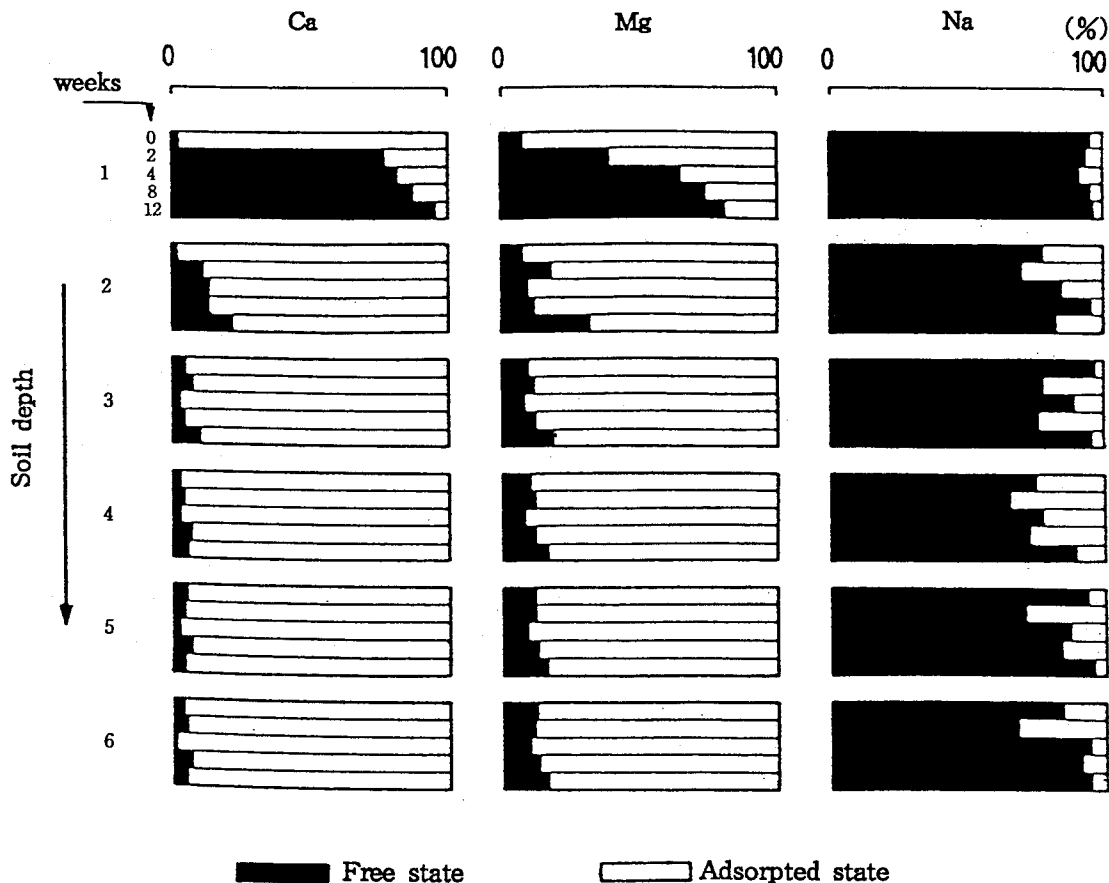


図-8 土壌カラムにおける陽イオンの形態別分布の経時変化(松本, 1988)

にしているもので、主として「塩」となって沈積しているか、土壌溶液中にイオンとして存在している形態のものを指している。遊離態塩基は土壌を脱イオン精製水で浸出されるものをもって遊離態とした。

図8から明らかなように、カルシウムおよびマグネシウムは、表層(0~4 cm)で浸潤期間が経過するにつれて次第に遊離態の占める割合が多くなっているのに対して、ナトリウムは浸潤初期からほとんど全量が遊離態で占められている。2層以下(8 cm以下)の土層ではカルシウム、マグネシウムともに吸着態の占める割合が多くなり湿潤期間が経過するにつれて若干遊離態が増加する傾向を示している。ナトリウムでは表層に比べて若干吸着態が増加しているが、大部分は依然として遊離態である。

これらの事実から、土壌カラム中にみられる塩基の経時的分布の変化はつぎのように説明できる。マリオット容器から一定水位で毛管供給された塩水中の塩基は土壌

カラムに入ると吸着力の大きいものから順に様に土壌粒子のカチオン吸着座に吸着される。この場合、吸着の順序は $Ca > Mg > Na$ であるので、カルシウムの吸着がまず起こり、ついでマグネシウムが吸着されるが、カルシウムより吸着が少し劣るので遊離態の存在がやや増加する。カルシウム、マグネシウムに比べて土壌への吸着力が著しく劣るナトリウムは遊離態として存在する割合が圧倒的に高い。

土壌粒子に吸着された塩基類は土壌表面で起こる激しい水分蒸発による土壌の部分的乾燥によって、土壌表面に近い部位から塩として吸着座から次第に脱着をはじめ。塩基の離脱により再び吸着容量を回復したイオン交換座では塩基の吸着が再び活発化する。このようにして、土壌のイオン交換座では、吸着-脱着-吸着のサイクルを繰り返しながら、湿潤期間の経過と共に土壌の表層では遊離した陽イオンと土壌への吸着が陽イオンに比べて一般に弱い陰イオンとの間で各種の塩が生成されるもの

と考えられる。

#### 4. おわりに

ナトリウムとカルシウムの土壌中での輸送と集積は塩類土壌の生成にきわめて重大に関与する過程であるが、世界の塩類土壌の種類が地域によって異なるのは、土壌中に本来どちらの物質が量的に優位であるか、すなわちその土壌の母材が何であるかによって決定されることが多い。一方、植物の培地として塩類土壌をみた場合には塩の種類よりも土壌溶液のECとpHが重要な指標になる。塩類土壌の中でも、もっとも土壌改良し難いとされるソロネツ(ナトリウム土壌)の改良がしばしば、溶解度定数のそれほど高くない硫酸カルシウム資材を用いることによって行われるようになったのは<sup>19)</sup>、塩類土壌の改良は単に過剰な塩類を土壌から強制的にリーチングすれば良いというものではないこと物語っている。すなわち、土壌粒子がナトリウムコロイドになって分散する結果、きわめて緻密な構造を生成し、土壌物理的にいってもきわめて劣悪な構造になっているナトリウム土壌の改良は吸着されたナトリウムを「徐々に」カルシウムで置換するが、その際、塩の生成を「最小限」に止めながら行うという思想がこの改良方法にはみられるのである。塩類土壌の改良は土壌中での化学反応を drastic に進めるのではなく、適当に反応に制御がかかる方法を取り入れて行かなければならないと考える。

#### 引用文献

- 1) Szadolcs, I.: Salt-Affected Soils, CRC Press Inc., 274p. 1989
- 2) 松本聰: 乾燥地における水利用と塩類集積, 地理学評論, 61. 155-169, 1988
- 3) 松本聰: 乾燥地における人為因子の影響とその問題点, ベドロジスト. 26. 173-186. 1982
- 4) Matsumoto, S.: Soil salinity under irrigation in the arid land of Iran, Proc. of Inter. Seminar on Environmental Factors in Agricultural Production., 175-185. 1985
- 5) Babcock, K.L.: Evidence for sodium fixation in salt-affected soils, Soil Sci. Soc. Amer. J. 24. 85-86, 1960
- 6) Bower, C.A. and Hatcher, J.T.: Characterization of salt-affected soils with respect to sodium, Soil Sci. 93, 275-280. 1962
- 7) Abrol, I.P. and Bhumbla, D.R.: Field studies on salt leaching in a highly saline sodic soil, Soil Sci., 115, 429-434, 1973
- 8) Darab, K., Csillag, J. and Pinter, I.: Studies on the ion composition of salt solutions and saturation extracts of salt-affected soils. Geoderma, 23, 95-100, 1980
- 9) Briant T. Bunting: The Geography of Soil, Lecture in Geography, Birkbeck College, University of London, Hutchinson Univ. Library, 213, 1966
- 10) Bower, C.A.: An index of the tendency of CaCO<sub>3</sub> to precipitate from irrigation water. Soil Sci. Am. Proc., 29, 91-92, 1965
- 11) Bennett, A.C. and Adams, F.: Solubility and solubility product of gypsum in soil solution and other aqueous solution, Soil Sci. Soc. Am. Proc. 36. 288. 1972
- 12) Miyamoto, S.: Effects of bicarbonate on sodium hazard of irrigation water, Soil Sci. Soc. Am. J. 44, 1079-1084, 1980
- 13) Shainberg, J. and Pruitt, W.O.: Quality of irrigation water. Inter. Irri. Center, New York. 62p, 1978
- 14) Tanji, K.K. and Doneen, L.D.: A computer technique for prediction of CaCO<sub>3</sub> precipitation in HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> salt solution, Soil Sci. Soc. Am. Proc. 30, 53-55, 1966
- 15) U.S. Salinity Laboratory Staff: Diagnostic and improvement of saline and alkali soils, USDA Handbooks No.6, New York, 485p, 1954
- 16) Hira, G.S. and Singh, N.T.: Irrigation water requirement for dissolution of gypsum in sodic soils, Soil Sci. Soc. Am. J., 44, 353-358, 1980
- 17) Doorenbos, J. and Pruitt, W.O.: Guidelines for predicting crop water requirement, FAO: Irrigation and drainage paper, 32-50, 1977
- 18) Buringh, P.: Introduction to the study of soil in tropical and subtropical regions, Center for Agricultural Publishing and Documentations, Wageningen, 118p, 1970
- 19) Gupta, R.K. and Abrol, I.P.: Salt affected Soils: Their reclamation and management for crop production, Adv. in Soil Sci. Vol.11, Soil Degradation, 223-288, 1990

(受稿年月日1992年12月28日)