

乾燥地の灌漑農地における塩類動態に関する研究

**Studies on Behavior and Distribution of Salts  
under Irrigated Agriculture in Arid Regions**

遠 藤 常 嘉

2001

## 目 次

	頁
<b>第1章 緒言</b>	1
1.1. 乾燥地における灌漑農業～その歴史的背景と現状～	1
1.2. 乾燥地灌漑農業に起因する土壌劣化	3
1.3. 乾燥地土壌, とくに塩類評価に関するこれまでの研究と課題	4
1.4. 研究の目的	6
<b>第2章 乾燥地域の灌漑農地の土壌環境</b>	8
2.1. はじめに	8
2.2. メキシコ・カリフォルニア半島中央部の灌漑農地の土壌環境	8
2.2.1. 背景	8
2.2.2. 調査地域の概況	9
2.2.3. 供試土壌および分析方法	12
2.2.3.1. 供試土壌	12
2.2.3.2. 分析方法	12
2.2.4. 結果および考察	14
2.2.4.1. 灌漑水の特徴	14
2.2.4.2. 自然土壌の特徴	16
2.2.4.3. 灌漑土壌の特徴	20
2.2.4.4. 粘土鉱物組成	24
2.2.4.5. 土壌生成要因	26
2.2.4.6. 土壌断面内の塩類動態	29
2.3. カザフスタン・シルダリア川下流域の灌漑農地の土壌環境	34
2.3.1. 背景	34
2.3.2. 調査地域の概況	35
2.3.3. 供試土壌および分析方法	38
2.3.3.1. 供試土壌	38
2.3.3.2. 分析方法	38

2.3.4. 結果および考察	38
2.3.4.1. 耕作土壌の特徴	38
2.3.4.2. 放棄土壌の特徴	46
2.3.4.3. 粘土鉱物組成	51
2.3.4.4. 灌漑水の特徴	52
2.3.4.5. 土壌生成要因	54
2.3.4.6. 土壌断面内の塩類動態	54
2.4. 総合考察	58
2.5. 要 約	59
<b>第3章 乾燥地土壌中の塩類の溶解特性</b>	<b>62</b>
3.1. はじめに	62
3.2. 供試土壌および分析方法	62
3.2.1. 供試土壌	62
3.2.2. 分析方法	63
3.3. 結果および考察	67
3.3.1. 土液比の変化に伴うイオン濃度の変化とその機構	67
3.3.2. 土液比の変化に伴う塩類の存在形態の変化とその機構	74
3.3.3. 土壌水抽出溶液中のEC値に対する塩類の存在形態の影響	81
3.4. 要 約	83
<b>第4章 乾燥地土壌中におけるナトリウム-カルシウム交換・溶解平衡     -粘土の種類および量に伴う土壌固相/溶液相間の化学平衡-</b>	<b>85</b>
4.1. はじめに	85
4.2. 理 論	86
4.2.1. イオン交換平衡反応	86
4.2.2. 拡散電気二重層	87
4.3. 分析方法	88
4.3.1. 吸着型粘土試料の調整	88
4.3.2. 陽イオン交換平衡実験	89

4.4. 結果および考察	90
4.4.1. 粘土層間中の水分子層の形成	90
4.4.2. 交換・溶解平衡に伴う水素イオンの関与	90
4.4.3. 交換・溶解平衡に伴う塩化物イオンの関与	90
4.4.4. 溶液濃度に対する交換・溶解平衡の影響	93
4.4.5. ナトリウム吸着比に対する交換・溶解平衡の影響	93
4.4.6. 陽イオン交換容量に対する交換・溶解平衡の影響	98
4.4.7. 交換平衡定数の算出	98
4.5. 要約	105
<b>第5章 総合考察</b>	106
5.1. 塩類の溶解特性の把握の意義	106
5.2. 土壌固相/溶液相間の化学平衡の把握の意義	107
5.3. 灌漑農地における塩類動態の要因	108
5.3.1. メキシコ・カリフォルニア半島中央部の灌漑農地	108
5.3.2. カザフスタン・シルダリア川下流域の灌漑農地	113
5.4. 塩類の多様性を考慮に入れた土壌管理	113
5.4.1. 砂質農地の土壌管理への提言	113
5.4.2. 粘質農地の土壌管理への提言	116
5.5. 長期的視野に立った灌漑農業のあり方	119
<b>第6章 要約</b>	122
引用文献	126
付表および付図	133
英文要約	147
謝辞	152
学会誌公表論文リスト	153

## 第1章 緒言

近年、世界各地の急速な開発は種々の環境破壊を引き起こし、今や地球環境の修復は人類の大きな課題となっている。現在、地球上の全陸地の約3分の1を占める乾燥地、半乾燥地（科学技術庁研究開発局，1989）においても、不適切な灌漑農業による土壌の塩類化・アルカリ化に起因する土壌劣化が年とともに増加しつつあり、防止及び修復対策は農業生産の面からも、環境の面からもきわめて重要である。乾燥地域における灌漑農地の土壌の塩類化・アルカリ化は、これまで乾燥条件下で平衡状態にあった環境に対して、人間が不適切かつ大規模に水循環を変えたために引き起こされた水と塩類の再分配の結果であり、その拡大は止まる兆しをみせず、今後の世界の食糧生産情勢に大きな陰を落とそうとしている（第1-1図）。

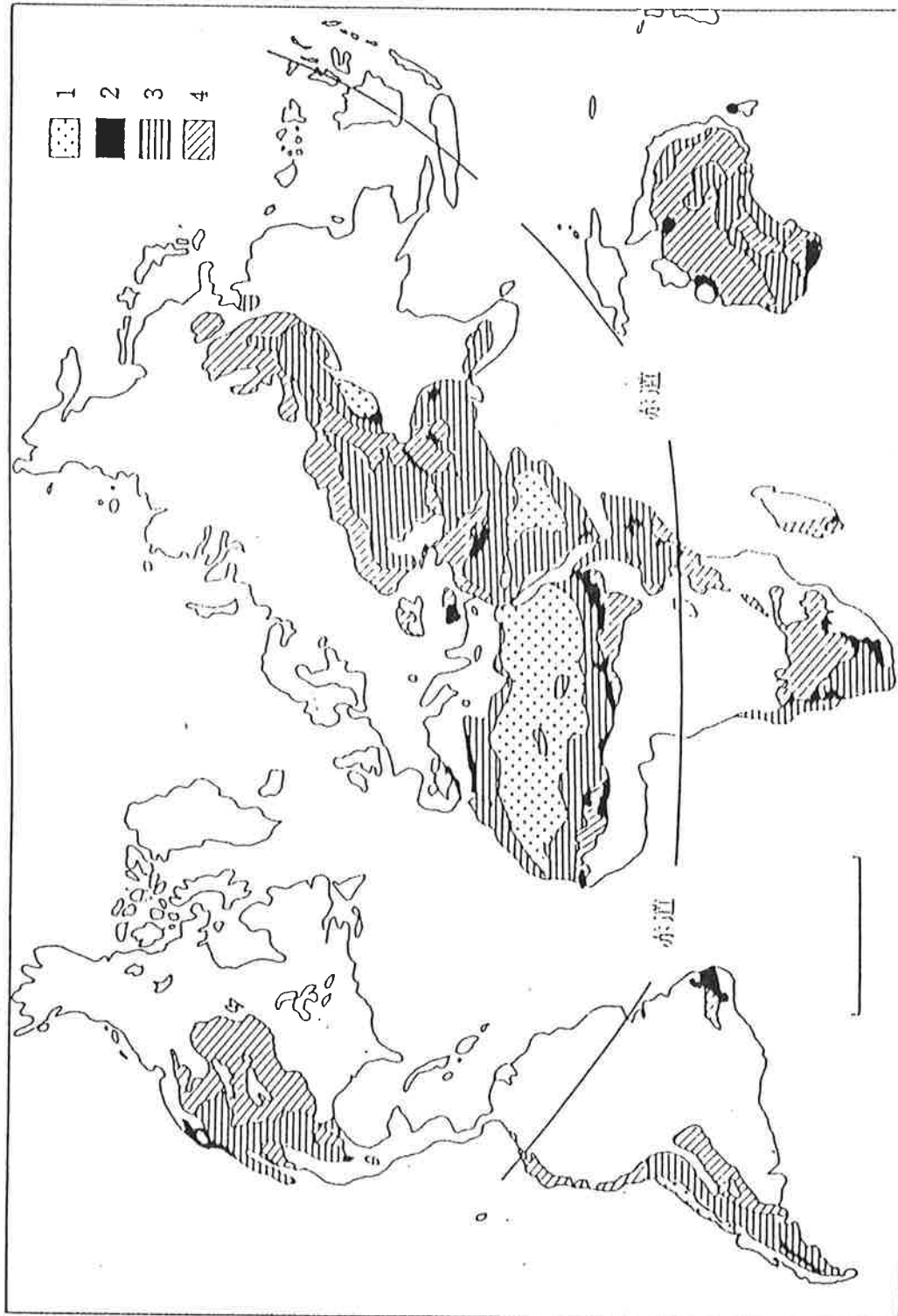
多くの土壌劣化がそうであるように、乾燥地の灌漑農地の劣化の原因は、複合的であり、土壌管理・水管理などの技術的な問題とともに、管理が不適切になる社会的、経済的背景等も無視できない。また、これまでの歴史が証明しているように、乾燥地の灌漑農業がどこまで持続的なのかは、疑問の残る点である。しかし、今後の人口と食糧需要のバランスを考慮すると、灌漑に伴う土壌劣化を技術的に阻止する方策を見出す挑戦は、行い続けなければならない、極めて重要で緊急性の高い課題である。

本研究では、乾燥地灌漑農業における水と土壌の適切な管理法確立の一助とすべく、水資源の分布・利用様式の大きく異なる二つの乾燥地域を対象として、塩類の溶解平衡論・交換平衡論を理論的手法として用い、灌漑に伴う土壌中の塩類動態と塩類化・アルカリ化のメカニズム解明へのアプローチをした。

### 1.1. 乾燥地における灌漑農業～その歴史的背景と現状～

乾燥地の中でも、砂漠のように極めて乾燥している地域は高々5%であり（千，1999）、多くは豊富な日射量に恵まれ、水さえあれば農業生産が期待できる環境にある。乾燥地域の大半は、現在でも伝統的なドライファーミングが行われているが、不安定な降雨に依存しているため、作物収量はきわめて不安定である。一方、灌漑農業は、他の農法に比べて生産量の割合が高く、しかも安定した生産が期待できる。

灌漑農業の歴史は古く、約六千年前にさかのぼる。当時、メソポタミアの入植者たちは、乾燥した大地にユーフラテス川から水を引くことにより食糧生産を可能にし、文明が誕生した。メソポタミア以外にも、エジプトのナイル川下流域、現在のパキス



砂漠化の危険度：1. 現在の砂漠 2. 非常に高い 3. 高い 4. 中程度

第1-1図 世界の砂漠化地図 (市川, 1988)

タンにあたるインダス川流域，中国中北部の黄河流域などに灌漑社会が盛え，これらの社会はいずれも独特の文化的・科学的発展を築いた（レスター・ブラウン，2000）．灌漑農業は劇的に農地と人間社会を変容させ，文明を支え，社会的発展を基本的に形づくる新たな基盤となった．しかし，これまでの灌漑農業に立脚した社会は，長い年月のうちに崩壊の方向をたどってきたことを歴史は証明している．土壌の衰退が文明の滅亡を引き起こした．このような文明の崩壊は，灌漑農業についての安易な取り組みが，いかに危険であるかを我々に警告している．

過去の多くの崩壊した社会と同様，近代社会においても様々な形で灌漑農業が営まれている．しかし，今なお，多くの耕地が塩類集積の障害によって生産力が低下し，放棄され続けている．例えば，中国・内モンゴル自治区では河川から灌漑水を多量に導入し，過剰灌漑を行い続けた結果，土地が荒廃化した例もある（松本，1999）．

一方，乾燥地にはそれぞれ伝統的な農業体系があり，その中で確立されてきた灌漑技術がある．適切に管理されている灌漑農地では安定した生産が行われているのは確かであり，一時的には高い農業生産をあげることができた地域もある（長，1973）．乾燥地域における昔からの伝統的な水利による農業が併存している一方，近代的な水利による大規模農業開発が盛んに行われている中で，いずれにしても利用可能な水は限られた貴重な資源であり，供給可能な水資源を有効に利用して灌漑農業に取り組むことが必要である．

灌漑農業に起因する土壌塩類化・アルカリ化の問題は，その機構を十分に理解することで防止技術を考案し，取り組まなければならない．いずれの灌漑農地においても，長期的視野に立って農業生産を持続向上させるため，その技術を駆使して，地域にあった有効な方策を見出すことが重要である．そのためにはまず，土壌の塩類化・アルカリ化の進行過程を明確に把握し，それぞれの風土に適した農業の安定を目標とする技術を確立をすることが必要である．

## 1.2. 乾燥地灌漑農業に起因する土壌劣化

乾燥地，半乾燥地の灌漑農業は，激しい蒸発散量を灌漑水の利用によって補給し，作物生産を可能とするが，それは同時に，灌漑水中の塩類を土壌中に付加することにもなる．いったん生成された塩類土壌・アルカリ土壌を耕地として改良するには，莫大な量の良質な水と労力およびコストを必要とするため，土壌の塩類化・アルカリ化の進行した耕地は放棄されることが多い．その結果，土壌劣化は確実に進行している．

一方、世界人口は今後急速に増加することが予測されており、食糧の増産は将来にわたって急務の課題である。乾燥地、半乾燥地域には世界人口の約18%に相当する約9億人が住んでおり、なお人口増加の一途をたどっている（茅，1991）。乾燥地の土壌劣化もこうした背景から生じている。すなわち、増え続ける人口を養うため、風土条件を無視した不適切な農地管理が行われ、土壌の酷使が続けられた結果、土壌の作物生産性が低下したといえる。土壌はわれわれの生活に密着した存在であるが、それが強く認識されず、おろそかにされてきた結果といえる。排水施設を設けずに灌漑したり、過剰灌漑を続けたりすることなどの不適切な管理による土壌の塩類化・アルカリ化の拡大と、それに伴う土壌劣化及び食糧生産の低下が懸念されている（FAO, UNESCO and WMO, 1977）。UNEP and GCSS (1991)によると、乾燥地、半乾燥地域の灌漑農地（146万km<sup>2</sup>）の30%（43万km<sup>2</sup>）が土壌塩類化・アルカリ化により荒廃しており、少なくとも年間1.0~1.3万km<sup>2</sup>の灌漑農地が失われていると推定されている。

しかし、今後の人口増加とそれに伴う食糧不足を考えると、乾燥地における農業は、ますますその重要性を増してくる。このように土壌劣化による土地の作物生産性低下の進行を防止すると共に、その地域で生活を営んでいる地域住民の食糧不足、栄養不足等を解消するためにも、一刻も早く灌漑農業を向上維持させる方策を見い出す必要がある。

土壌と水は有限な資源であり、取水可能な水資源の有効利用に最大限の努力を配慮しながら、適切な土壌管理、水管理が必須な条件となる。その解決のためには灌漑農業下の水・塩類の動態をよく把握したうえで、農地を適切に管理することが必要となってくる。

### 1.3. 乾燥地土壌、とくに塩類評価に関するこれまでの研究と課題

世界各地の研究者は、これまでも乾燥地で灌漑農業を実践するための有用な知見を蓄積してきた（前垣内，1990）。乾燥地農業に取り組んでいる地域は広く、自然条件は複雑で、土壌中の塩類集積量や組成・特徴も異なっており、農業経済状況もまた一様ではない。しかし、土壌の塩類化・アルカリ化の背景には普遍的な側面もあり、その対策や評価については、地域を超えた比較・検討が必要である。世界各地の土壌の塩類化・アルカリ化の現状や対策に関する知見を統合し、有効な対策の方向性を見い出すことが必要である。いずれの地域においても、灌漑農業に起因する土壌塩類化・



アルカリ化の機構を十分に理解することで、防止技術を考案し、取り組まなければならない。そのためにも、灌漑による塩類動態を明確にした上で、適切な土壌管理、水管理をすることが必須な条件となる。

しかし、灌漑農地の塩類動態を把握する上で、制限因子となっているものの一つに、土壌中に存在している塩類がある。乾燥地土壌中の塩類は、農地によって集積量・塩類組成が異なるため、同一農地内でも、灌漑法により塩類動態が異なる。したがって、土壌中の集積塩類の量と組成の的確な把握は、塩類動態を解明し、土壌塩類化・アルカリ化の機構を理解するための有効な手段といえる。土壌中の集積塩類量・塩類組成の多様性は土壌溶液にも反映されている。つまり、灌漑による塩類動態を解明し、土壌塩類化・アルカリ化の機構を理解するために、土壌中の集積塩類の量・組成と土壌溶液との関係を把握することは重要な課題である。

土壌溶液についての研究の重要性がCameron (1911) によって報告された後、現場の土壌溶液組成と土壌水抽出液組成に関して、1920～1960年代に精力的に研究が行われてきた (Hoagland *et al.*, 1920 ; Martin *et al.*, 1920 ; Parker, 1921 ; Burd and Martin, 1923 ; Hibbard, 1923 ; Eaton and Sokoloff, 1935 ; Kelly, 1939 ; Reitmeier, 1946 ; Moss, 1963) 。これらの研究の結果、可溶性塩類を含む土壌では塩類の量・組成によって土壌溶液組成が異なること、さらには水分量によって溶出イオン濃度も変化することが明らかになった。しかし、これらの研究は、土壌溶液と水抽出液の溶質組成の大きな差異を指摘するにとどまり、水分量の変化による溶質組成変化の機構を理解するまでには至らなかった。すなわち、土壌溶液の溶質の大部分は土壌の固相部との間のイオン交換・吸脱着反応、沈澱・溶解反応などに関与しているため、水分量の変化に伴う溶質組成の変化を解明するには、イオン交換の研究が不可欠であると認識されるようになった。それに伴い、移動相としての土壌溶液の組成予測の重要性も土壌中の溶質移動に関連してますます重要になってきている。特に1975年以降、多成分イオン交換の研究は飛躍的に進歩し、現在では実用に耐える経験的多成分陽イオン交換モデルも利用可能になりつつある (Feigenbaum *et al.*, 1989 ; Wada and Seki, 1994) 。

乾燥地土壌を対象とした土壌溶液の評価は、アメリカ合衆国塩類研究所のスタッフらを中心にすすめられ、現場の実態に即した塩類の評価が議論され (Rhoades *et al.*, 1989a ; Rhoades *et al.*, 1989b) ，近年、同研究所のRhoades (1996) がその内容をくわしくまとめた。その後もコンピューターによる解析が導入され、シミュレーション

によるモデル化も行われるようになってきた (Suarez and Simunek, 1997 ; Rieu *et al.*, 1998) . 一方, 土壌中の水・塩類の動態の解明には, 土壌中のイオン交換現象の研究が不可欠であることから, 乾燥地土壌を対象としたイオン交換特性についても, 多くの研究者によって研究されてきた (Mehlich, 1939 ; Bower *et al.*, 1952 ; Levy and Hillel, 1976 ; Mario and Rhoades, 1977 ; Harron *et al.*, 1983 ; Flenkel and Alperovitch, 1984 ; Amrherin and Suarez, 1990 ; Snmner, 1996) . しかし, イオン交換特性は適切な土壌管理のために必要であるにも関わらず, 研究者によって見解がそれぞれ異なっており, その結果のもつ意味も異なっている. 例えばこれまでも, 交換平衡定数については0.005以下 (Jurinak *et al.*, 1984) という報告から0.03以上 (Sinanuwong and El-Swaify, 1974 ; Miller *et al.*, 1990) という報告もあり, それらは現在でも一致した見解を示していない. その理由としては, 乾燥地土壌中に多量に沈積している塩類によって, 土壌固相に吸着している塩基の定量が複雑性を伴っていることが挙げられる. また, 土壌中に含まれる塩類の量および組成がそれぞれ異なるため, 集積塩類の溶解特性はそれぞれの土壌によって異なる. そのため, 灌漑による土壌固相/溶液相間の相互作用が解明されず, 塩類集積過程および洗脱過程における塩類動態の機構が十分に明らかになっていない.

#### 1.4. 研究の目的

本研究の背景には, 以上に述べてきたように, 乾燥地土壌中の塩類が極めて多様性に富むため, 灌漑に伴う土壌中の塩類動態と塩類化・アルカリ化の機構が十分に解明されていないという現状がある. そのことから, 乾燥地の灌漑農地では, 土壌・水管理が必ずしも適切にはなされていない. したがって, 乾燥地の灌漑農業において適切な土壌管理, 水管理を行うためには, 土壌中での水・塩類の動態 (塩類集積過程あるいは洗脱過程) を明確に把握することが極めて重要で基本的なことである. つまり, 乾燥地の灌漑農地では, 土壌の性質, 集積している塩類の量・組成が異なるため, 土壌と水の管理法も地域によって適応させなければならないのである.

本研究の目的は, 乾燥地灌漑農業における土壌と水の適切な管理法確立の一助とすべく, 塩類の溶解平衡論・交換平衡論を理論的手法として用い, 灌漑に伴う土壌中の塩類動態と塩類化・アルカリ化の機構を明らかにし, 土壌劣化防止のための有用な知見を得ることである.

そのため本研究では, はじめに灌漑農業が営まれている乾燥地の調査を行い, それ

らの土壌の特徴を明らかにし、灌漑による土壌中の塩類動態の実態を比較・検討をした。そして、塩類集積量と組成の差異が土壌中の塩類動態に及ぼす影響を検討するため、土壌水分条件の違いによる土壌溶液組成の変化を明確にした。さらに、土壌の性質による土壌の塩類化過程およびアルカリ化過程を土壌固相/溶液相間の化学平衡を考慮して論じた。その上で、灌漑農地における適切な土壌・水管理のあり方を提言した。

具体的な本論文の構成は以下の通りである。

第2章の『乾燥地域における灌漑農地の土壌環境』では、乾燥地域における灌漑農地の土壌環境の実態について取り上げた。水環境において極めて対称的な二つの地域、メキシコ・カリフォルニア半島中央部とカザフスタン・シルダリア川下流域における調査事例を元に、灌漑による塩類動態および土壌塩類化の実態について述べた。

第3章の『乾燥地土壌中の塩類の溶解特性』では、乾燥地土壌の塩類集積量と組成の差異が土壌中での塩類動態に及ぼす影響を検討するため、土壌水分条件による土壌溶液中の塩類組成の変化を明確にした。すなわち、塩類の水に対する溶解特性に着目し、集積塩類の量と組成の異なる土壌に対する水添加量の差異による土壌溶液中の塩類組成変化を、土壌の性質と関連させて解析した。

第4章の『乾燥地土壌中におけるナトリウム-カルシウム交換・溶解平衡』では、土壌塩類化・アルカリ化過程における土壌固相/溶液相間の相互作用が塩類動態に及ぼす影響を考慮して論じることを目的として、二種類の粘土鉱物（モンモリロナイト、イライト）を用いて、ESR-SAR関係式の確立を試みると同時に、乾燥地土壌の陽イオン交換特性について検討した。

第5章の『総合考察』では、各章で得られた結果を取りまとめて、塩類の溶解平衡論・交換平衡論を理論的手法により、塩類動態の要因を考察し、灌漑農地における適切な土壌・水管理のあり方を提言した。

## 第2章 乾燥地域の灌漑農地の土壌環境

### 2.1. はじめに

乾燥地で灌漑農業に取り組んでいる地域は広く、気象、水文、土壌、地形などの自然条件、作物栽培技術、農業経済状況、労働力、工業技術力などの営農条件および社会条件などによって土壌管理、水管理も異なっている。一方、これらの地域の灌漑農業には普遍的な側面もあり、いずれの地域も絶えず水資源の確保および作物生産の維持という大きな問題に直面している。したがって、乾燥地で農業生産を向上維持させる方法を長期的視野に立って確立するため、その対策や評価については、地域を超えた比較・検討が必要である。そのためにも、灌漑農業が行われている現地での水・塩類の動態を十分に把握した上で、これを適切に管理することが必要となってくる。

そこで、本研究ではメキシコ・カリフォルニア半島中央部とカザフスタン・シルダリア川下流域の二つの地域で現地調査を行った。これらの地域はともに年降水量が100mm前後の乾燥地域であるが、水資源の面で大きく異なっている。両地域の水資源の基本的な違いは量的な相違である。メキシコ・カリフォルニア半島では大きな河川がなく全て地下水を利用しているのに対して、カザフスタン・シルダリア川下流域では大量の河川水を取水して灌漑農業を営んでいる。各地域とも、これらの水をいかに有効に利用するかが重要な課題となっている。

本章では、水環境の極めて対称的なこれら二つの地域において土壌調査を行い、これらの土壌の特徴を明らかにし、土壌塩類化・アルカリ化等の土壌劣化の実態、灌漑による塩類動態等の比較・検討を行った。

### 2.2. メキシコ・カリフォルニア半島中央部の灌漑農地の土壌環境

#### 2.2.1. 背景

国連環境計画によれば (Nick and David, 1997) , メキシコ合衆国 (以下メキシコと称す) の乾燥地は国土の46.8%を占めており、北部の砂漠地域と中央部およびユカタン半島の砂漠化地域に二分される。ただし、面積的には北部砂漠地域のソノラ・チワワ両砂漠が大半であり、国土の41.4%を占める。メキシコ北部に広がるソノラ砂漠、チワワ砂漠は亜熱帯砂漠である。

メキシコ政府は、1991年にエヒード制度 (共同体土地利用制度) を根本的に見直す憲法改正を断行した (藤井, 1992) 。そこで、国土のほぼ半分を占める乾燥地の農業

開発は非常に重要な課題となっている。メキシコの乾燥地の農地は508万haで、メキシコ全農地の18.7%を占め、そのうち灌漑農地は198万haで、メキシコ全灌漑農地の34%を占めている（CONAZA, 1993）。すでに、民間資本の投入による農業近代化が進行しつつあるが、未だに正確な土地資源、水資源等の評価が行われないうまま農業開発の規模が大きくなる一方である。これらの多くの地域では不適切な水管理のため、土壌の塩類化・アルカリ化が深刻な問題になっている。それに伴い、砂漠化等の大規模な環境破壊が生じる危険性が高くなってきている。

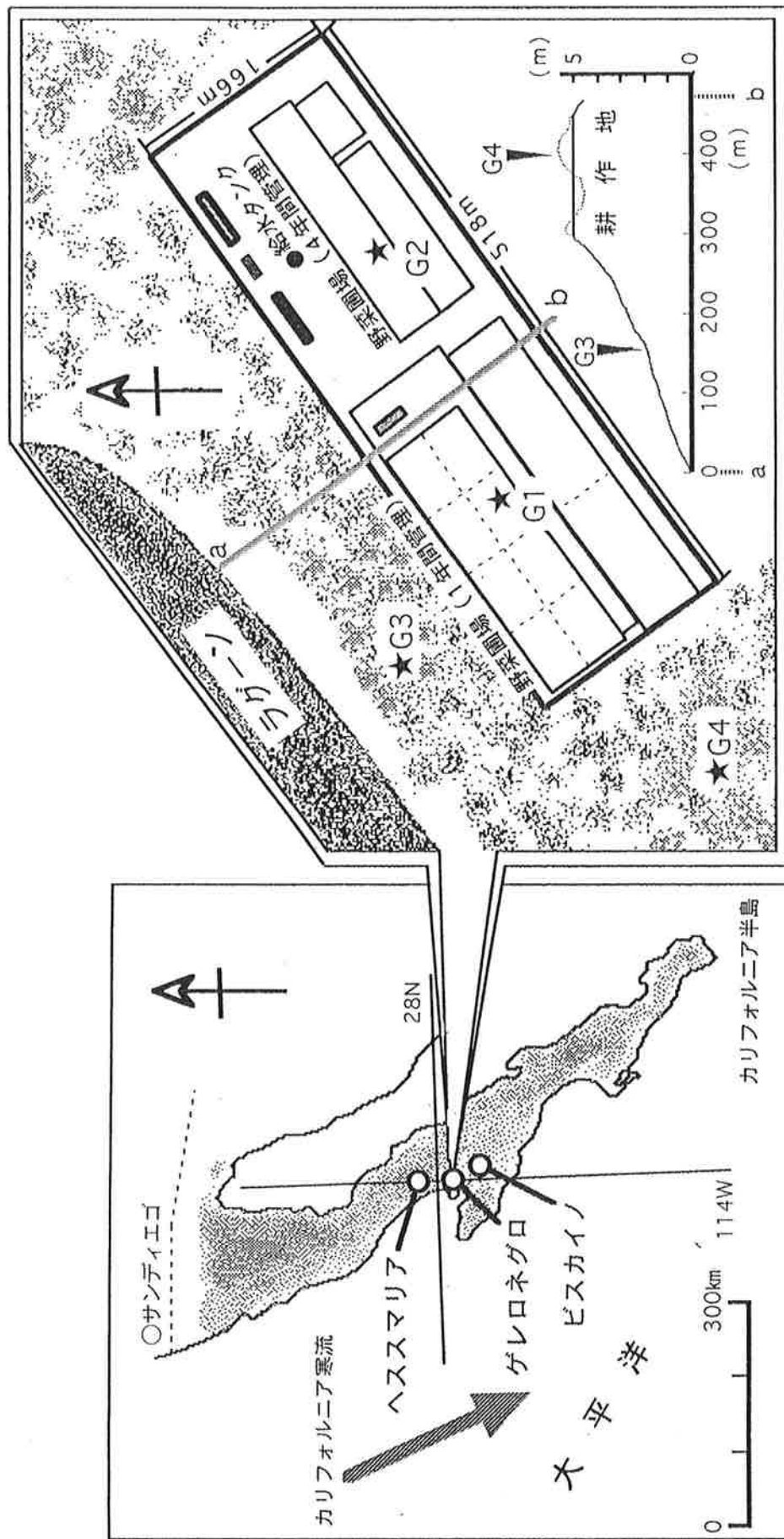
本節では、カリフォルニア半島中央部の寡雨地域に分布する海岸砂漠地帯と、その内陸側に位置する砂漠地帯の、土壌の断面形態と一般理化学性および土壌生成要因について述べるとともに、この地域の灌漑農地における土壌塩類化・アルカリ化の実態を明確にした。

### 2.2.2. 調査地域の概況

カリフォルニア半島はアメリカ合衆国からのシェラネバダ山脈の延長上にあり、西岸は太平洋、東岸はカリフォルニア湾に面している南北に細くのびた半島で、全長1,280kmにも及ぶ。半島全体のほとんどが山岳と高地から成り、その大部分は砂漠である。半島の主要な基盤岩は花崗岩で（ウィリアム・ウェーバーら, 1980）、半島中央部は花崗岩質の風成第四紀系の堆積物で覆われている（Universidad National Autonomía de México, 1992）。

第2-1図に調査対象地域を示した。土壌調査は、カリフォルニア半島内でも比較的農業の歴史が浅い地域で行った。調査対象地域は、半島のほぼ中央部に位置するビスカイノ砂漠に分布するゲレロネグロ（北緯28度、西経114度）、ビスカイノ（北緯27度55分、西経113度45分）、ヘススマリア（北緯28度30分、西経114度）の三地域である。ゲレロネグロは太平洋岸のラグーンに面した砂丘地帯で、海岸砂漠が形成されている。ビスカイノはゲレロネグロの南東約70kmに位置する。また、ヘススマリアはゲレロネグロの北約40kmに位置する小高い台地面である。ヘススマリアはカリフォルニア半島中央部の砂漠を代表する地域の一つであり、砂丘地帯よりもやや内陸に位置する。この地域では、比較的粘質な土壌が分布していた。

ゲレロネグロの気象概要を第2-1表に示した。この地域の年降水量は周辺地域と比較すると少なく約80mmで、冬季に集中している。一方、年蒸発量は約1,400mmと非常に高い地域である。平均気温も約19℃と年間を通じて低く、冷涼海岸砂漠に区分されている。



第2-1図 土壤調査地点 (メキシコ・カリフォルニア半島)

第2-1表 気象観測データ (ゲレロネグロ; 1993年)

	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	平均/総量*
気温 (°C)	16.5	16.0	17.4	17.4	18.2	19.2	20.9	21.5	22.1	20.9	18.5	15.4	18.7
湿度 (%)	82.0	73.0	72.0	74.0	83.0	81.0	76.0	77.0	73.0	75.0	70.0	80.0	76.3
風速 (m s <sup>-1</sup> )	2.9	3.5	4.9	5.9	6.2	6.4	5.8	5.7	4.8	4.1	3.2	3.0	4.7
蒸発量 (mm)	62.2	80.0	128.4	140.9	146.7	143.0	173.7	148.6	133.3	107.4	77.5	59.0	1400.7*
降雨量 (mm)	24.5	33.5	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	9.5	9.5	80*
土壌温度 (0cm:°C)	17.1	17.6	22.7	24.1	25.9	26.8	29.7	29.9	29.6	26.0	20.9	16.4	23.9
土壌温度 (-10cm:°C)	17.1	17.5	21.5	24.0	25.8	26.9	29.7	29.9	29.6	26.0	20.7	16.3	23.8
土壌温度 (-15cm:°C)	17.1	17.6	21.4	23.8	25.5	26.6	29.3	29.6	29.4	26.2	21.1	16.7	23.7

\*蒸発量と降雨量は総量で示した。

### 2.2.3. 供試土壌および分析方法

#### 2.2.3.1. 供試土壌

ゲレロネグロの農地は、ラグーンから約300m離れた緩やかな起伏のある砂丘の丘陵地をブルドーザーで均平にして二つ造成された。二つの農地は管理歴が異なっており、それぞれの農地について調査した。一つは1年間の耕作歴がある2.0haの農地、もう一つは4年間の耕作歴がある0.6haの農地である。それぞれ点滴灌漑で管理されている。2.0haの農地ではカラバシータ (*Cucurbita pepo* L.; メキシコ・米南西部産の野生のペポカボチャの一種) 収穫後 (G1) に、0.6haの農地ではメロンを栽培している株間 (G2) で土壌調査した。また、農地内で作土層のメッシュサンプリング (30×15m) を52地点行った。また、灌漑の影響を受けていない自然土壌として、農地とラグーンのはほぼ中間地点 (G3) と農地近傍の丘陵地 (G4) を土壌調査した。G3はラグーンから約150m離れた低地で、G4はG3よりさらに約250m離れており、低地より約4m高い丘陵地で土壌調査をした。

ビスカイノでは、畝間灌漑で10年以上管理歴があるトウモロコシ耕作地で、収穫直後に土壌調査した。

ヘスマリアでは、畝間灌漑で11年間の管理歴があるカラバシータ耕作地で、収穫直後 (J1) に土壌調査した。灌漑の影響を受けていない自然土壌として、農地近傍 (J2) を土壌調査した。

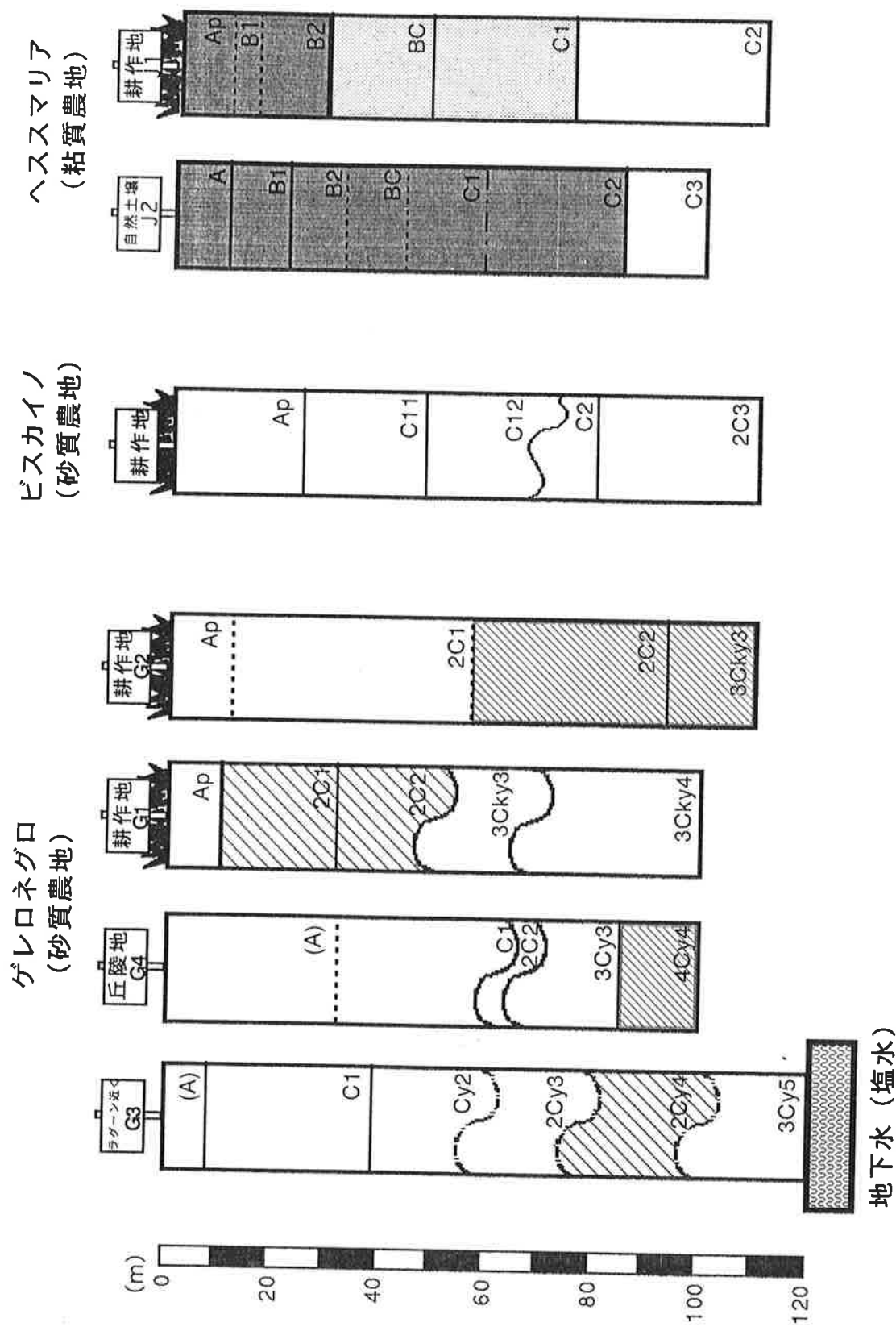
それぞれの土壌断面調査を行い、試料を採取し、分析に供した。

調査土壌断面形態を第2-2図に示した。

#### 2.2.3.2. 分析方法

2mm以下の風乾細土について、以下の方法により分析を行った。粒径組成は前処理として1.0molc L<sup>-1</sup> 酢酸ナトリウム緩衝液 (pH5.0) で塩類を除去後 (浅見, 1971), 分散処理を行い、常法に従ってピペット分析した (土壌標準分析・測定法委員会, 1986), 交換性塩基は0.2molc L<sup>-1</sup> 塩化バリウム-トリエタノールアミン (pH8.1) で抽出されたカルシウム, マグネシウム, カリウムおよびナトリウムイオンを測定した (Jackson, 1958)。陽イオン交換容量 (CEC) は土壌中の水溶性塩類を水で除去後, 0.4molc L<sup>-1</sup> 酢酸ナトリウム-0.1molc L<sup>-1</sup> 塩化ナトリウム-60%エタノール混液 (pH8.2) で交換基を飽和させ, 交換基に吸着されたナトリウムイオンを1.0molc L<sup>-1</sup> 硝酸マグネシウム溶液 (pH7.0) で抽出した (Mario and Rhoades, 1977)。全炭酸カルシウム量 (TNV) は0.1molc L<sup>-1</sup> 塩酸を土壌に加え, 加熱後, 過剰の塩酸量を滴定





粘土含量 (%) : 0~15    15~25    25~45    >45

第2-2図 調査土壌断面

法で求め、中和に要した塩酸量を全炭酸カルシウム量とし、百分率で表示した (Black, 1965) . pHは水および1molc L<sup>-1</sup> 塩化カリウムの1:2.5懸濁液についてガラス電極により測定した. 水溶性塩類の評価として、土壌飽和抽出法および土:液比=1:5法で行った. 土壌飽和抽出液は、土壌に水を少しずつ添加して土壌ペーストを調整した. 一夜静置後、土壌溶液採取用の遠心分離管に入れ、遠心分離し、土壌飽和抽出液を採取した. 乾燥地土壌の土壌溶液組成を把握する場合、上述のように土壌飽和抽出法が推奨されている (US Salinity Laboratory Staff, 1954) が、土壌中に存在している可溶性塩類の存在形態を確認するために、土:液比=1:5においても行った. すなわち、土壌1に対し水を5の割合で加え、1時間浸透後に濾過した. 分離したそれぞれの濾液のカルシウム、マグネシウム、カリウムおよびナトリウムイオン濃度は原子吸光光度法で、硫酸、硝酸および塩化物イオン濃度はイオンクロマトグラフィー法で、重炭酸イオン濃度は微量拡散法 (三宅ら, 1991) で測定した. また、pHはガラス電極法、電気伝導度 (EC) は電気伝導率計により測定した. 結晶性粘土鉱物組成は、2 μm以下の粘土画分を分離採取し、Mehra and Jacksonの方法 (1960) で脱鉄処理したのちマグネシウム飽和粘土、カリウム飽和粘土を調整し、定方位試料を用いX線回折を行い、同定した.

## 2.2.4. 結果および考察

### 2.2.4.1. 灌漑水の特徴

調査地域では、山岳地帯に降った雨が浸透した地下水を灌漑水として利用している.

調査地点の灌漑水の水質を黄河 (中華人民共和国・寧夏回族自治区中衛県沙坡頭) と千代川 (鳥取市) の河川水と比較して、第2-2表に示した. ゲレロネグロの灌漑水は、数十km南の地点の井戸からパイプラインで運んでいる. 米国農務省の灌漑水の水質評価基準によると (US Salinity Laboratory Staff, 1954) , 黄河流域の灌漑水ではC2-S1 (塩性害中・アルカリ害弱) に分類される (本名ら, 1996) のに対し、ゲレロネグロの灌漑水はC3-S1 (塩性害強・アルカリ害弱) に分類された. EC値およびナトリウム吸着比 (SAR) は、中国の黄河流域の灌漑水と比較しても高く、良質とは言えない. しかし、半島内のほとんどの地域では、EC値で4dS m<sup>-1</sup>以上の塩分濃度の高い灌漑水を利用しているようである. また、重炭酸イオン濃度が高く、その影響については「問題が増大しつつある」と区分された (FAO, 1986) . 計画では2mm d<sup>-1</sup>の灌漑水を行うことになっているが、実際はそれ以上に灌水しているようであった.

ビスカイノおよびヘススマリアの灌漑水については、詳細な成分測定は出来なかつ

第2-2表 メキシコ・カリフォルニア半島中央部の灌漑水の水質

採取地	pH	EC ( $\text{dS m}^{-1}$ )	Cations and Anions ( $\text{mmolc L}^{-1}$ )						SAR		
			Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>		Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
ゲレロネグロ	7.97	1.21	6.45	0.16	2.41	1.87	2.43	0.00	7.23	0.48	4.41
ビスカイノ	8.30	2.40	—	—	—	—	—	0.80	15.00	2.70	—
黄河 (沙波頭)	8.74	0.38	1.94	0.43	0.84	0.84	2.64	—	0.91	0.61	2.00
千代川 (鳥取)	6.18	0.06	0.10	0.01	0.11	0.11	—	—	0.31	0.07	0.32

たが、EC値でみると、それぞれ $2.4\text{dS m}^{-1}$ 、 $4\text{dS m}^{-1}$ の灌漑水を利用していた。両地域では、一週間に一度 $10\text{mm}$ 程度の畝間灌漑を行っている。しかし、生育状況によって灌水量を増減させている。ビスカイノでは灌漑水中の窒素濃度で $10\text{mg L}^{-1}$ 以上の値を示し、地下水の硝酸態窒素汚染が進行していた。

#### 2.2.4.2. 自然土壌の特徴

写真2-1～写真2-3に土壌断面写真，第2-3表に土壌断面形態を示した。

##### 2.2.4.2.1. ゲレロネグロ

###### 2.2.4.2.1.1. ラグーン近くの低地 (G3)

ラグーン近くの低地で土壌調査をした。ラグーンの入り江は広大な海成湿地帯となっており、ヨシ等が群生していた。陸に入るとアカザ科ハマアカザ属チャミソ (*Atriplex californica*) が自生しており、調査地点では無数に散在していた。

土壌断面形態：土壌断面は数層の砂の堆積物で構成されており、土壌としての発達程度は未熟であった。砂の堆積物は、浅黄色層 (0～58cm)、赤褐色層 (58～100cm)、灰黄色層 (100cm～) の三つの層に大きく分けられた。表層は非常に乾燥しており、チャミソの細根が多く確認されたが、有機物の集積はほとんど認められなかった。浅黄色層、赤褐色層には小さな亜円礫と貝殻の小片が含まれていた。赤褐色層は他の層より、比較的緻密な層になっていた。灰黄色層には炭酸カルシウムの白色沈積物が斑点状に認められた。下層ほど土壌の湿り気が増し、地下水位が高いことがうかがえられた。

物理的性質：全層にわたり細砂を主体 (75～90%) とした土性であった。微砂、粘土画分は極めて少ない (1%未満) が、赤褐色層にはやや多く (3～5%) 含まれていた。下層ほど水分含量が増加する傾向が顕著に認められた。

化学的性質：調査断面内のpHは全層にわたり7.6～8.6で、特に上層で高い値を示した。下層の灰黄色層は、他の層に比較してTNVが非常に高く、多量の炭酸カルシウムの存在がうかがえられた。また、赤褐色層および灰黄色層には多量の硫酸カルシウムの存在がうかがえられた。地下水面が高い位置にある事に起因し、下層ほど水分含量が増加し、それに伴い、ナトリウムイオン、塩化物イオンが多量に含まれていた。CECは全層にわたり低く、土壌の吸着能は小さかった。腐植が少ないため、土壌の吸着能は、粘土表面の陽イオン交換基に起因するものと考えられた。しかし、塩基飽和度がいずれも100%を超えており、塩類は交換態として土壌固相に吸着されている形態よりも、難溶性の形態で土壌環境中に沈澱している方がはるかに多かった。



写真2-1・ゲロネグロ  
ラグーン近くの低地 (G3)



写真2-2・ゲロネグロ  
丘陵地 (G4)

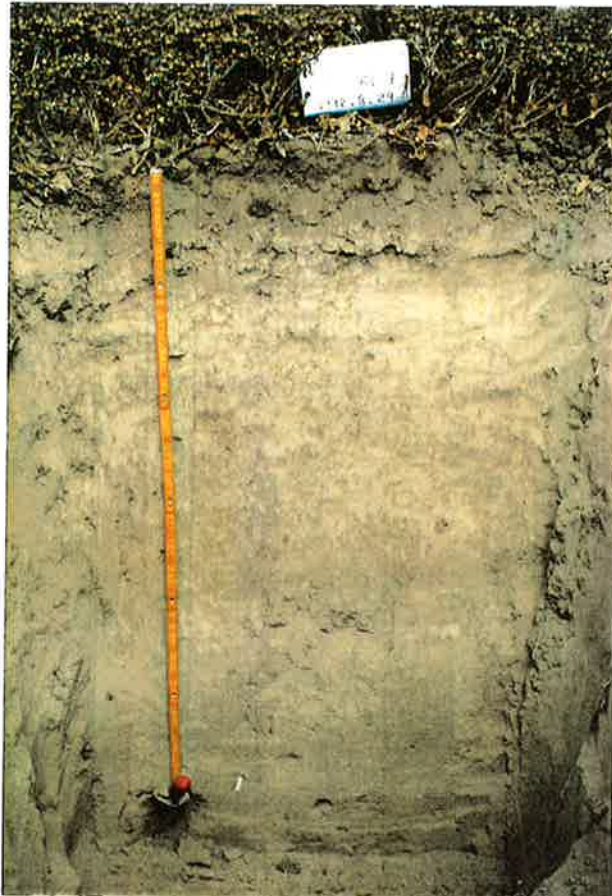


写真2-3・ヘスマリア  
自然土壌 (J2)

第2-3表 調査土壌の断面形態 (メキシコ・カリフォルニア半島中央部・自然土壌)

調査地点 および層位	土深 (cm)	土色		構造	乾湿度	硬度 (mm)	植物根	炭酸塩	貝殻片	層界
		湿	乾							
ゲレロネグロ・ラグーン近くの低地 (G3)										
(A)	0~ 8	2.5 Y 7/2	2.5 Y 7/2	単粒状	乾	0	細富	強石灰質	小片++	平坦明瞭
C1	8~ 37	2.5 Y 7/3	2.5 Y 7/2	単粒状	乾	8	細富	強石灰質	小片+	平坦明瞭
Cy2	37~ 58	2.5 Y 6/3	2.5 Y 7/2	単粒状	乾	4	細富	強石灰質	小片++	波状判然
2Cy3	58~ 74	10YR5/4	10YR6/2	単粒状	半湿	9	細あり	極強石灰質	小片+	波状判然
2Cy4	74~100	10YR4/6	10YR6/3	単粒状	湿	5	細まれ	極強石灰質	小片+	波状画然
3Cky4	100~120+	2.5 Y 6/3	2.5 Y 7/1.5	単粒状	湿	14	なし	極強石灰質	なし	
ゲレロネグロ・丘陵地 (G4)										
(A)	0~ 30	2.5 Y 7/2	2.5 Y 7/2	単粒状	乾	—	細富	強石灰質	小片+++	平坦漸変
C1	30~ 60	2.5 Y 7/3	2.5 Y 7/2	単粒状	乾	—	細富	強石灰質	小片+++	波状明瞭
2C2	60~ 65	2.5 Y 7/3	2.5 Y 7/2	単粒状	乾	—	細富	強石灰質	小片+++	波状画然
3Cy3	65~ 85	2.5 Y 6/3	2.5 Y 7/3	単粒状	乾	—	細含む	極強石灰質	小片+++	平坦明瞭
4Cy4	85~100+	7.5YR5/6	7.5YR5/6	単粒状	乾	—	細あり	極強石灰質	小片+	
ヘススマリア (J2)										
A	0~ 10	10YR5/3	10YR5/3	団粒. 強度亜角塊状	乾	6	細富	弱石灰質	なし	平坦明瞭
Bw1	10~ 21	10YR5/3	10YR5/3	強度亜角塊状	乾	21	細富	弱石灰質	なし	平坦明瞭
Bw2	21~ 30	10YR5/3	10YR5/3	中度亜角塊状	乾	24	細含	中石灰質	なし	平坦漸変
BC	30~ 41	10YR5/3	10YR5/3	弱~中度亜角塊状	乾	24	細含	中石灰質	なし	平坦漸変
C1	41~ 55	10YR5/3	10YR5/3	壁状	乾	22	細含	弱石灰質	なし	平坦判然
C2	55~ 82	10YR5/3	10YR5/3	壁状	乾	24	細あり	中石灰質	なし	平坦明瞭
C3	82~100+	10YR5/3	10YR5/3	壁状	乾	21	細あり	中石灰質	なし	平坦明瞭

#### 2.2.4.2.1.2. 丘陵地 (G4)

低地からさらに陸に入り、ラグーンから約400m離れている丘陵地で土壌調査をした。植生として、チャミソ (*Atriplex californica*) の他にビッドリージョ (*Mesembryanthemum crystallinum*) などの耐塩性植物が多く自生していた。調査地点は、ラグーン近くの低地より約4m高い地点であった。

土壌断面形態：土壌断面は数層の砂の堆積物で構成されており、土壌の発達程度は未熟で、土壌有機物に乏しかった。低地に比較して高い地点に位置しているため、全層にわたり土壌が乾燥しており、地下水位が低い位置にあることがうかがえられた。85cmまでの深さは浅黄色を呈し、ビッドリージョの細根が多く確認され、小さな亜円礫と貝殻の小片が含まれていた。また、85cmから下層には、やや緻密な赤褐色層が現れ、細根がわずかに確認された。

物理的性質：全層にわたり乾燥しており、細砂を主体 (80~90%) とした土性であった。微砂、粘土画分は極めて少ない (1%未満) が、下層の赤褐色層には微砂、粘土画分がやや多く (3~5%) 含まれていた。

化学的性質：調査断面内のpHは全層にわたり8以上を示し、上層ほど高い傾向を示した。下層の赤褐色層には硫酸カルシウムが多量に沈積されていた事がうかがえられたが、TNVは全層にわたり低く、炭酸カルシウムの過剰な存在は認められなかった。また、CECは全層にわたり低かったが、赤褐色層は比較的高い値であった。腐植が少なく、土壌の吸着能は粘土表面の陽イオン交換基に起因するものと推察された。塩基飽和度がいずれも100%を超えており、塩類は交換態として土壌固相に吸着されている形態よりも、難溶性の形態で土壌環境中に沈澱している方がはるかに多かった。

#### 2.2.4.2.2. ヘスマリア (J2)

この地域に生育する植生として、マメ科ネムリグサ属のメスキーテ (*Prosopis* sp.) などの塩性低灌木やビッドリージョ (*Mesembryanthemum crystallinum*) などの耐塩性植物が散在していた。

土壌断面形態：土壌断面は非常に均質で細粒な堆積物で構成され、礫は確認されなかった。また、全層にわたり非常に乾燥しており、土壌が緻密で硬く締まっていた。表層にはわずかに腐植が集積し、暗色を呈していた。断面内全体に耐塩性植物の細根が若干含まれていた。表層から約40cmまで、土壌構造 (亜角塊状、角塊状) の発達が認められた。それより下層では、土層全体が緊密に凝集しており、一定の構造は認められず壁状構造であった。

物理的性質：約80cmまで砂20～40%，微砂30～50%，粘土30～50%で構成される軽埴土，埴壤土（LiC，CL）で，それより下層は，約70%の細砂で構成される粗粒な土性（SL）であった。また全層にわたり水分含量が低く，土壤が乾燥していた。

化学的性質：全層にわたり水溶性塩類は少なかったが，塩基は交換態として多量に土壤に吸着されていた。有機物がわずかであり，土壤の吸着能は粘土表面の陽イオン交換基に起因するものであった。CECは粘土含量をほぼ反映しており，粘土質で構成されていた約80cmまでは20～30cmolc kg<sup>-1</sup>，細砂で構成されていた下層は約13cmolc kg<sup>-1</sup>であった。塩基飽和度は約100%で，交換性カルシウムが50%以上を占めていた。TNVは全層にわたり低く，炭酸カルシウムの過剰な存在は認められなかった。

#### 2.2.4.3. 灌漑土壤の特徴

写真2-4～写真2-7に土壤断面写真，第2-4表に土壤断面形態を示した。

##### 2.2.4.3.1. ゲレロネグロ

###### 2.2.4.3.1.1. 1年間の灌漑歴の耕作地（G1）

2.0haの農地で，点滴灌漑で1年間の耕作歴がある。カラバシータ（CALABAZILLA…*Cucurbita pepo* L.；メキシコ・米南西部産の野生のペポカボチャの一種）収穫後，2ヶ月経過した後に調査した。

土壤断面形態：土壤断面は数層の砂の堆積物で構成されており，土壤としての発達程度は未熟であった。表層は浅黄色層を呈していたが，作土層直下（10～48cm）に非常に緻密な赤褐色層，それより下層に灰黄色を呈する層が存在していた。このことから，調査地点は造成される際に，もともとの表層が切り取られた地点であると推察された。灰黄色層には炭酸カルシウムに起因すると思われる白色沈積物が斑点状に認められた。全層にわたり小さな円礫と細根がわずかに確認された。また，48cmより下層に若干の湿り気が感じられた。

物理的性質：全層にわたり細砂を主体（80～90%）とした土性であった。10～48cmの赤褐色層には微砂，粘土画分がやや多く（3～5%）含まれていた。

化学的性質：10～48cmのpHは8.0～8.8と非常に高くなっていたが，48cmより下層では7.8と低かった。また，10～32cmまでの赤褐色層には多量の塩類の集積は認められず，ECeで約0.8dS m<sup>-1</sup>であったが，32cmより下層では3dS m<sup>-1</sup>と非常に高くなっており，多量の塩類が含まれていた。集積塩類の主体は硫酸カルシウム，炭酸カルシウム，重炭酸カルシウム等であった。また，48cmより下層の灰黄色層ではTNVが非常に高いことから，多量の炭酸カルシウムの存在がうかがえられた。



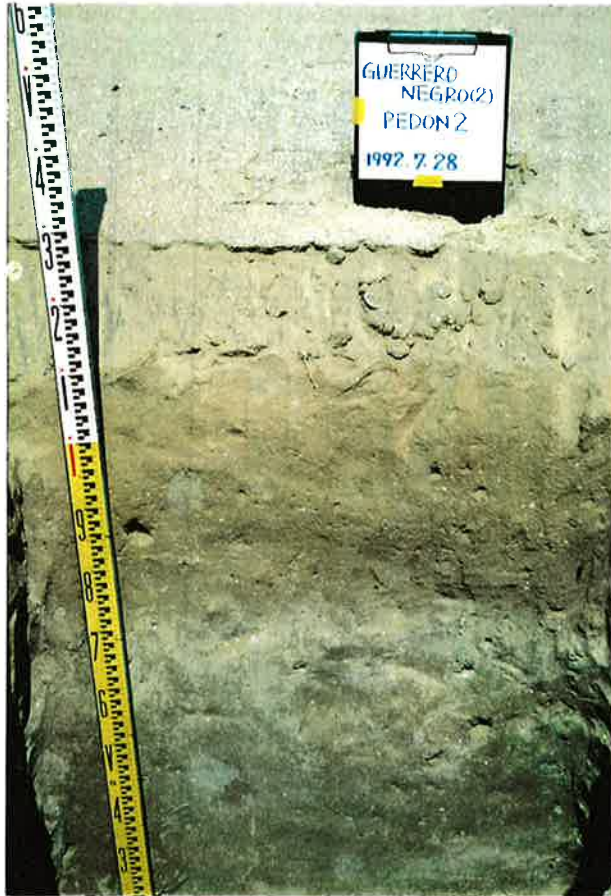


写真2-4・ゲレロネグロ  
1年間灌漑歴の耕作地 (G1)



写真2-5・ゲレロネグロ  
4年間灌漑歴の耕作地 (G2)

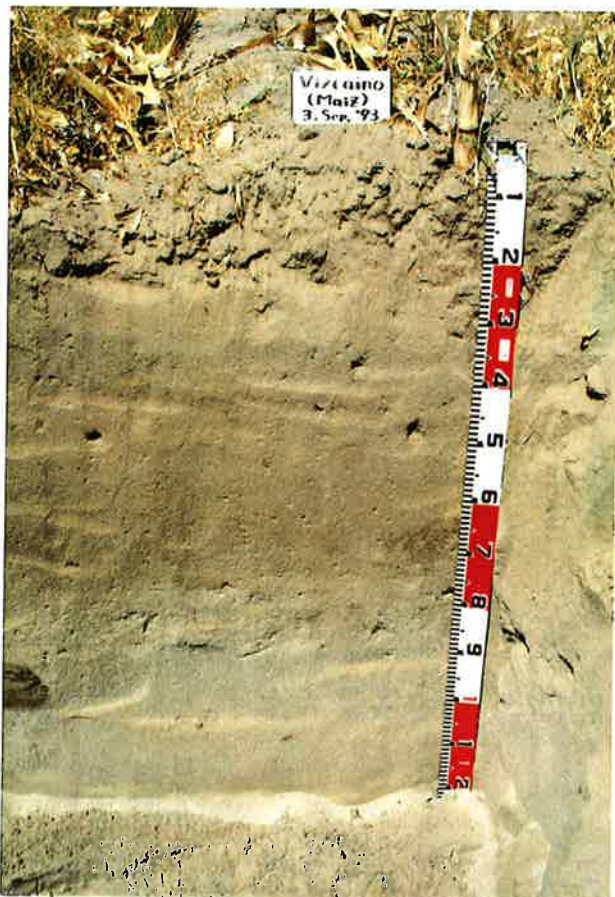


写真2-6・ビスカイノ  
10年間以上灌漑歴の耕作地



写真2-7・ヘスマリア  
11年間灌漑歴の耕作地 (J2)

第2-4表 調査土壌の断面形態 (メキシコ・カリフォルニア半島中部・灌漑土壌)

調査地点 および層位	土深 (cm)		土色		構造	乾湿度	硬度 (mm)	植物根	炭酸塩	貝殻片	層界
	0~	10~	湿	乾							
ゲレロネグロ・1年間の灌漑歴の耕作地 (G1)											
Ap	0~10	2.5 Y 7/3	2.5 Y 7/3	2.5 Y 7/3	単粒状	乾	0	細あり	強石灰質	小片++	平坦画然
2C1	10~32	7.5 YR5/6	7.5 YR5/6	7.5 YR5/6	単粒状	乾	16	細あり	強石灰質	小片+	平坦明瞭
2C2	32~48	10YR5/6	10YR5/6	10YR6/4	単粒状	乾	16	細あり	強石灰質	なし	波状明瞭
3Cky3	48~65	2.5 Y 6/3	2.5 Y 7/1.5	2.5 Y 7/1.5	単粒状	半湿~湿	11	細あり	極強石灰質	なし	波状明瞭
3Cky4	65~110+	2.5 Y 7/2	5 Y 8/1	5 Y 8/1	単粒状	半湿~湿	14	細まれ	極強石灰質	なし	
ゲレロネグロ・4年間の灌漑歴の耕作地 (G2)											
Ap	0~12	2.5 Y 7/3	2.5 Y 7/3	2.5 Y 7/3	単粒状	乾	0	細含	強石灰質	小片+++	平坦漸変
2C1	12~55	10YR5/6	10YR6/3	10YR6/3	単粒状	半湿	12	細含, 中あり	強石灰質	小片+	平坦漸変
2C2	55~93	10YR5/6	10YR6/3	10YR6/3	単粒状	半湿	11	細まれ, 中まれ	強石灰質	なし	平坦明瞭
3Cy3	93~110+	10YR5/4	10YR6/2	10YR6/2	単粒状	半湿	5	なし	強石灰質	なし	
ピスカイノ・10年以上の灌漑歴の耕作地											
Ap	0~24	2.5 Y 5/2	2.5 Y 5.5/2	2.5 Y 5.5/2	単粒状	乾	-	細富, 小含	-	なし	平坦明瞭
C11	24~45	2.5 Y 6/2	2.5 Y 6/2	2.5 Y 6/2	単粒状	乾	-	細含, 小あり	-	なし	平坦明瞭
C12	45~63/70	2.5 Y 6/2	2.5 Y 6/2	2.5 Y 6/2	単粒状	乾	-	細あり	-	なし	波状画然
C2	63/70~77	2.5 Y 6.5/2	2.5 Y 6.5/2	2.5 Y 6.5/2	単粒状	乾	-	細まれ	-	なし	平坦明瞭
2C3	77~120+	2.5 Y 6.5/1	2.5 Y 6.5/1	2.5 Y 6.5/1	単粒状	乾	-	なし	-	なし	
ヘスマリア・11年間の灌漑歴の耕作地 (J1)											
Apz1	0~10	10YR4/2	10YR5/3	10YR5/3	中度亜角塊状	乾	10	細富	中石灰質	なし	平坦漸変
Apz2	10~15	10YR4/2	10YR5/3	10YR5/3	中~弱度亜角塊状	乾	15	細富, 小含	中石灰質	なし	平坦漸変
Apz3	15~28	10YR4/2	10YR5/3	10YR5/3	中度角塊状	乾	20	細含, 小あり	中石灰質	なし	平坦明瞭
Apz4	28~45	10YR5/3	10YR5/3	10YR5/3	弱度角塊状	半湿	22	細含, 小あり	中石灰質	なし	平坦明瞭
Cz1	45~68	10YR5/3	10YR5/3	10YR5/3	壁状	半湿	20	細あり, 小あり	中石灰質	なし	平坦明瞭
Cz2	68~110+	10YR5/3	10YR5/3	10YR5/3	壁状	半湿	21	細あり, 小あり	中石灰質	なし	平坦明瞭

#### 2.2.4.3.1.2. 4年間の灌漑歴の耕作地 (G2)

0.6haの農地で、点滴灌漑による4年間の耕作歴がある。栽培中のメロンの株間で土壌調査した。

土壌断面形態：土壌断面は砂の堆積物で構成されており、土壌としての発達程度は未熟であった。上層は浅黄色層を呈していたが、55cmより下層は非常に緻密な赤褐色層が存在していた。表層には小さな貝殻が多く確認された。浅黄色層には小さな亜円礫と細根がわずかに確認された。また、12cmより下層に若干の湿り気が感じられた。

物理的性質：全層にわたり細砂を主体（80～90%）とした土性であった。微砂、粘土画分は極めて少ないが、55～110cmの赤褐色層には微砂、粘土画分がやや多く（3～5%）含まれていた。

化学的性質：調査断面内のpHは8.2～9.0で全層にわたって非常に高かった。また、全層にわたり塩類の集積はあまりみられず、ECe値は $1\text{dS m}^{-1}$ 前後であった。このことから、塩類が土層内に集積される傾向は認められなかった。また、TNVは全層にわたり低く、炭酸カルシウムの過剰な存在は認められなかった。

#### 2.2.4.3.2. ビスカイノー10年以上の灌漑歴の耕作地—

畝間灌漑で10年以上管理歴があるトウモロコシ耕作地で、収穫直後に調査した。

土壌断面形態：土壌断面は全層にわたり、非常に緻密で硬く締まっていた。また層位の分化が明瞭に認められず、土壌断面全体としての発達程度は未熟であった。28cmまで土壌が乾燥していたが、それより下層は若干湿り気を感じた。作土層には土壌構造（亜角塊状・角塊状）が発達しており、それより下層は土層全体が緊密に凝集しており、一定の構造は認められなかった。また、15cmまでは若干の有機物の集積が認められた。貝殻片は認められず海岸付近で生成されたゲレロネグロとは異なる堆積様式をしていると推察された。

物理的性質：全層にわたり砂質な土性であったが、ゲレロネグロと比較し、粘土・微砂画分が若干多く含まれていた。また、細砂画分と粗砂画分がほぼ同量づつ含まれていた。

化学的性質：調査断面内のpHは8.0～8.3で全層にわたって高かった。また、表層のECe値が $4\text{dS m}^{-1}$ を超え、集積塩類の主体は塩化ナトリウムおよび重炭酸ナトリウム等のナトリウム塩であった。TNVは全層にわたり低く、炭酸カルシウムの過剰な存在は認められなかった。CECは粘土含量をほぼ反映して低く、 $3.7\sim 8.0\text{cmolc kg}^{-1}$ で下層ほど減少していた。塩基飽和度が全層にわたりほぼ100%であった。

#### 2.2.4.3.3. ヘススマリア (J1) —11年間の灌漑歴の耕作地—

畝間灌漑で11年間の管理歴があるカラバシータ耕作地で、収穫直後に調査した。この地域では年二回の作物栽培を行っており、尿素主体の施肥を行っていた。

土壌断面形態：全層にわたり、土壌は非常に緻密で硬く締まっていた。15cmまでは若干の有機物の集積が認められた。28cmまで土壌が乾燥していたが、それより下層は若干湿り気を感じた。作土層には土壌構造（亜角塊状・角塊状）が発達しており、それより下層は土層全体が緊密に凝集しており、一定の構造は認められなかった。

物理的性質：68cmまで砂30～55%，微砂25～40%，粘土15～35%で構成される軽埴土、埴壤土（LiC, CL）で、それより下層は、60～75%の細砂で構成される粗粒な土性（SL）であった。また、全層にわたり水分含量が低く、土壌が乾燥していた。

化学的性質：表層に多量の塩類集積がみられた（ $E_{Ce}=13dS\ m^{-1}$ ）。集積塩類の主体は塩化ナトリウム・塩化マグネシウム・塩化カルシウム等の塩化物塩であった。下層になるに従い、土壌溶液中に塩化ナトリウムの占める割合が高くなっていた。また、塩基は交換態としても多量に吸着していた。CECは粘土質で構成されていた68cmまでは $20\sim 30\text{cmolckg}^{-1}$ 、細砂で構成されていた下層は約 $13\text{cmolc}\ kg^{-1}$ で、粘土含量をほぼ反映していた。塩基飽和度は約100%で、交換性カルシウムが50%以上を占めていた。TNVは全層にわたり低く、炭酸カルシウムの過剰な存在は認められなかった。

#### 2.2.4.4. 粘土鉱物組成

調査土壌断面の粘土鉱物組成を第2-5表に示した。

##### 2.2.4.4.1. ゲレロネグロ

いづれの調査地点も上層の浅黄色層、赤褐色層と下層に灰黄色層で粘土鉱物組成に大きな違いが認められた。

上層の浅黄色層、赤褐色層ではスメクタイト、イライト、カオリナイト、石英、斜長石が認められた。しかし、灰黄色層には上層に存在していた粘土鉱物は認められず、石灰岩の主要構成鉱物であるカルサイトを主体とした堆積層であると推察された。

##### 2.2.4.4.2. ビスカイノ

全層にわたり類似しており、スメクタイトが多量に卓越し、若干のイライト、石英、斜長石が認められた。

##### 2.2.4.4.3. ヘススマリア

いづれの調査地点も全層にわたり類似しており、スメクタイトが多量に卓越し、若干のイライト、カオリナイト、石英、斜長石が認められた。

第2-5表 供試土壌の粘土鉱物組成 (メキシコ・カリフォルニア半島中央部)

調査地点 および層位	深さ (cm)	スメクタイト	イライト	カオリナイト	石英	斜長石	カルサイト
ゲレロネグロ・1年間の管理歴の耕作地 (G1)							
Ap	0~10	++	+	++	++	+	-
2C1	10~32	++	++	++	+++	+	-
2C2	32~48	+	++	++	+++	+	-
3Cky3	48~65	-	-	-	-	-	+++
3Cky4	65~110+	-	-	-	-	-	++++
ゲレロネグロ・4年間の管理歴の耕作地 (G2)							
Ap	0~12	+	+	+	++	+	-
2C1	12~55	+	+	+	+++	+	-
2C2	55~93	+	++	++	+++	+	-
3Cky3	93~110+	++	++	++	+++	+	-
ゲレロネグロ・ラグーン近くの低地 (G3)							
C1	0~8	+	+	+	++	+	-
2C2	8~37	+	+	+	++	+	-
2Cy3	37~58	+	+	+	++	+	-
3Cy4	58~74	+	+	+	++	+	-
3Cy5	74~100	+	+	+	++	+	-
4Cky6	100~120+	-	-	-	-	-	++++
ゲレロネグロ・丘陵地 (G4)							
(A)	0~30	++	++	++	+++	+	-
C1	30~60	++	++	++	+++	+	-
2C2	60~65	+	++	++	+++	+	-
3Cy3	65~85	+	++	++	+++	+	-
4Cy4	85~100+	+	++	++	+++	+	-
ビスカイノ・10年間以上の管理歴の耕作地							
Ap	0~24	++++	++	-	++	+	-
C11	24~45	++++	++	-	++	+	-
C12	45~63/70	+++	+	-	+	++	-
C2	63/70~77	+++	+	-	++	+	-
2C3	77~120+	+++	+	-	+	+	-
ヘスマリア・11年間の管理歴の耕作地 (J1)							
Ap	0~10	+++	+	+	+	+	-
B1	10~15	+++	+	+	+	+	-
B2	15~28	+++	+	+	+	+	-
BC	28~45	++++	+	+	+	+	-
C1	45~68	++++	++	+	++	+	-
C2	68~110+	++++	++	+	++	+	-
ヘスマリア・自然土壌 (J2)							
A	0~10	++++	+	+	+	+	-
B1	10~21	++++	+	+	+	+	-
B2	21~30	++++	+	+	+	+	-
BC	30~41	++++	+	+	+	+	-
C1	41~55	+++	+	+	++	+	-
C2	55~82	+++	+	+	++	+	-
C3	82~100+	+++	+	+	++	+	-

- : none, + : scarce, ++ : common, +++ : abundant, ++++ : predominant

#### 2.2.4.5. 土壌生成要因

カリフォルニア半島中央部の土壌は比較的新しい堆積物で構成されているが、主に風による影響が強く、堆積された時期の環境とわずかな位置関係が大きく左右していた。近隣に位置する地域でも、海岸に近い砂丘地帯と内陸の乾燥地帯では異なる堆積作用が進行したと考えられた。

砂丘地帯に位置するゲレロネグロは、いずれの土壌断面も全層にわたり細砂が主体のきめ細やかな砂質な土性（S~LS）で、貝殻の小片がたくさん認められた。粗砂主体の鳥取砂丘砂（飯村ら，1995）と比較して、粗砂と細砂の割合が逆転しており、きめ細かな土性であった。この地域では、砂が幾度か堆積されながら海岸砂丘が生成されたと推察され、基本的に浅黄色、赤褐色、灰黄色を呈する三層からなる砂の堆積物で構成されていた。下層の灰黄色層で確認されたカルサイトは、半島が隆起する前の海洋底基盤上に堆積した石灰岩（上田ら，1973）に由来するものと考えられた。この灰黄色層では、他の層に比較してTNVが非常に高く、多量の炭酸カルシウムが存在していた。そしてこの堆積層の上部に、半島東部のカリフォルニア湾側に連なる山岳地帯から運ばれた花崗岩の碎屑物および海底火山噴出物等が、さらに堆積されたと考えられた。この堆積物の土壌母材は花崗岩質であるため、強い風化作用を受けることなく砂が形成されたと考えられる。その後、その砂が陸上に打ち上げられることによって、海岸砂丘が生成されたと考えられた。

粘土含量や腐植が少ないため、土壌中への塩類の吸着能は小さく、塩類は遊離の形態で存在し易い環境にあると考えられた。断面内の塩類組成は調査地点によって異なっていた。ラグーン近くでは地下水面が高い位置にあると推察され、地下水由来の塩基成分が下層へ供給されていた。一方、丘陵地は地下水面が低い位置にあると推察され、地下水に起因する塩類は下層まで認められなかった。ラグーン近くの土壌断面と比較し、丘陵地では赤褐色層が深い位置に現れた。ラグーンよりも距離が離れるにつれて赤褐色層の上部に、現在浅黄色を呈している砂が厚く堆積されたと考えられる。その事により、赤褐色層が異なる深さに現れたと考えられる。ECe値がカルシウムイオン、硫酸イオンと正の相関がみられる事からも、土壌溶液のECe値を高くしている要因は硫酸カルシウムであると考えられた。ここで、土壌溶液のイオン濃度の支配要因として、難溶性塩である硫酸カルシウムの沈殿生成が考えられた。その論拠を得るため、Adams（1971）が提案している繰り返し計算を応用することによって、イオン対を考慮しながら硫酸カルシウムの溶解度積を求め、硫酸カルシウムに対する飽和度指数

(SI) を次式によって計算した。

$$SI_{CaSO_4} = \log \left( \frac{(Ca^{2+})(SO_4^{2-})}{K_{sp_{CaSO_4}}} \right)$$

ここで丸括弧はイオンの活量を、 $K_{sp_{CaSO_4}}$ は硫酸カルシウムの溶解度積を示す。

下層に堆積されていた赤褐色層と灰黄色層で、 $SI_{CaSO_4}$ が0に近く、ほぼ過飽和状態であった。土液比が1:5という高水分条件下においても硫酸カルシウムが過飽和状態であったことから、多量の硫酸カルシウムが沈積していると考えられた。土壤調査した周辺では、一般的に、30~40cmの厚さで硫酸カルシウムの沈積している赤褐色層が土壤断面内に堆積されていた。自然土壤と農地の断面内において赤褐色層が異なる深さにみられた。これは、農地は切り盛りにより造成したためであると推察された。過去に赤褐色層が表層であった時期があり、比較的暑く乾燥した気候条件下におかれていたと考えられた。そのような気候下で粘土が若干富化されると同時に、一次鉱物より遊離した酸化鉄が砂粒の表面に殻を形成し、土壤が赤く着色されたと推察される。そしてその時期に、降雨による洗脱がある程度おさえられ、ナトリウム塩およびマグネシウム塩に比べて水に対する溶解度が比較的低い硫酸カルシウムが赤褐色層に残留し、激しい蒸発散作用により、凝集・沈積したと考えられた。そのような因子により、アメリカ合衆国テキサス州からカリフォルニア州南東部で見られるような赤褐色層（松尾，1974）が生成されたと推察された。そしてその後、現在のような気候下に置かれ、ラグーンからの風によって長石に富む砂が運搬と堆積を繰り返す間にイライトおよびカオリナイトに変化し、砂丘の形成時に砂と同時に運び込まれたと考えられる。ラグーンに存在していた砂丘の砂の粒が、沿岸流によって海岸に打ち上げられ、風によって運搬、堆積を繰り返し、さらに内陸へ向かって吹く卓越風によって、砂丘は内陸の方へと押しやられ、幾度か砂が堆積されて、現在の海岸砂丘が生成されたと考えられた。この地域で調査した土壤断面は、砂漠としての特徴が強く現れた若い未熟な土壤であった。Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 1998)によれば、風の堆積作用による砂の被覆物で覆われていることから、EntisolのPsammentに分類された。また世界土壤照合基準 (World Reference Base for Soil Resources : FAO, ISRIC and ISSS, 1998)によれば、土壤有機物に乏しく、湿潤状態での明度が3以上および彩度が2以上、乾燥状態での明度が4.5以上であり、塩基飽和度が75%以上であることから、Aridic Arenosolに分類された。

ビスカイノの土壤断面は、主に風成作用による碎屑物で構成されており、層位の分化は明瞭に認められず、土壤の発達程度は未熟で、ゲレロネグロと同様に砂質な土性

であった。しかし、土壌断面内の粘土鉱物組成はゲレロネグロとは異なり、スメクタイトが多量に卓越しており、カルサイトの堆積層は調査断面内では認められなかった。また、土層内において硫酸カルシウムと炭酸カルシウム等の過剰な沈積は認められなかった。この地域は内陸に位置していることから、海岸付近で生成されたゲレロネグロとは異なり、他地域からの碎屑物が運搬され堆積されて生成されたと推定された。Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 1998) によれば、風の堆積作用による砂の被覆物で覆われていることから、EntisolのPsammentに分類された。また世界土壌照合基準 (World Reference Base for Soil Resources : FAO, ISRIC and ISSS, 1998) によれば、土壌有機物に乏しく、湿潤状態での明度が3以上および彩度が2以上、乾燥状態での明度が4.5以上であり、塩基飽和度が75%以上であることから、Aridic Arenosolに分類された。

ヘスマリアはゲレロネグロよりやや内陸に位置しており、比較的粘質な土壌が分布していた。全層にわたり礫は確認されず均質な土壌断面であったことから、この地域の土壌は、他地域から碎屑物が運搬、堆積されたと考えられた。調査した土壌断面内では全層にわたり $SI_{CaSO_4}$ が $-4.5 \sim -2.5$ 、TNVが2.5~4.5%で硫酸カルシウムと炭酸カルシウム等の過剰な沈積は認められなかった。上層は、比較的粘土に富み、構造が発達し、土壌が非常に硬く締まっていたが、粘土鉱物の主体がスメクタイトであることに起因すると考えられた。また、厳しい乾燥環境下による蒸発型の土壌環境として、スメクタイトに富む粘土による膨潤と収縮の繰り返しが激しく上層で起こっており、土壌溶液中にナトリウム塩が多い事にも起因し、乾燥期に粘土の収縮により構造が発達したと考えられる。そのことにより下層に比較して上層の風化が若干進んでいると考えられた。そして、粘土やわずかの腐植が集積して暗色できわめて緻密な土層を造ったと考えられた。しかし断面全体としては、乾燥気候下でゆっくりとした可溶性塩類の溶解に伴いスメクタイトが生成されており、風化の程度は弱い堆積物と推察された。また、粘土の膨潤はさらに分散を引き起こし、透水性の低下や根の伸長の阻害等の土壌物理性の悪化が懸念された。Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 1998) によれば、風化の弱い細かな碎屑風成物であることからEntisolのOrthentに分類された。また世界土壌照合基準 (World Reference Base for Soil Resources : FAO, ISRIC and ISSS, 1998) によれば、風成堆積物からなること、湿潤状態での明度が3以上および彩度が2以上、乾燥状態での明度が4.5以上であり、塩基飽和度が75%以上であることから、Aridic Arenosolに分類された。



#### 2.2.4.6. 土壌断面内の塩類動態

異なった土壌断面がみられた三地域で農地として利用するため灌漑水を施すと、異なった水と塩類動態を示した。

ゲレロネグロの灌漑農地には、表層のECe値が比較的高い箇所（約 $3\text{dS m}^{-1}$ ）が局所的にみられたが、これは主に $\text{CaSO}_4$ に起因するものであった。肥料および灌漑水中の塩が付加され、蒸発作用が最も激しい表層に残存した結果と考えられた。しかし、塩類含量だけで判断すると弱塩類性で、塩感受性の高い作物の収量には若干影響されるが、作物生産を行う上では問題がない範囲であるといえる（US Salinity Laboratory Staff, 1954）。全体的にはEC値は $1\text{dS m}^{-1}$ 程度で、ナトリウム塩が集積する傾向は認められず、これまでの灌漑と降雨により塩類が下方に洗脱されたと考えられた。

重炭酸ナトリウムを含む土壌は、pHを測定する際に、添加する水が多くなるほど高い値を示すが、灌漑農地内の塩類の傾向を把握するため、メッシュサンプリング（ $30\times 15\text{m}$ ）を行い、作土層のpH（土液比=1:2.5）とEC（土液比=1:5）を測定し、その結果を第2-3図、その関係を第2-4図に示した。EC値とpHに有意な負の相関が見られ、塩類が洗脱されてEC値が低下した地点では、pHが上昇する傾向が現れていた。

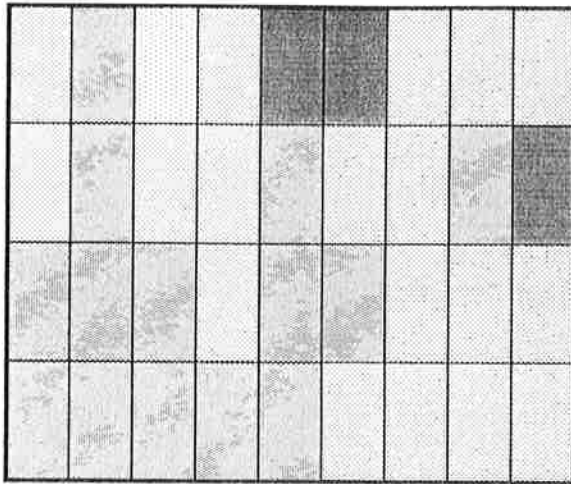
灌漑農地の土壌断面内の塩類集積量・組成はG1とG2では異なっていた。G1では下層の灰黄色層に硫酸カルシウムおよび炭酸カルシウムに起因する塩の集積が認められたが、赤褐色層には塩の集積は認められなかった。G2では赤褐色層を含めて調査した土壌断面内には、塩の集積は認められなかった。この地域の土壌断面内に一般的に認められる赤褐色層に硫酸カルシウムが多量に沈積していたことから、農地として利用する以前はG1とG2の赤褐色層にも多量の硫酸カルシウムが沈積していたと推察された。

自然土壌の土壌断面内で下層に出現した赤褐色層が農地の土壌断面では出現する深さが異なり、農地造成後のG1では $10\sim 32\text{cm}$ 、G2では $55\sim 70\text{cm}$ であった。自然土壌と灌漑土壌の土壌断面内の土壌ECeと土壌pHの比較を第2-5図に示した。赤褐色層のECe値は $3.4\text{dS m}^{-1}$ から $0.8\text{dS m}^{-1}$ および $0.9\text{dS m}^{-1}$ に低下し塩類は洗脱されていた。硝酸イオンが下層で検出されたことから、農地内の水溶性肥料成分はかなり洗脱的な環境下に置かれているといえる。そのような環境下で、硫酸カルシウム等の塩類も下層へ洗脱されたと考えられた。しかし、pHは8.1から8.8および9.0に上昇したことから、塩類組成が変化したと考えられた。

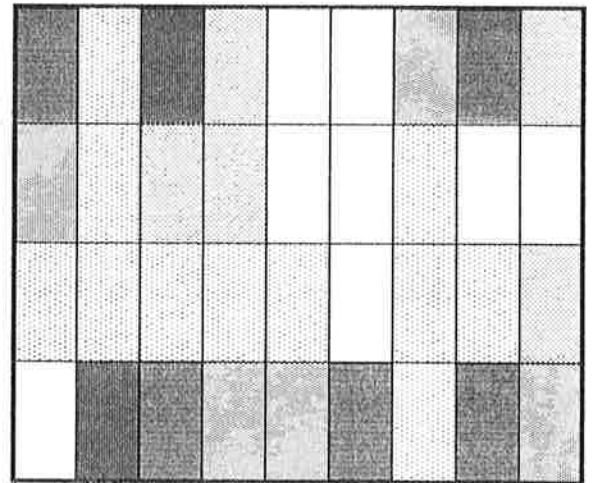
カルシウム塩は難溶性の形態で存在している上、灌漑水中に塩化ナトリウムが多量

【灌漑農地（2.0ha；1年間管理）】

pH (1 : 2.5)

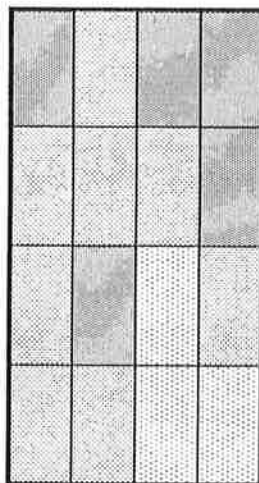


EC (1 : 5)

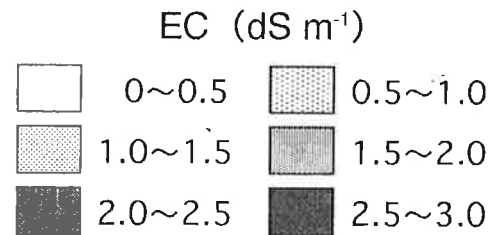
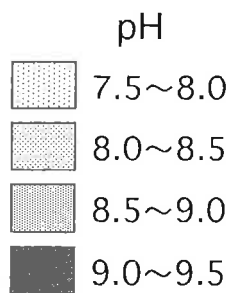
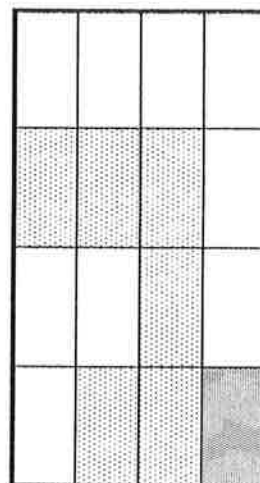


【灌漑農地（0.6ha；4年間管理）】

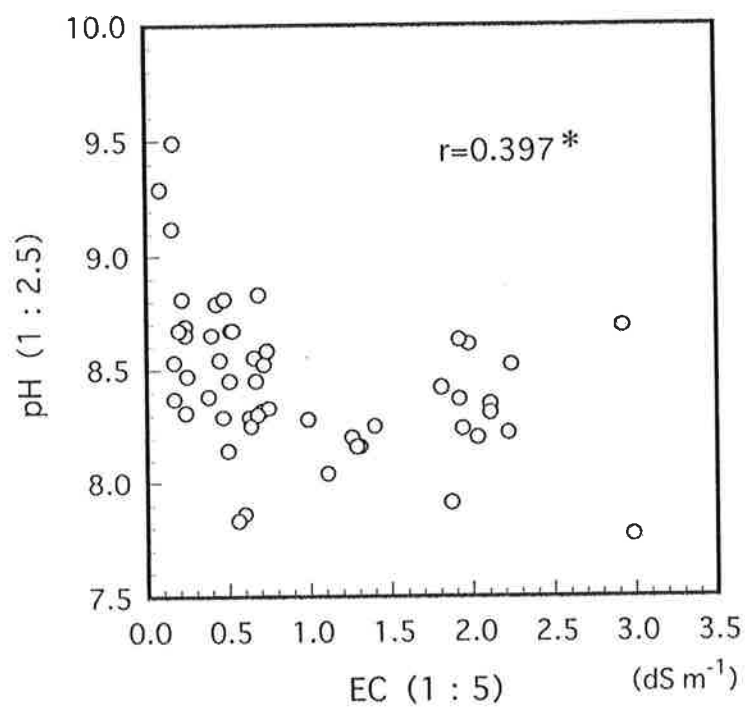
pH (1 : 2.5)



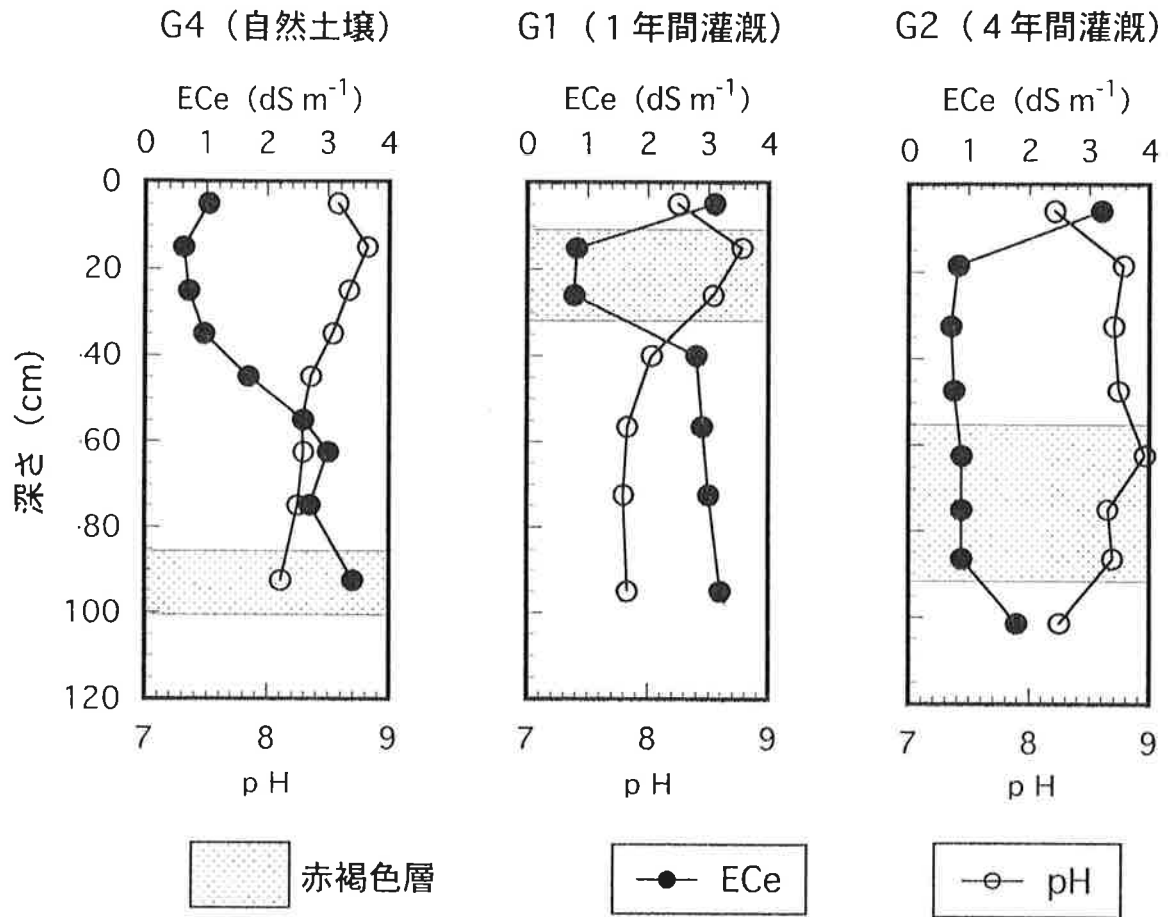
EC (1 : 5)



第2-3図 ゲレロネグロ農地内のEC (1 : 5) , pH (1 : 2.5) 平面分布



第2-4図 作土層におけるpHとECの関係  
 (カリフォルニア半島・ゲレロネグロ)  
 \*1%レベルで有意.



第2-5図 断面内におけるECeとpH (ゲレロネグロ)

に含まれているので、ナトリウム高濃度障害によるカルシウムの吸収障害が生じており、農地内でトマトの初期着果果実に尻腐れがみられた。さらに、土壌pHが高いことから、作物は、鉄、亜鉛、銅等の不可給化により、微量元素の欠乏症を引き起こす危険性を有する。農地内では重炭酸塩が多いこともあり、作物による鉄吸収が阻害され、鉄欠乏によるトマトの葉に黄白化症状がみられた。さらには、硝酸化成能も抑制され、窒素肥効も低下していた。

ビスカイノでは、灌漑水の水質を詳細に測定することができなかったが、塩化物イオン濃度から判断すると、ナトリウムイオンも多量に含まれていると推察された（第2-2表）。土壌飽和抽出液のpHは8.0~8.3で著しく高いとは言えないが、pH (1:2.5)は8.9~9.7と非常に高い値を示した。土壌中に炭酸ナトリウム、重炭酸ナトリウムが含まれており、多量の水の添加により溶出された結果と考えられた。しかし、当農地は畝間灌漑によって管理されているため、大量の灌漑水が一度に導入されることによって、一時的に土壌のpHが急激に上昇されている危険性が示唆された。また、当地はゲレロネグロと同様に砂質で、灌漑により塩類が洗脱されやすい環境下であったが、表層に塩類集積がみられ、ECe値は $4\text{dS m}^{-1}$ を超えていた。表層に集積している塩類の形態は塩化ナトリウム、重炭酸ナトリウム等のナトリウム塩主体の易溶性塩類であった。これはゲレロネグロに比べ灌漑水の水質が悪いこと、灌漑水量が多いこと、管理歴が長いこと等に起因していると考えられた。

しかし、塩濃度の高い灌漑水を利用しているにも関わらず10年以上安定した収穫を得ていることは、砂質であるために塩類が下層に洗脱され易く、表層に溜まりにくい事を反映している。地下水に $10\text{mg L}^{-1}$ 以上の多量の硝酸態窒素が検出されたことは、このことを裏付けるものである。

ヘスマリアでは、自然土壌の断面内のECe値は全層にわたり $1\text{dS m}^{-1}$ 程度で、顕著な塩類集積は認められなかった。しかし、11年間の管理後、表層には多量の塩類集積がみられECe値が $10\text{dS m}^{-1}$ を超えていた。集積塩類は主に塩化ナトリウム、塩化マグネシウム、塩化カルシウム等の塩化物を主体とした水に溶解しやすい形態であった。これらの可溶性塩類は、土壌が粘土質であるため灌漑によって下層に洗脱されにくく、激しい蒸発により、表層に集積されたと考えられた。これまでの灌漑、施肥の繰り返しにより、灌漑水中、肥料中に含まれている塩類がそのまま土壌中へ残存した結果と考えられた。粘質な土性であるため、灌漑水中の塩が下層に浸透されにくく、塩がそのまま土壌中に残留された結果といえる。しかし、低い地下水位のため下層からの地

下水の上昇による塩類の付加は懸念されなかった。

カリフォルニア半島では、古くから灌漑農業が行われてきた先進農業地域において塩類集積が深刻な問題となってきた。農業の歴史が比較的新しいゲレロネグロ周辺でも塩類化、アルカリ化が顕在化していた。この周辺では近代農業の歴史が浅く、塩類集積の問題意識は希薄である。

メキシコにおいては農地改革に合わせ、今後早急に土地資源、水資源等の評価を見直し、乾燥地農業に対して対応していかなければならない。各地に分布する乾燥地においても、絶えず土地資源、水資源等を十分に考慮して対応していかなければならない。

### 2.3. カザフスタン・シルダリア川下流域の灌漑農地の土壌環境

#### 2.3.1. 背景

カザフスタン共和国（以下、カザフスタンと称す）は遊牧民の土地であったが、旧ソ連時代に穀物輸入量の削減と遊牧民の定住化のために、1950年代から大規模な農業開発が始められた。全農用地面積2億2,000万haのうち約82%は放牧地で、残りの3,500万haが耕作地である。農業生産は約8,000の国営農場と集団農場に組織化され、一農場あたりの平均耕地面積は約4万haである（レオニードら、1996）。

アラル海に流入するシルダリア川、アムダリア川流域においても、1950年代から1960年代にかけて大規模な灌漑農業開発計画が実施され、約760万haの広大な灌漑農地が開発された。そして、一時的にはカザフスタンの米生産の約70%を産出するまでに至ったが、1980年代後半に入ると、土壌塩類化等により、生産量は低下してきている。特に、アラル海周辺地域は年間降水量が150mm以下の乾燥気候下にあるため、土壌の塩類化が急速に広がっている。同時に両河川からの流入量の減少により、アラル海が急速に縮小しており、深刻な環境問題となっている。中央アジアでは既に100万haの土地が不適切な灌漑によって失われたとされている（筒井、1996）。また、カザフスタンの灌漑農地の内、60~70%が土壌塩類化の影響を受け、作物収量の低下がみられる（Khakimov, 1989）。

シルダリア川上流域および中流域では綿花中心の灌漑農業が展開されているが、綿花の灌漑栽培を続けていく内に、低地部に地下水の上昇と湛水化が生じ、同時に著しい塩類集積がみられるようになった。シルダリア川下流域では、上記の経験をもとに始めから水稻を含めた輪作が導入された（荻野ら、1996）。

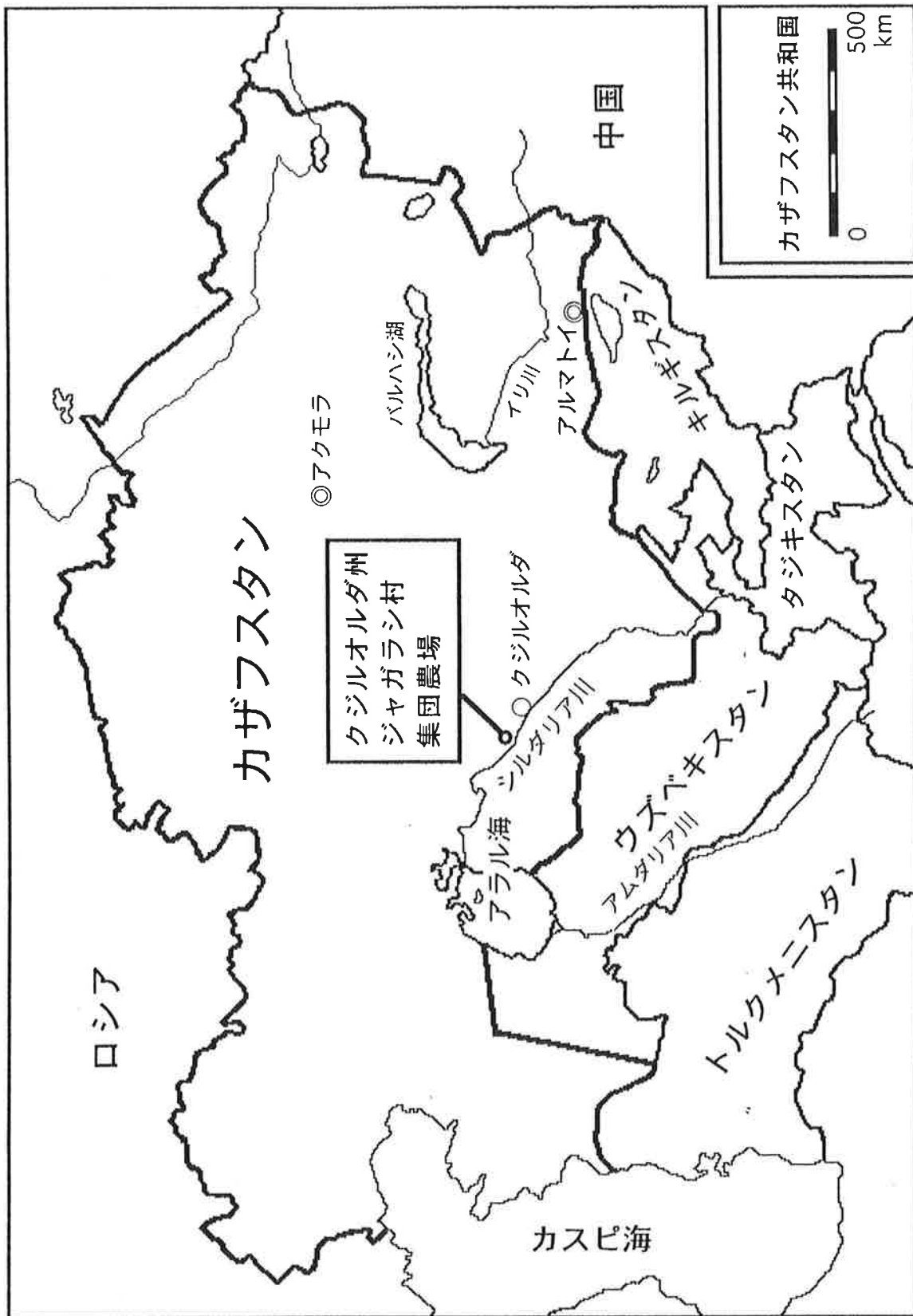
以上の背景から、本節では、カザフスタンのシルダリア川下流域の灌漑農地を研究拠点として、当地で進行している塩類集積の実態と塩類集積機構を解明し、これと農地の立地条件あるいは輪作システムの関係性を明らかにすることを目的として、土壌の諸性質と土壌塩類化の関係を論じる。

### 2.3.2. 調査地域の概況

第2-6図に調査対象地域を示した。調査対象地域はカザフスタン・クズリオルダ州ジャガラシ村の集団農場である。この地域は、天山山脈とパミール高原を水源とするシルダリア川を灌漑水源とする地域で、アラル海からシルダリア川上流約350kmの右岸、クズリオルダ市の北西約75kmに位置する。この地域の年間降水量は平均120mmであり、降水は主に秋から春にかけてである。夏には降雨がほとんどなく、非常に乾燥している。調査地域は海洋から遠く離れているため、極端な大陸性気候を呈する。高緯度（北緯45°）にも関わらず、夏は極端に暑く、平均気温は27℃、最高気温は40℃を超える。冬は極端に寒冷で、平均気温は-5℃、最低気温は-25℃を下回る（大成建設株式会社計画技術部環境計画室、1996）。

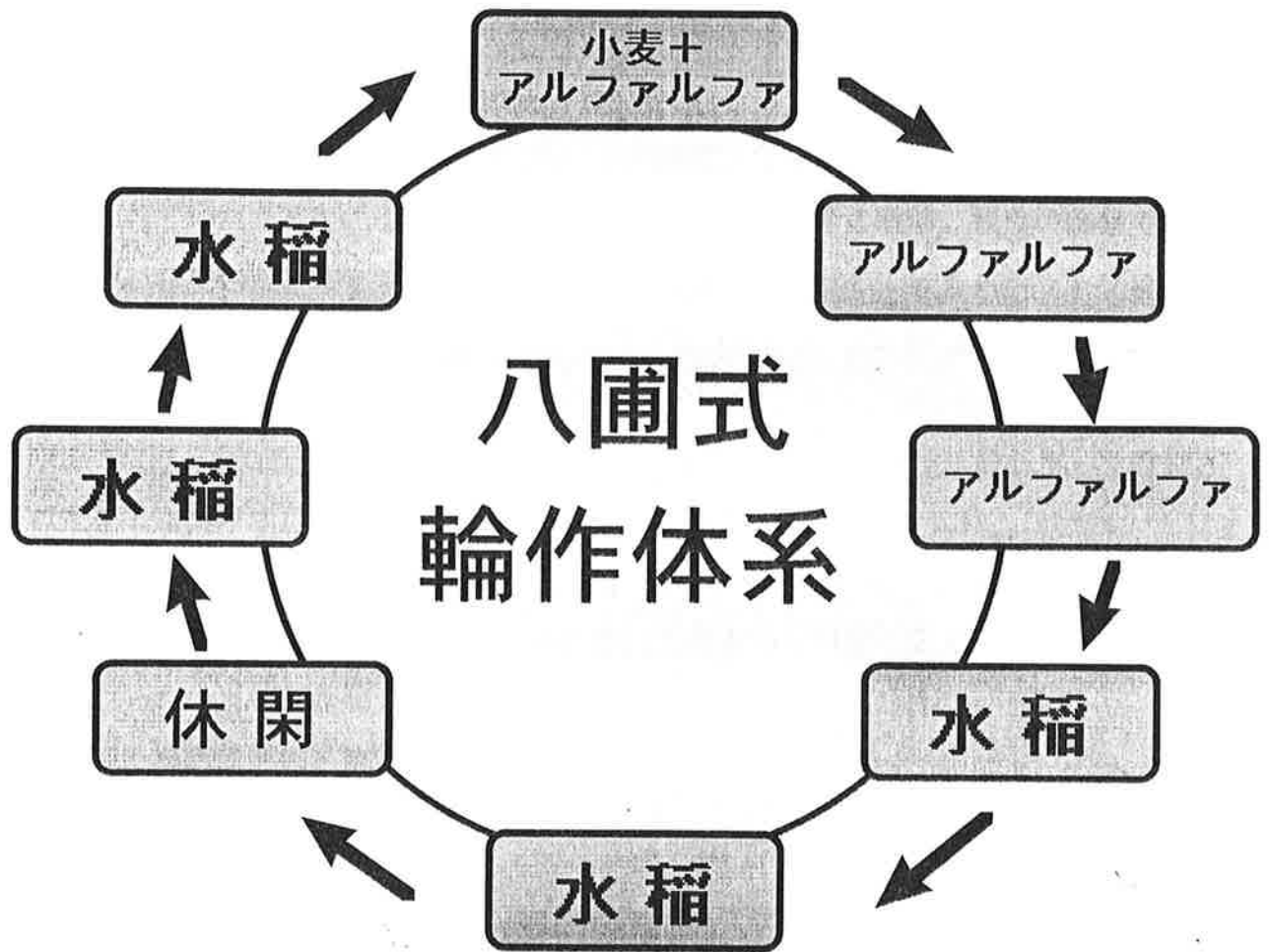
調査を行った農場は、シルダリア川北側の氾濫源に位置している。1970年代に整備が開始され、その全体面積は19,200haである。農場内に数ヶ所の灌漑ブロックが点在し、灌漑農地面積は10%にあたる1900haである。農地の分布状況から、農地開発は主に灌漑水の供給が容易で、かつ比較的平坦な地形のところにおいて優先的に行われてきたと推測される。比較的起伏があり、水供給が困難なところは開発されず、放置されている。農場では、ソ連邦時代に政府からの指示により、1970年代始めから水稲、牧草、休閑を含む八圃式輪作が行われてきた（第2-7図）。これは、節水と地力の回復のために、ブロック内を八つに分けて作付けする方法である。この方法では、畑作区の揚水量は水稲区からの地下水補給でまかなえるとして、節水面での効果が期待された。しかし、水稲栽培を行っている農地の近隣の畑地では、水田の地下水位上昇の影響を受け、農地の塩類化が助長された。このことを受けて、農場では最近輪作を廃止しつつあり、ブロック毎に同一作物を栽培する傾向にある。農場の主要栽培作物は水稲、アルファルファ、小麦である。

農場では、灌漑開始直後から農地の塩類化が進行し、調査時点では耕作地約1,900haの内、塩害に伴う放棄地は約600haを占めており、土壌塩類化面積は拡大し続けている。この地域で今後も農業を行っていくために、有効な灌漑水の利用法や土壌の管理、改良策が示されることが急務となっている。



第2-6図 カザフスタン共和国と調査対象地域





第2-7図 八圃式輪作体系

### 2.3.3. 供試土壌および分析方法

#### 2.3.3.1. 供試土壌

第2-8図、第2-9図に土壌断面調査地点と採水地点を示した。土壌調査は灌漑ブロックの内、最も塩害が深刻なメシットブロックとサルタバーンブロックおよび比較的近年に開発されたイエルタイブロックで行った。イエルタイでは開発が比較的近年のため放棄地が少なく、八圃式輪作が唯一行われているブロックである。調査時には、メシットブロックでは小麦とアルファルファの混作、サルタバーンブロックでは水稲作が行われていた。また、イエルタイブロックは一部で牧草の栽培、残りの部分で水稲作が行われていた。最も早くから開発され、塩類化の進行しているメシットブロックではアルファルファ耕作地 (M2)、小麦耕作地 (M4)、放棄地2地点 (M1, M3) の合計4地点、主に水稲作が行われているサルタバーンブロックでは水田に近接した放棄水田 (C1)、水田からやや遠く離れた放棄地 (C2) の合計2地点、最も新しく整備されたイエルタイブロックではアルファルファ耕作地2地点 (E2, E3)、放棄地 (E1) の合計3地点について、土壌調査を行った。農地の土壌調査を行う際には、水稲作が地下水位と塩類集積に及ぼす影響を見るため、水田からの距離を変えて行った。

それぞれの土壌断面調査を行い、試料を採取し、分析に供した。

調査土壌断面形態を第2-10図に示した。

#### 2.3.3.2. 分析方法

2.2.3.2.に準じた。

### 2.3.4. 結果および考察

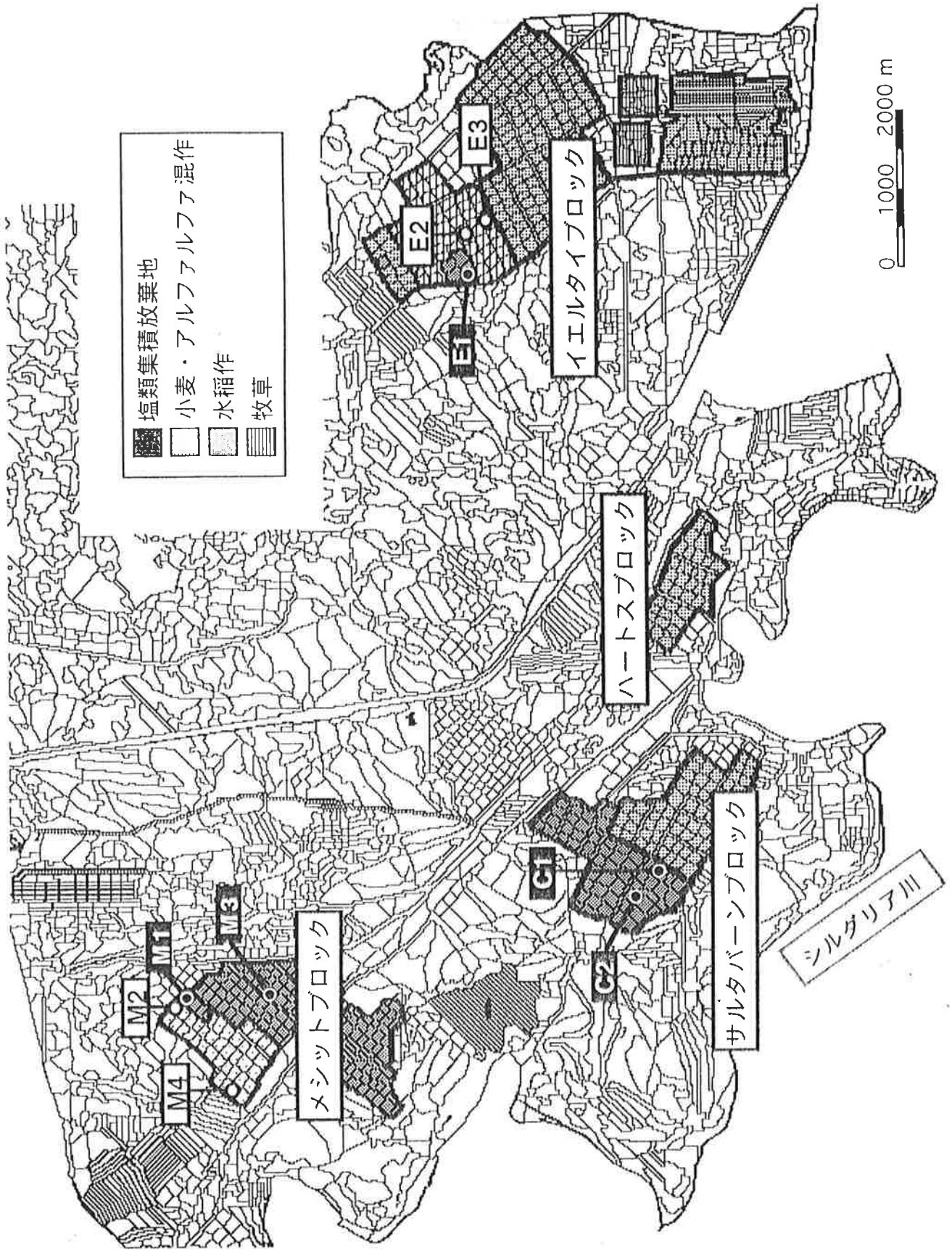
#### 2.3.4.1. 耕作土壌の特徴

写真2-8～写真2-11に土壌断面写真、第2-6表に土壌断面形態を示した。

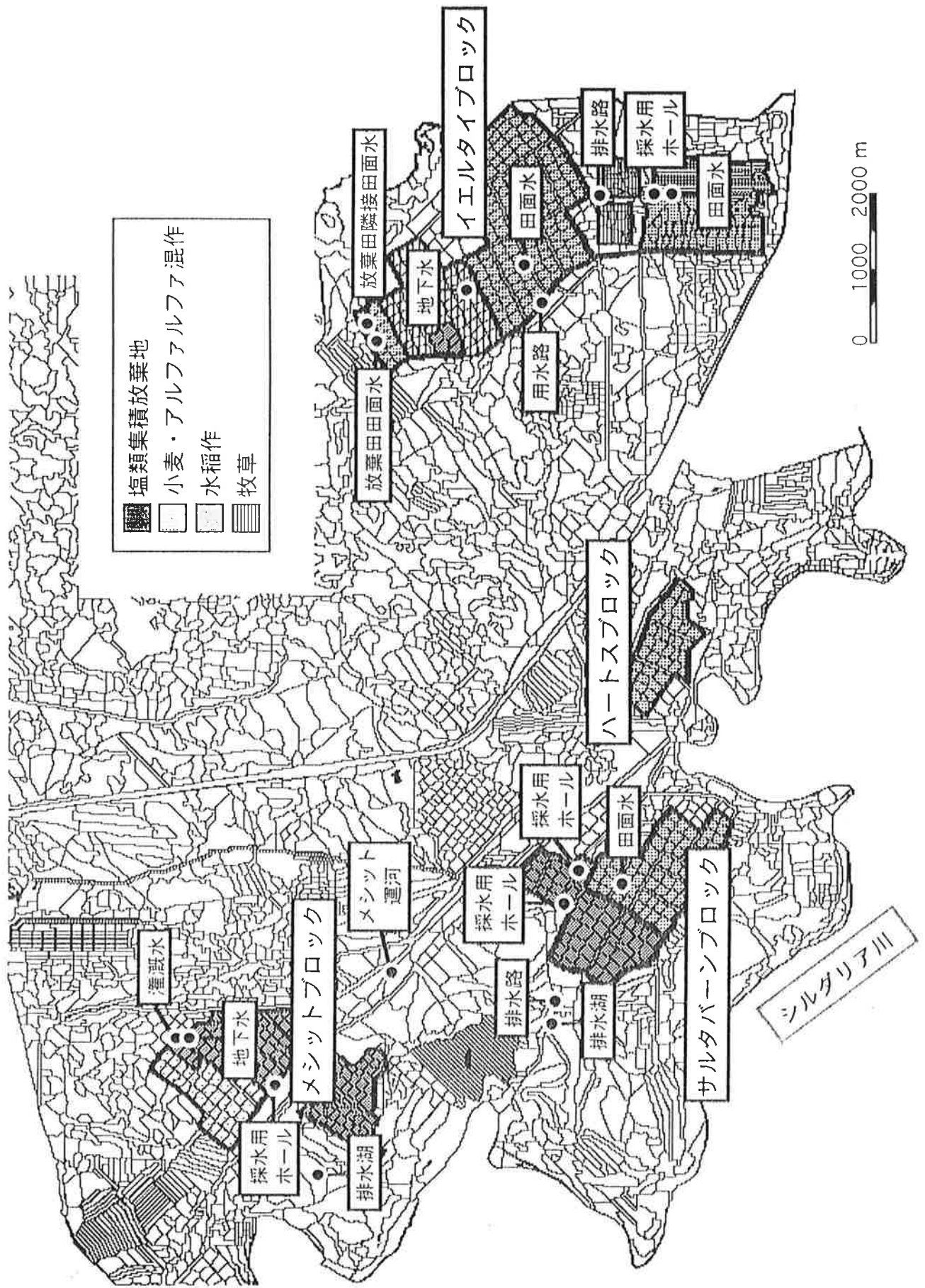
##### 2.3.4.1.1. 放棄水田隣接耕作地 (M2)

メシットブロック内の放棄地に隣接する耕作地で、小麦・アルファルファ収穫後、土壌調査をした。耐塩性植物のソリヤンコビ (*solyankoviye*) が比較的多く見られ、耕作地東端から約1/4程度のエリア内で生育し始めており、土壌塩類化が進行していることがうかがえられた。また、隣接している水路で繁茂しているヨシの根が、耕作地内にも進出しており、所々でヨシが生育していた。

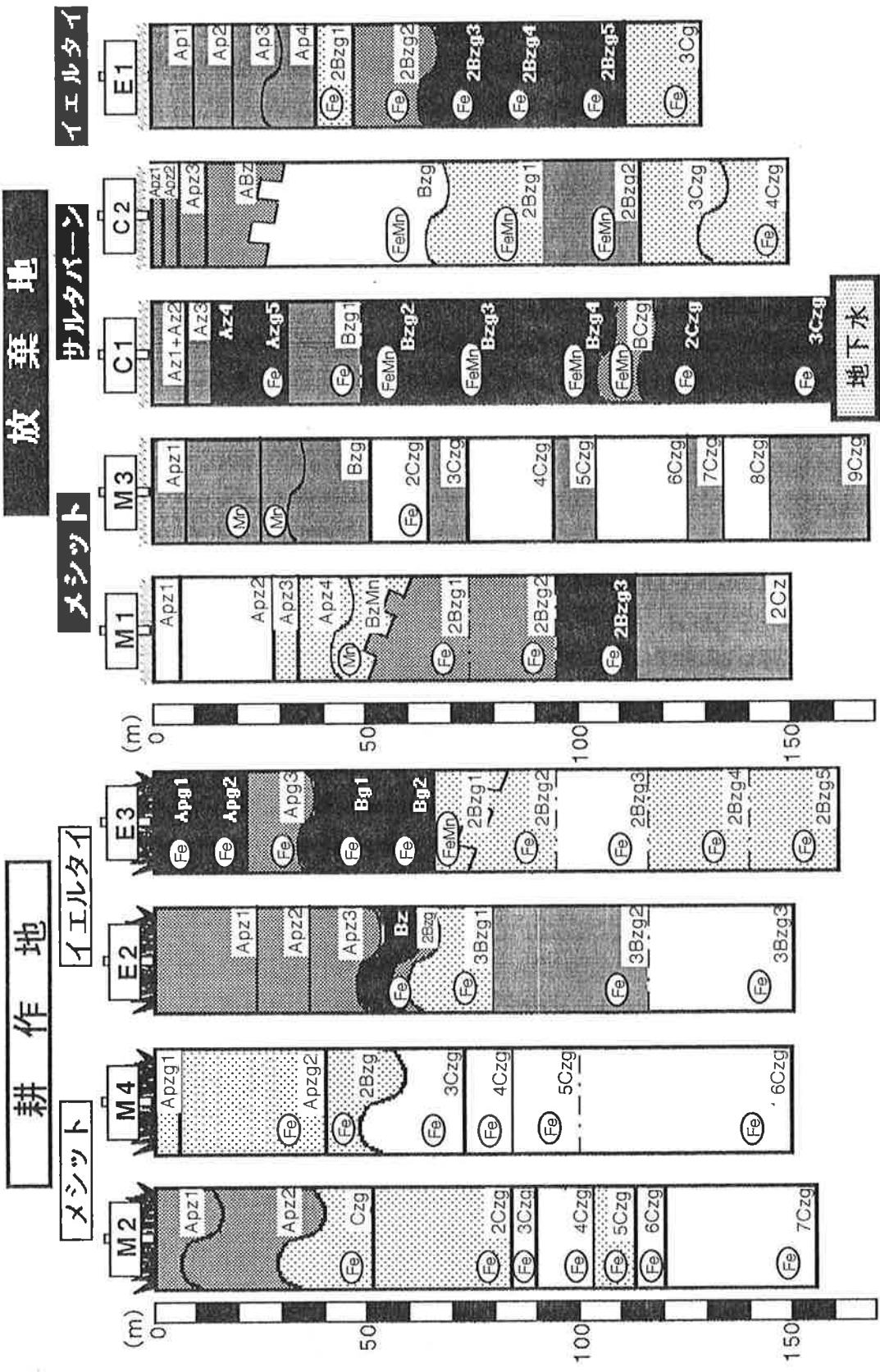
土壌断面形態：全層にわたり土壌が非常に緻密で硬く締まっていた。植物根が非常に多く認められ、表層にはルートマットが形成されていた。また、ヨシの根が70cm付近まで認められた。40cmまで亜角塊状構造が発達していたが、それより下層は一定の



第2-8図 集団農場と土壌採取地点（1997）



第2-9図 集団農場と採水地点 (1997)



第2-10図 調査土壌断面



写真2-8・メシット  
放棄水田隣接耕作地 (M2)



写真2-9・メシット  
生育良好耕作地 (M4)

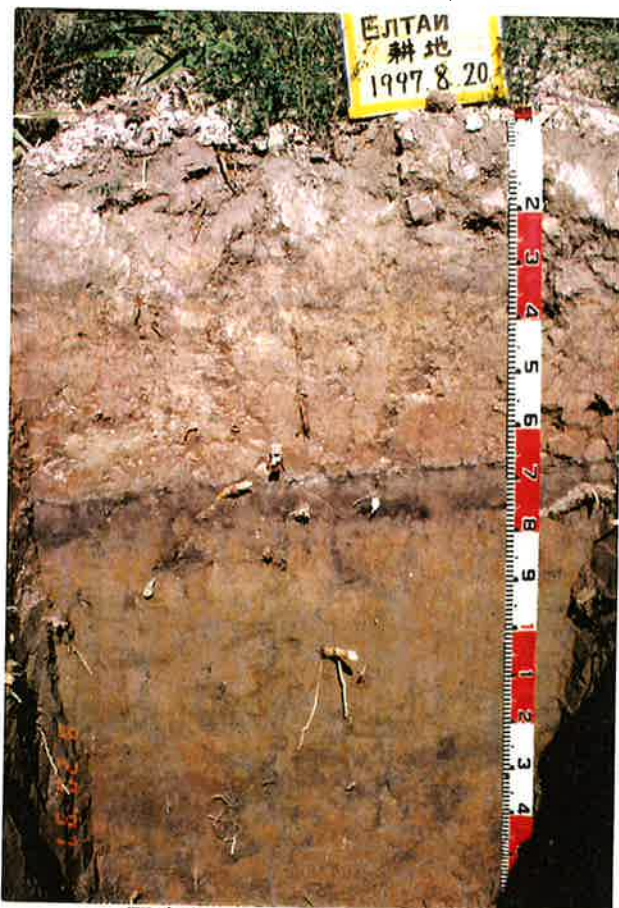


写真2-10・イエルタイ  
牧草畑 (E2)



写真2-11・イエルタイ  
水田隣接牧草畑 (E3)

第2-6表 調査土壌の断面形態 (カザフスタン・シルダリア下流域・耕作土壌)

調査地点 および層位	土深 (cm)	土色		構造	乾湿度	硬度 (mm)	植物根	炭酸塩	斑紋	層界
		湿	乾							
メシット・放棄水田隣接耕作地 (M2)										
Apz1	0~5/15	10YR6/2	10YR5/2	中度亜角塊状	半乾	31	豊富, 小富	弱石灰質		波状画然
Apz2	5/15~28/40	10YR6/2	10YR5/2	中度亜角塊状	半乾	31	大あり	弱石灰質		波状画然
Czg	28/40~51	10YR6/3	10YR6/3	なし	半湿~湿	27	細合, 小合, 大あり	弱石灰質	Fe (糸根・膜・管状)	平坦画然
2Czg	51~83	10YR6/3	10YR6/3	なし	湿	23	細合, 小あり, 大あり	強石灰質	Fe (糸根・管状)	平坦画然
3Czg	83~90	10YR6/4	10YR6/4	なし	多湿	21	細まれ, 小まれ	強石灰質	Fe (糸根・管状)	平坦画然
4Czg	90~103	10YR6/3	10YR6/3	なし	多湿	21	細あり	強石灰質	Fe (糸根)	平坦明瞭
5Czg	103~113	10YR6/4	10YR6/4	なし	多湿	19	細あり, 小あり	強石灰質	Fe (糸根)	平坦画然
6Czg	113~120	10YR6/4	10YR6/4	なし	多湿	20	細あり, 小あり	強石灰質	Fe (糸根)	平坦画然
7Czg	120~156+	10YR6/3	10YR6/3	なし	多湿	20	細あり, 小あり	強石灰質	Fe (糸根)	平坦画然
メシット・生育良好耕作地 (M4)										
Apz1	0~6	10YR5/2	10YR5/2	弱~中度亜角塊状	極乾	13	細合, 小あり, 大あり	強石灰質		平坦画然
Apz2	6~28	10YR5/2	10YR5/2	中度亜角塊・角塊状	極乾	35	細合	強石灰質	Fe (管状)	平坦画然
2Bzg	28~47/49	10YR6/3	10YR6/3	壁状	極乾	35	小あり	中石灰質	Fe (糸根・膜状)	波状明瞭
3Czg	47/49~73	10YR7/3	10YR7/3	なし	半湿	20	小まれ	中石灰質	Fe (糸根)	平坦明瞭
4Czg	73~84	10YR6/3	10YR6/3	なし	湿	22	小あり	中石灰質	Fe (糸根)	平坦明瞭
5Czg	84~100	10YR6/4	10YR6/4	なし	湿	18	細あり, 小あり	中石灰質	Fe (糸根)	平坦明瞭
6Cz	100~150+	10YR6/4	10YR6/4	なし	湿~多湿	21	細あり	中石灰質	Fe (糸根)	平坦明瞭
イエルクタイ・牧草耕作地 (E2)										
Ap1	0~24	10YR4/3	10YR5/4	中度角塊状	半乾	34	細合, 中あり	弱石灰質		平坦明瞭
Ap2	24~37	10YR4/3	10YR5/4	中度角塊状	半乾	33	細あり	弱石灰質		波状明瞭
Ap3	37~48/54	10YR4/3	10YR6/3	中度角塊状	半乾	33	細あり, 小あり	弱石灰質		波状明瞭
Bz	48/54~56/63	10YR4/3	10YR6/3	中~強度角塊状	半乾	31	細あり, 小あり	弱石灰質		波状明瞭
2Bzg	56/63~60/67	2.5 Y 4.5/3	10YR6/3	中度亜角塊状	湿	32	細あり, 小あり	弱石灰質	Fe (点状)	波状明瞭
3Bzg1	60/67~80	2.5 Y 4.5/3	10YR6/3	弱度角塊状	湿	29	細あり, 小あり	弱石灰質	Fe (雲・糸根状)	波状明瞭
3Bzg2	80~116	2.5 Y 4.5/3	10YR6/3	弱度角塊状	湿	26	細あり, 小あり	弱石灰質	Fe (雲・糸根状)	平坦明瞭
3Bzg3	116~150+	10YR5/4	10YR6/4	なし	湿	24	小あり	弱石灰質	Fe (雲・糸根状)	平坦明瞭
イエルクタイ・水田隣接牧草耕作地 (E3)										
Apg1	0~10	10YR4/3	10YR5/4	なし	乾	24	細合, 小あり	弱石灰質	Fe (糸根状)	波状明瞭
Apg2	10~22	10YR4/3	10YR5/4	なし	乾	20	細合, 小あり	弱石灰質	Fe (糸根状)	波状明瞭
Apg3	22~35	10YR4/3	10YR6/3	なし	半乾	30	細合, 小あり	弱石灰質	Fe (雲・糸根状)	波状明瞭
Bg1	35~52	10YR4/3	10YR6/3	強度角塊状	半乾	33	細あり, 小あり	弱石灰質	Fe (雲)	平坦明瞭
Bg2	52~66	10YR4/3	10YR6/3	強度角塊状	半乾	33	細あり, 小あり	弱石灰質	Fe (雲)	平坦明瞭
2BgMn	66~74/83	10YR4/3	10YR6/3	壁状	湿	33	細あり	弱石灰質	Fe (雲)	不規則明瞭
2Bg1	74/83~95	2.5 Y 4.5/3	10YR6/3	弱度亜角塊状	湿	33	小あり	弱石灰質	Mn, Fe (糸根状)	平坦明瞭
2Bg2	95~116	2.5 Y 4.5/3	10YR6/3	弱度角塊状	湿	32	小あり	弱石灰質	Fe (雲)	平坦明瞭
2Bg3	116~140	2.5 Y 4.5/3	10YR6/3	壁状	多湿	31	中あり	弱石灰質	Fe (雲)	平坦明瞭
2Bg4	140~160+	10YR5/4	10YR6/4	弱度角塊状	多湿	23	中あり	弱石灰質	Fe (雲)	平坦明瞭

構造は認められず、褐色の斑鉄が認められた。また、下層ほど土壌が湿っていた。全層にわたって白色沈積塩が析出しており、特にAz1層～C2層に顕著に認められた。

物理的性質：土壌断面内の水分含量は全層にわたり高く、表層で約15%、60cmより下層でも約25%と高くなっていた。土壌表層に若干の植物被覆があり、隣接する放棄地よりも水分含量が高かった。約3mの深さに地下水が存在していると推察され、毛細管現象によって全層にわたり水分含量が高くなっていると考えられた。細粒な層と粗粒な層が、層位ごとに交互に堆積されていた。調査地域がシルダリア川の氾濫源に位置しており、土壌の堆積が氾濫によって繰り返されていたことに起因していた。

化学的性質：調査土壌断面内のpHは全層にわたって7.5前後で一定であった。また、全層にわたってECe値は20dS m<sup>-1</sup>前後で、非常に高かった。集積塩類組成としては、塩化ナトリウム、硫酸マグネシウム、硫酸カルシウムを主体とした塩類であった。

#### 2.3.4.1.2. 生育良好耕作地 (M4)

メシットブロックの西端に位置し、ブロック内で最高収量をあげている地点である。小麦・アルファルファ収穫後に土壌調査した。

土壌断面形態：約60cmまで比較的粘質で、亜角塊状ないし角塊状構造が発達していたが、それより下層部は砂層が続いており、水はけが良いことがうかがえられた。また、17cmより下層に褐色の斑鉄および根の周辺、構造表面に沿って灰色の斑紋が認められ、特に28～84cmに多かった。

物理的性質：調査土壌断面は、全層にわたって乾燥しており、特に表層で非常に乾燥していた。28cmまで粘土18%、微砂15%、細砂64%、粗砂4%であった。しかし、28～47/59cmの層には粘土20～27%、微砂34～42%で上層よりも細粒な層となっていた。しかし、47/59cm以下より下層では粗粒な層が続いていた。この地点は排水湖に近い地点であるが、下層が砂質であるため、毛細管現象が抑えられたと考えられた。

化学的性質：調査断面内のpHは全層にわたって比較的低く、7.0～7.5であった。また、表層のECe値は50dS m<sup>-1</sup>を超えており、多量の塩類が集積されていた。しかし、次表層より下層では10dS m<sup>-1</sup>以下になっており、比較的低く抑えられていた。集積塩類組成は、塩化ナトリウム、硫酸マグネシウム、硫酸カルシウムを主体としていた。

#### 2.3.4.1.3. 牧草畑 (E2)

イエルタイブロック内でアルファルファ耕作地の中央部で土壌調査した。耕耘機により攪乱されていた。八圃式輪作によるアルファルファの2年目で、線状に播種されていたが、ヨシ等の雑草が多かった。



土壌断面形態：全層にわたり土壌が非常に緻密で硬く締まっていた。ヨシおよびアルファルファの根が全層に認められた。100cm付近まで角塊状構造が発達していた。約55cmより下層に褐色の斑鉄および根の周辺、構造表面に沿って灰色の斑紋が認められ、下層ほど多かった。

物理的性質：表層から約60cmまで粘土含量が50%前後で、非常に多く含まれていた。しかし、約60cmから下層は砂画分の割合が高くなっていた。

化学的性質：調査土壌断面内のpHは全層にわたり7.5前後であった。表層のECe値は $11\text{dS m}^{-1}$ であり、多量の塩類が集積されており、作物生育阻害が懸念された。また、下層になるに従いECe値がわずかに上昇していることは、高位に地下水が存在しているためと考えられ、塩類が表層へ移動する可能性があることを示唆していた。塩類組成としては、塩化ナトリウム、硫酸ナトリウムが主体であり、表層で高い値を示したが、他ブロックに比較すると塩類集積量は少なかった。

#### 2.3.4.1.4. 水田隣接牧草畑 (E3)

八圃式輪作によるアルファルファ2年目の耕作地で土壌調査した。作土層が攪乱されていた。水田に隣接しており、深さ160cmから地下水が湧水した。雑草も多く見られたが、アルファルファの生育も比較的良好であった。

土壌断面形態：全層にわたり土壌が非常に緻密で硬く締まっていた。ヨシおよびアルファルファの根が全層に認められ、褐色の斑鉄および根の周辺、構造表面に沿って灰色の斑紋が認められた。また、約65~80cmに黒色のマンガン斑が認められた。約160cmで湧水した。

物理的性質：表層から66cmまで粘土50%、微砂40%と高く、非常に細粒であった。しかし、66cmから下層は粘土と微砂合わせて50%以下であった。下層土の透水性が、イエルタイプブロックの調査断面中、最も良いと考えられた。また、粘土、微砂割合が極端に低下した66cm、112cm付近にマンガン集積層が見られ、この辺りまで地下水位が上下していたと考えられた。水田に隣接しているため、地下水位が高かった。また、水路が近いため、農地への漏水が懸念された。

化学的性質：調査断面内のpHは、全層にわたり7.5前後であった。また、表層のECe値は $9\text{dS m}^{-1}$ であった。塩類土壌としての基準 ( $4\text{dS m}^{-1}$ ) を大きく超えており、作物生育阻害が懸念された。また下層になるに従い、ECe値がわずかに上昇していた。しかし、高位に地下水が存在しているため、塩類が表層へ移動する可能性を示唆していた。集積塩類組成としては、塩化ナトリウム、硫酸ナトリウムが主体であり、表層で

高い値を示したが、他ブロックに比較すると塩類集積量は少なかった。

#### 2.3.4.2. 放棄土壌の特徴

写真2-12～写真2-16に土壌断面写真，第2-7表に土壌断面形態を示した。

##### 2.3.4.2.1. 放棄地 (M1)

メシットブロック内の塩類集積放棄地で土壌調査した。かつては8年輪作（内4年水稻）が行われていたが、現在では放棄されていた。海拔は約100mあり、ほぼ平坦であった。表層に母岩の露出はなく、岩石、礫なども存在していなかった。放棄されてから、何年も経っているため、所々に耐塩性植物のソリヤンコビ (*solyankoviye*) や低灌木のギョリュウ類 (*tamariska*) が見られた。

土壌断面形態：表層では土壌が乾燥しており、下層になるに従い湿っていた。また、下層になるに従い土壌が非常に緻密で硬く締まっていた。50～113cmまで亜角塊状が認められた。土壌表層への塩集積は顕著であり、クラストが形成されていた。29～34cmおよび40～60cmに黒色のマンガン斑が認められた。その下層より褐色の斑鉄および根の周辺、構造表面に沿って灰色の斑紋が認められた。

物理的性質：表層の水分含量が約5%に対し、下層ほど水分含量が増し、90cm以下では25%前後となっていた。29cmまで細砂主体の粗粒な土性であったが、29cmより下層になるにつれ、L→CL→SiC→HCと土性が変化し、細粒な土性で構成されていた。

化学的性質：全層にわたりpHが7.5前後であった。表層のECe値は155dS m<sup>-1</sup>で非常に高かった。次表層以下ではECe値は50dS m<sup>-1</sup>程度でほぼ一定に推移していた。集積塩類組成は、全層にわたり塩化ナトリウム，硫酸マグネシウム，硫酸カルシウムを主体としていた。

##### 2.3.4.2.2. 放棄地 (M3)

メシットブロック内の塩類集積放棄地で、長年放棄されている放棄地密集地帯の中心部分に位置する地点で土壌調査した。耐塩性植物のソリヤンコビ (*solyankoviye*) がまばらに生育していたが、M1よりも植生は貧弱であった。1985年前後に放棄されたが、放棄前は八圃式稲輪作が行われていた。

土壌断面形態：表層では土壌が乾燥しており、下層になるに従い湿っていた。表層では団粒構造が発達していた。また、51cmまでは亜角塊状構造が認められた。全層にわたり、炭酸カルシウムおよび硫酸カルシウムに起因すると思われる白色沈積物が斑点状に認められた。約8～30cmに黒色のマンガン斑が認められた。

物理的性質：表層の水分含量が5%程度に対して、下層ほど水分含量が増し、90cm



写真2-12・メシット  
放棄地 (M1)

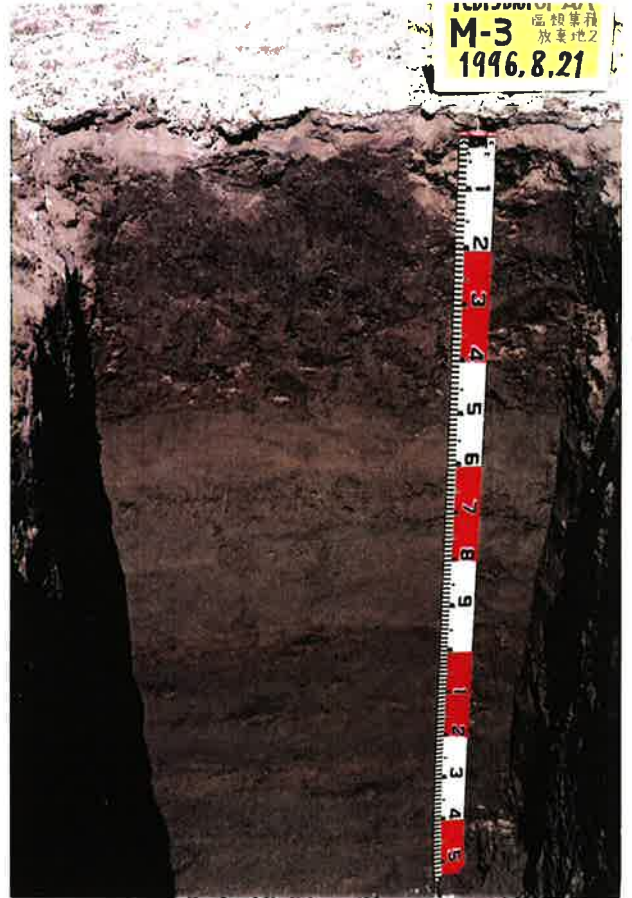


写真2-13・メシット  
放棄地 (M3)

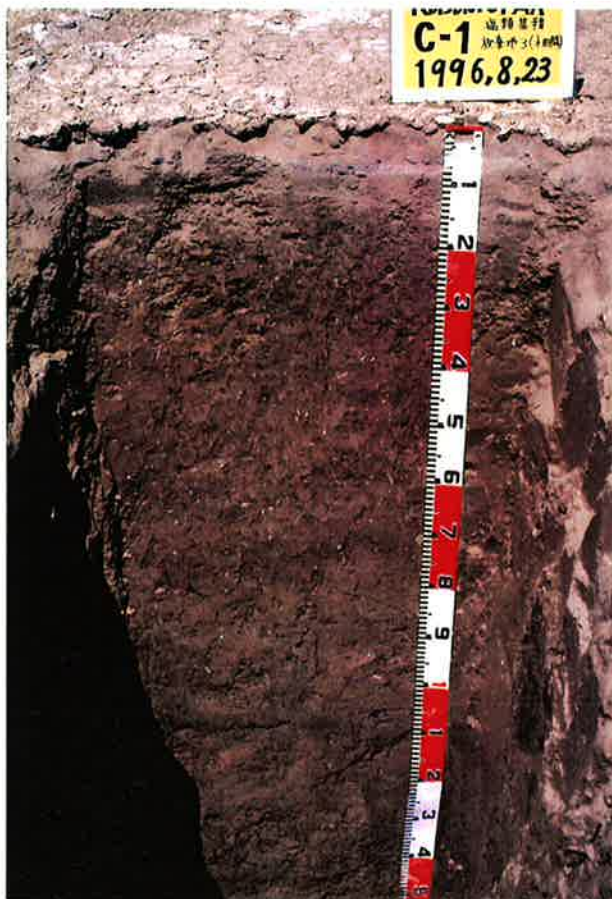


写真2-14・サルタバーン  
水田隣接 放棄地 (C1)

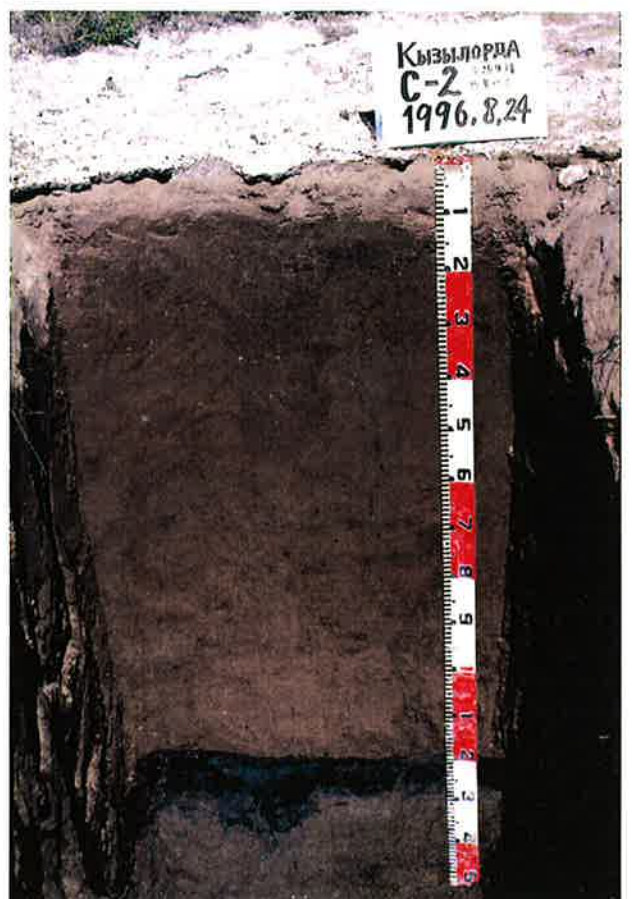


写真2-15・サルタバーン  
放棄地 (C2)

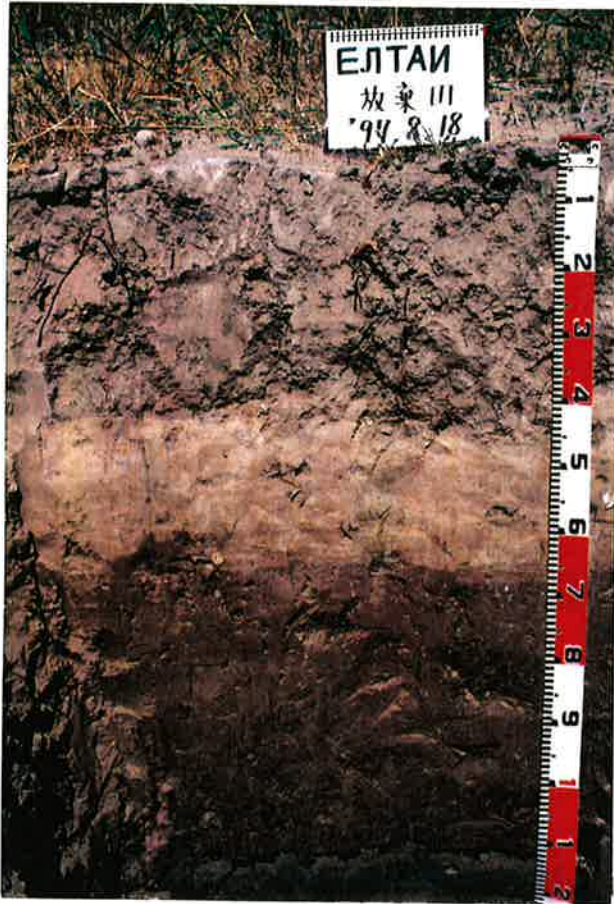


写真2-16・イエルタイ  
放棄地 (E1)

第2-7表 調査土壌の断面形態 (カザフスタン・シルダリア下流域・放棄土壌)

調査地点 および層位	土深 (cm)	土色		構造	乾湿度	硬度 (mm)	植物根	炭酸塩	斑紋	層界
		湿	乾							
メシット・放棄地 (M1)										
Az1	0~ 6	10YR4/4	10YR5/4	なし	乾	1	細, 小あり	強石灰質	なし	平坦画然
Az2	6~ 29	10YR4/3	10YR6/3	なし	半乾	28	細, 小あり	強石灰質	なし	平坦画然
Az3	29~ 34	10YR4/3	10YR6/3	なし	半乾	28	細, 小あり	強石灰質	なし	平坦画然
Az4	34~40/44	10YR4/3	10YR6/3	なし	半乾	31	細, 小あり	強石灰質	なし	波状画然
BzMn	40/44~50/60	10YR4/2	10YR6/2	なし	湿	30	小あり	強石灰質	Mn	不規則明瞭
2Bzg1	50/60~ 75	10YR5/4	10YR7/3	極弱度亜角塊状	湿	26	細, 小あり	強石灰質	Fe (糸根・点状)	平坦判然
2Bzg2	75~ 95	10YR5/3	10YR7/4	極弱度亜角塊・角塊状	湿	28	中あり	中石灰質	Fe (糸根・点状)	平坦判然
2Bzg3	95~113	10YR5/4	10YR7/4	極弱度亜角塊状	湿	25	なし	中石灰質	Fe (糸根・点状)	平坦明瞭
2Bz4	113~150+	10YR4/4	10YR6/4	なし	湿	24	なし	中石灰質	なし	
メシット・放棄地 (M3)										
Az1	0~ 8	10YR4/3	10YR4/3.5	強度団粒状	乾	1	細, 小あり	強石灰質	なし	平坦明瞭
Azg2	8~ 26	10YR4/3	10YR6/2	弱度亜角塊状	半乾	25	細, 小, 大あり	強石灰質	Mn	平坦明瞭
Azg3	26~31/34	10YR5/3	10YR6/2	弱度亜角塊状	湿	22	細, 小, 大あり	強石灰質	Mn	波状画然
Bzg	31/34~ 51	10YR5/4	10YR7/3	弱度亜角塊状	湿	26	小あり	強石灰質	なし	平坦画然
2Czg	51~ 65	10YR5/4	10YR7/3	なし	湿	23	細あり	強石灰質	Fe (糸根状)	平坦画然
3Czg	65~ 74	10YR5/4	10YR7/3	なし	湿	21	なし	強石灰質	なし	平坦画然
4Czg	74~ 96	2.5 Y 5/4	10YR6/3	なし	湿	22	なし	強石灰質	なし	平坦画然
5Czg	96~104	10YR5/3	10YR6/4	なし	湿	22	なし	強石灰質	なし	平坦明瞭
6Czg	104~127	2.5 Y 5/4	10YR6/3	なし	湿~多湿	23	なし	強石灰質	なし	平坦明瞭
7Czg	127~134	10YR4/3	10YR6/3	なし	多湿	22	なし	強石灰質	なし	平坦明瞭
8Cz	134~147	10YR5/4	10YR6/4	なし	多湿	23	なし	強石灰質	なし	平坦明瞭
9Cz	147~170+	10YR5/4	10YR6/3	なし	多湿	20	なし	強石灰質	なし	平坦明瞭
サルタバーン・放棄地 (C1)										
Az1	0~ 6	2.5 Y 3/1	10YR5/3	粒状	乾	10	なし	強石灰質		平坦画然
Az2	6~ 8	2.5 Y 3/1	10YR5/3	粒状	乾	4	なし	強石灰質		平坦画然
Az3	8~ 14	10YR5/3	10YR4/4	中度亜角塊状	半湿	8	細あり	強石灰質		平坦画然
Az4	14~ 20	10YR5/4	10YR6/4	中度亜角塊状	半湿	26	細含	強石灰質		平坦明瞭
Azg5	20~ 32	10YR5/4	10YR6/4	中度亜角塊状	湿	27	細まれ	強石灰質	Fe (糸根状)	平坦明瞭
Bzg1	32~ 49	10YR5/4	10YR6/4	弱度角塊状	湿	31	細まれ	強石灰質	Fe (糸根状)	平坦明瞭
Bzg2	49~ 70	10YR5/3	10YR6/3	弱度角塊状	湿	30	細まれ	強石灰質	Mn (点状), Fe (糸根状)	平坦判然
Bzg3	70~ 89	10YR5/4	10YR7/3	弱度角塊状	湿	28	なし	強石灰質	Mn (点状), Fe (糸根状)	平坦明瞭
Bzg4	89~99/104	10YR5/4	10YR6/3	弱度角塊状	湿	26	なし	強石灰質	Mn (点状), Fe (糸根状)	波状画然
BCzg	99/104~103/108	10YR5/4	10YR6/4	弱度角塊状	湿	23	なし	強石灰質	Mn (点状), Fe (糸根状)	波状画然
2Czg	103/108~114	10YR5/4	10YR6/4	なし	湿~多湿	24	なし	強石灰質	Fe (糸根状)	波状画然
3Czg	114~150+	10YR5/4	10YR7/3	なし	多湿	22	なし	強石灰質	Fe (糸根状)	波状画然
サルタバーン・放棄地 (C2)										
Az1	0~ 3	10YR4/3	10YR5/4	粒状	乾	—	なし	強石灰質		平坦画然
Az2	3~ 7	10YR4/3	10YR5/4	団粒・弱度亜角塊状	半乾	2	細含	強石灰質		平坦画然
Az3	7~ 13	10YR4/3	10YR6/3	団粒・弱度亜角塊状	半湿	14	細含	強石灰質		平坦画然
ABz	13~28/54	10YR4/3	10YR6/3	弱度亜角塊状	湿	24	細含, 小あり	強石灰質		不規則明瞭
Bzg	28/54~65/71	2.5 Y 4.5/3	10YR6/3	なし	湿	23	細含	強石灰質	Mn, Fe (糸根状)	波状明瞭
2Bzg1	65/71~ 92	2.5 Y 5/3	10YR6/3	弱度角塊状	湿	25	細あり	強石灰質	Mn, Fe (糸根状)	平坦明瞭
2Bzg2	92~118	10YR6/4	10YR6/4	弱度角塊状	湿	26	細あり	強石灰質	Mn, Fe (糸根状)	平坦画然
3Czg	118~128/135	10YR2/1	10YR5/1	なし	多湿	18	細まれ	強石灰質	Mn, Fe (糸根状)	波状明瞭
4Czg	128/135~1150+	2.5 Y 5/3	10YR6/3	なし	多湿	23	細まれ	強石灰質	Fe (糸根状)	
イエルタイ・放棄地 (E1)										
Ap1	0~ 10	10YR4/3	10YR5/4	強度亜角塊状	乾	30	細あり	弱石灰質		平坦明瞭
Ap2	10~ 19	10YR4/3	10YR5/4	強度亜角塊状	乾	20	細, 中あり	弱石灰質		平坦明瞭
Ap3	19~ 28	10YR4/3	10YR6/3	強度亜角塊状	乾	25	細, 中あり	弱石灰質		波状画然
Ap4	28~ 39	10YR4/3	10YR6/3	なし	乾	34	細, 小, 中あり	弱石灰質		平坦画然
2Bzg1	39~ 48	2.5 Y 4.5/3	10YR6/3	なし	乾	33	細, 小, 中あり	弱石灰質	Fe (雲・糸根状)	平坦画然
2Bzg2	48~ 65	2.5 Y 4.5/3	10YR6/3	なし	半湿	33	細, 小, 中あり	弱石灰質	Fe (雲状)	波状画然
2Bzg3	65~ 80	2.5 Y 4.5/3	10YR6/3	中度角塊状	半湿	33	細, 小, 中あり	弱石灰質	Mn, Fe (雲状)	平坦判然
2Bzg4	80~ 93	10YR5/4	10YR6/4	中度角塊状	半湿	32	細, 小, 中あり	弱石灰質	Mn, Fe (雲・糸根状)	平坦判然
2Bzg5	93~112	10YR2/1	10YR5/1	中度角塊状	半湿	31	細, 小, 中あり	弱石灰質	Mn, Fe (雲状)	平坦画然
3Czg	112~130+	2.5 Y 5/3	10YR6/3	なし	湿	23	細, 小, 中あり	弱石灰質	Fe (雲・糸根状)	

以下では25%前後となっていた。31/44cmの深さまでは粘土34~39%、微砂44~51%、細砂11~14%、粗砂0.4~0.8%とほぼ一定していた。31/44cmより下層では、細粒な層と粗粒な層が交互に堆積されていた。

化学的性質：pHは全層にわたり7.0~7.5であった。表層のECe値は143dS m<sup>-1</sup>、5~8cmのECe値は83dS m<sup>-1</sup>、8cm以下のECe値は42dS m<sup>-1</sup>から20dS m<sup>-1</sup>へと下層になるに従い、徐々に減少していた。M1では表層のみに塩類が多量に集積しているのに対し、M3では下層から上層へ徐々に塩類が集積されていた。集積塩類組成の主体は塩化ナトリウム、硫酸マグネシウム、硫酸カルシウムであった。

#### 2.3.4.2.3. 水田隣接放棄地 (C1)

水田に隣接している放棄農地で土壌調査した。耐塩性植物のソリヤンコビ (*solyankoviye*) が多く見られた。

土壌断面形態：調査土壌断面は表層では乾燥していたが、下層では湿っていた。全層にわたり土壌が非常に緻密で硬く締まっていた。土壌表層への塩類集積は顕著であり、クラストが形成されていた。また、8~32cmまで垂角塊状、32~108cmまで角塊状が認められた。20cmより下層に根の周辺に褐色の斑鉄が認められた。また、89~108cmに黒色のマンガン斑が認められた。約150cmで湧水した。

物理的性質：表層の土壌水分含量は5~7%程度で乾燥していたが、下層になるにつれ、徐々に土壌水分が増加していた。水路を挟んで水田に隣接していることを反映し、150cm付近から地下水が湧水した。水稻作が行われている期間中、近隣農地の地下水位が上昇していると考えられた。この地域では、土壌中の毛細管現象により絶えず塩類集積が引き起こされていると考えられた。103/108~114cm、130~150cmの層では、粘土20%前後で、他の層よりも粘土含量が若干少なくSiCLであった。しかし、全層にわたり粘土33~55%、微砂38~53%で、非常に細粒な土壌 (LiC, HC) であった。

化学的性質：表層のpHは8以上を示していたが、20cm以下の層ではpH7.5前後であった。表層のECe値は120dS m<sup>-1</sup>で多量の塩類集積が見られた。しかし、下層になるに従いECe値が徐々に低下していた。下層から上層へ塩類が移動集積されていることがうかがわれた。

#### 2.3.4.2.4. 放棄地 (C2)

C1から3枚、水田から4枚離れたところにある放棄農地で土壌調査した。耐塩性植物のソリヤンコビ (*solyankoviye*) が比較的多く見られた。

土壌断面形態：表層では土壌が乾燥していたが、下層になるにつれ、徐々に土壌が

湿っていた。土壤表層への塩集積は顕著であり、クラストが形成されていた。13～54cmまで亜角塊状、54～118cmまで角塊状が認められた。28cmより下層に根の周辺に褐色の斑鉄が認められた。また、28～118cmに黒色のマンガン斑が認められた。

物理的性質：C1同様に、下層になるにつれ徐々に湿りが増していた。また、調査土壤断面内では、上層と下層では比較的粘質な土性（SiCL～CL）であったが、中層では粗粒な土性（L～SL）であった。

化学的性質：表層から65/71cmまでpH7.6～7.9であったが、それ以下の層ではpH7.0～7.5で比較的低い値であった。また、C1と同様に、表層のECe値は120dSm<sup>-1</sup>で多量の塩類が集積していたが、下層になるに従いECe値が徐々に低下しており、下層から上層へ塩類集積が進行していることがうかがえられた。

#### 2.3.4.2.5. 放棄地 (E1)

アルファルファ耕作地に隣接している放棄地で土壤調査した。耐塩性植物のソリヤンコビ (*solyankoviye*) が多く見られた。

土壤断面形態：表層では土壤が乾燥していたが、下層では土壤が湿っていた。クラストは形成されていなかった。Ap層は固く締まり、ひび割れていた。39cmより下層に炭酸カルシウムおよび硫酸カルシウムに起因すると思われる白色沈積物が斑点状に認められた。また、28cmまで亜角塊状、65～112cmまで角塊状が認められた。39cmより下層に根の周辺に褐色の斑鉄が認められた。65～112cmに黒色のマンガン斑が認められ、この辺りまで地下水が上下していたと考えられた。

物理的性質：表層から112cmまでは、粘土と微砂画分に富む細粒な土性（SiCL～HC）であった。しかし最下層は、砂画分が65%含まれる粗粒な土性（SCL）であった。また、65～112cmでは黒色のマンガン斑が認められた。

化学的性質：調査断面内のpHは、全層にわたり7.5前後であった。ECe値はイェルタイブロック内の調査断面中で最も高く、表層で18dS m<sup>-1</sup>であった。しかし、他ブロックと比較すると集積塩類量は少なかった。土壤断面の下層においてECe値がわずかに上昇しており、高位に地下水が存在していると推察され、今後、表層への塩類集積が懸念された。塩類組成としては、塩化ナトリウム、硫酸ナトリウムが主体であった。

#### 2.3.4.3. 粘土鉱物組成

メシットブロック内の放棄地 (M1) の砂質な表層 (Az2-2 ; 18～29cm) と粘質な下層 (2Bzg2 ; 75～95cm) の粘土鉱物をX線回折法、赤外線吸収法で同定した結果、表層、下層ともほぼ同じ組成で、2 : 1型を主体としていた。推定される主要粘土鉱物

は、スメクタイト、バーミキュライト、クロライト、イライトあるいはセリサイト（雲母系鉱物）であり、赤外線吸収特性からカオリン系鉱物はほとんど含まれていないと判定された。この周辺一帯の土壌母材はシルダリア川起源の堆積物であることから、他の農地も同様な組成であると推察された。農地の土層が堅密であったこと、また乾湿の繰り返しのある土壌上層部に堅牢な角塊状構造が発達していたことは、2:1型粘土鉱物に富むことに起因すると考えられた。また、ナトリウム塩が主体であった事と合わせて考えると、灌漑水が農地に施された時に粘土の分散性が増し、土層が固く締まって透水性の悪化が懸念された。

#### 2.3.4.4. 灌漑水の特徴

農業生産の水源は、主にシルダリア川である。

農場はシルダリア川に面しているにも関わらず、灌漑用水は約50km上流から取水している。これは、重力灌漑に必要な水頭を得るためである。しかし、水路系においては、早い段階に川から用水路へと取水されてしまうために、途中、蒸発などで失われる水量が多く、水路全体に水が回らないという問題がある。このことが、灌漑効率を低下させている一つの理由であると考えられた。

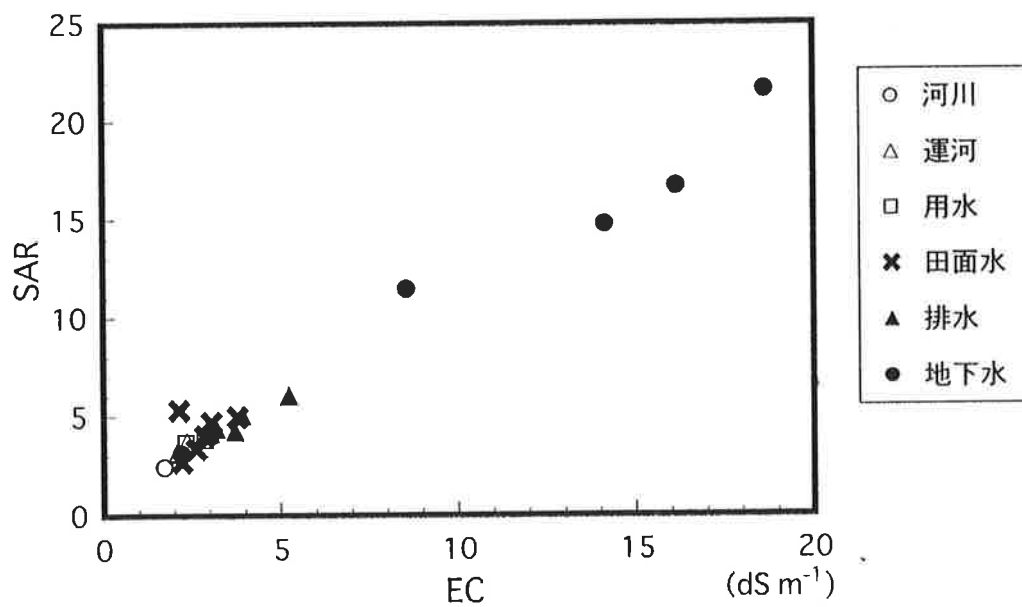
排水は排水路を経て、排水湖またはシルダリア川の支流へ排水される。この際、シルダリア川の水位が高い状態では排水困難になり、必要に応じてポンプを利用している。90年代初期にはシルダリア川に水を戻そうとする努力がなされたが、水の運ぶ砂や泥の堆積によって水路がつまり、現在ではそれも難しくなっている。更に農地が水に浸かるという被害も生じていた。

第2-8表と第2-11図に河川水から地下水への流れにおける水の平均ECとpHおよびSARを示した。水源である約50km離れたシルダリア川の水質は $EC=1.72dS\ m^{-1}$ 、 $SAR=2.5$ であった。しかし、シルダリア川上流で取水された水が、運河を経て各水路から灌漑ブロックの末端に至るにしたがって、EC、SARともに上昇していた（ $EC=1.72\rightarrow 2.2\sim 2.9dS\ m^{-1}$ 、 $SAR=2.5\rightarrow 3.6\sim 5.9$ ）。これは、シルダリア川から取水された水が、水路から農地に至る過程で漏水または蒸発によって失われることによって、濃縮されたためと考えられた。灌漑に利用している河川水は、硫酸ナトリウムを主体としたナトリウム塩に富んでいた。米国農務省の灌漑水の水質評価基準によると（US Salinity Laboratory Staff, 1954）、シルダリア川および農場で利用されている灌漑水の水質は、それぞれC3-S1（塩性害高・アルカリ害低）およびC4-S2（塩性害極高・アルカリ害中）に分類された。塩類濃度が高く、作物栽培用水としては問題



第2-8表 集団農場地域の水質

	河川	運河	用水	田面水	排水	地下水
点数	1	3	2	6	6	4
EC (dS m <sup>-1</sup> )	1.7	→ 2.2	→ 2.6	→ 2.8	→ 3.7	→ 14.4
pH	7.6	→ 7.7	→ 7.7	→ 7.8	→ 7.8	→ 7.6
SAR	2.5	→ 3.4	→ 3.7	→ 4.2	→ 4.7	→ 16.1



第2-11図 集団農場地域の水質

であるといえた。また、地下水のECは非常に高く、平均 $14\text{dS m}^{-1}$ 以上であった。高濃度の塩分を含む地下水の存在によって、土壌表層への塩類集積が大きく助長されると懸念された。

当地の河川水、用排水、地下水には、 $\text{EC} \approx \text{SAR}$  の関係が認められ、塩類濃度の上昇はナトリウム塩の付加によるものと考えられた。

#### 2.3.4.5. 土壌生成要因

土壌断面調査の結果、全体的な特徴として土壌母材はいずれもシルダリア川による堆積物で構成されており、同一農地でも堆積様式は大きく異なっていた。各土壌断面において土層の堆積様式に規則性は認められず、各土壌断面を構成する堆積層を面的に結びつけることはできなかった。有機物含量は少なく、全層で極めて硬く、緻密度30を示すことが多かった。作物の生育は全体的に悪く、根量も乏しかった。各土壌断面はいずれも褐色の酸化鉄の斑紋、また50~100cmの深さに根の周辺、構造表面に沿って疑似グライ化作用によると思われる灰色の斑紋が認められた。前者は水稻作付けに伴って生成され、また後者の生成は畑作時に地下水が高位で停滞し土壌が一時的に水で飽和されて還元的な環境下に置かれていたことを示唆している。

調査土壌はいずれも夏期に非常に乾燥し、Aridicな土壌水分状況を持ち、調査した土壌断面はいずれも表層にナトリウム塩を主体とした易溶性塩類が集積していた。Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 1998) によれば、AridisolsのSalidに分類された。また世界土壌照合基準 (World Reference Base for Soil Resources : FAO, ISRIC and ISSS, 1998) によれば、Solonchakに分類された。

#### 2.3.4.6. 土壌断面内の塩類動態

塩類集積放棄地は点在ではなく、各ブロック内にまとまって出現していた。放棄地の下層は粘土に富む土壌、耕作地の下層は砂に富む砂質な土壌であり、地下水位の動きと大きく関与していると考えられた。土壌断面内の粘質層の存在により、ブロック内における水稻作の影響で、地下水位が高くなり、上方から土壌に付加された灌漑水は、粘質層の上方で一次的に停滞し、蒸発散に伴う水の毛管上昇により、土壌断面全体に塩類が富む傾向があった。一方、土壌断面が粗粒な土性で構成されている地点では、水の下方浸透が比較的容易であるため、塩類が洗脱されやすく、毛管上昇も抑えられていた。

表層土の $\text{ECe}$ 値は耕作地で $9.7 \sim 50\text{dS m}^{-1}$ 、放棄地で $17.9 \sim 155\text{dS m}^{-1}$ であり、いずれも塩類土壌の基準 ( $\text{ECe} > 4\text{dS m}^{-1}$ ) をはるかに超える極めて高い値を示した。

放棄地の集積塩類量は極めて多量で、ECe値から判断すると、塩化ナトリウム換算で0.6~9%もあり、深さ1mの土壤中（容積重150g 100ml<sup>-1</sup>と仮定）に90~1350t ha<sup>-1</sup>の塩類が含まれていた。また、表層には1~2cmの厚さのクラストが一面に広く形成されており、その下部には3~5cmの厚さの柔らかく白色の塩類が析出した層が存在した。また、断面内にも易溶性塩類の結晶がスポット状に析出していた。

耕作地でも、地点によっては100t ha<sup>-1</sup>の極めて多量の塩が集積されていた。米国農務省の指標によると（US Salinity Laboratory Staff, 1954）、小麦では20dS m<sup>-1</sup>、アルファルファでは15.5dS m<sup>-1</sup>、水稻では11.5dS m<sup>-1</sup>のECe値を超えると100%の減収につながるとされている。調査当時、耕作地では小麦・アルファルファが耕作されていたが、表層のECe値はそれぞれ10~50dS m<sup>-1</sup>であり、減収率100%を見込むECe値であった。飽和抽出液中に含まれている主要な可溶性塩類は塩化ナトリウム、硫酸ナトリウム等のナトリウム塩を主体とした塩類であった。集積塩類の主体は中性塩であるためpHは7~8で、アルカリ化は進行されていなかった。

同じ放棄地でも近隣で水稻作が行われている地点では塩類が多量に集積していた。水田隣接地点では1.5mの深さに地下水面（この地下水のEC値は非常に高く、現地ではECメーターがオーバーレンジで測定不能であった）が存在したが、水田から離れた地点では少なくとも2mの深さまでには地下水面の確認が出来なかった。放棄地でも、隣地に水田があると地下水面が高くなり、塩類集積が徐々に進行しており、放棄された時点よりもかなり塩類が集積したと考えられた。つまり、水稻作が行われている期間中、近隣の農地周辺の地下水位が上昇していると考えられた。この地域では土壤中の毛細管現象により絶えず塩類集積が引き起こされていると考えられた。

近年に開発されたイエルタイブロックの放棄地では、管理歴が長いメシット、サルタバーンブロックの放棄地のように土壌断面全体に塩の析出はみられず、局所的であった。最表層の飽和抽出溶液のECe値は、放棄地のE1が最も高く17.9dS m<sup>-1</sup>、耕作地のE2とE3は、それぞれ11.4dS m<sup>-1</sup>、9.7dS m<sup>-1</sup>であった。集積塩類は、メシット、サルタバーンと同様にナトリウム塩を主体としていた。放棄地（E1）のECe値は作物生育の限界付近にあるが、他のブロックの放棄地と比較すれば1/10程度であり、メシットブロックの耕作地（ECe=20~50dS m<sup>-1</sup>）よりも低かった。ECe値で評価すれば、イエルタイ耕作地の塩類集積量は他のブロックの耕作地よりもはるかに少ないといえた。しかし、塩類土壌と判定される基準を大きく超えており、作物には非常に過酷な状況にあるといえた。また、下層でECe値が漸増する傾向が認められた。これは、八圃式

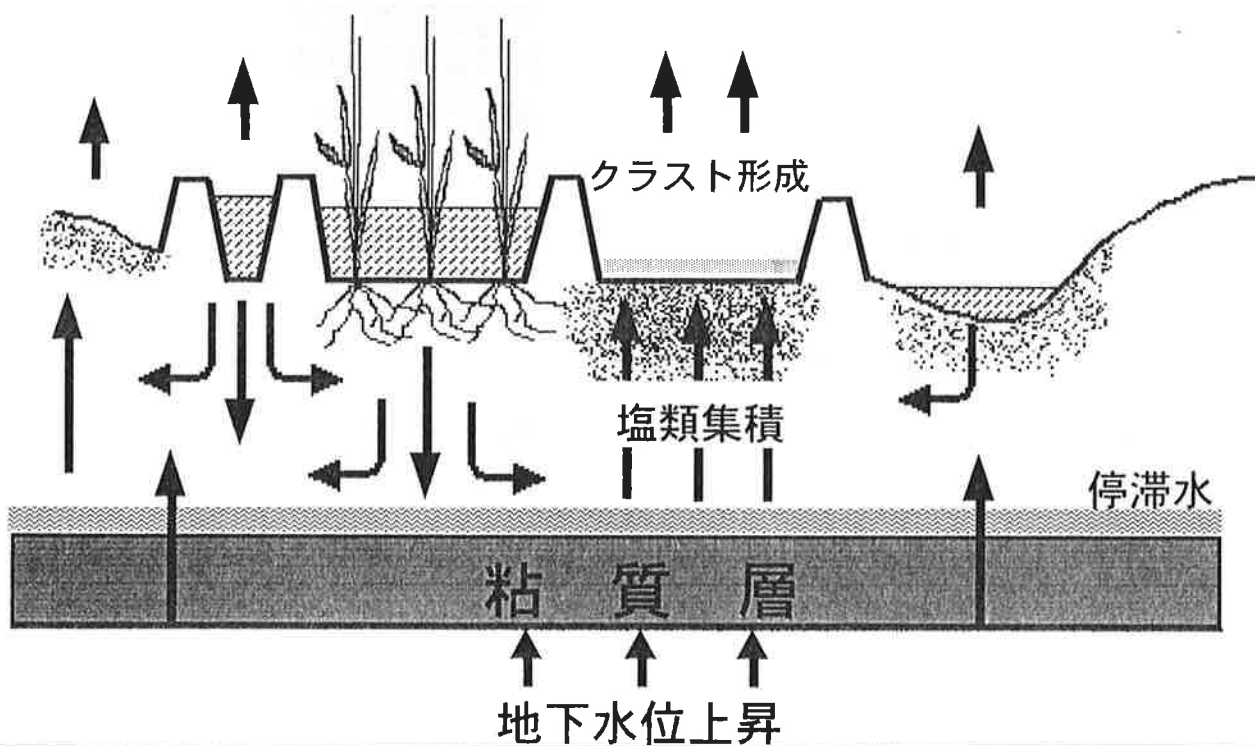
輪作の影響で塩分に富む地下水が比較的高いところに存在しているためと考えられ、下層から上層へ除々に塩類集積が引き起こされることが懸念された。また、土壌pHは7~8であり、現状ではアルカリ化については問題なかった。

土壌断面調査の他に、メシット、サルタバーンブロックの11地点の土層の堆積様式をソイルオーガーによって調査した。野外調査の結果、耕作地では50cm以下の下層土が砂質な土性（SL~L）、塩類集積放棄農地は50cm以下の下層が粘質な土性（LiC~HC）であることが確認された。このことは農場内の各ブロックの土壌断面調査からも明らかであり、この地域全体として、放棄地の下層は粘土・シルトを主体とした粘質な土壌、耕作地の下層は砂に富む砂質な土壌であり、下層土の土性が塩類集積に大きく関与していることが明らかであった。すなわち、灌漑水を付加した際に、粘質層が透水性の不良とともに毛管水の上昇の原因ともなり、土層内に大量に塩分を集積し、耕作が不可能になったものと推察された。一方、耕作地は全体的に砂質の層で占められており、透水性が良好であった。同一ブロック内においても、塩類集積の程度に大きな違いが見られる原因として、下層土の土性が大きく関与していることが明らかであり、このことは栽培農地における植物生育と土壌との関係からも明確に確認された。

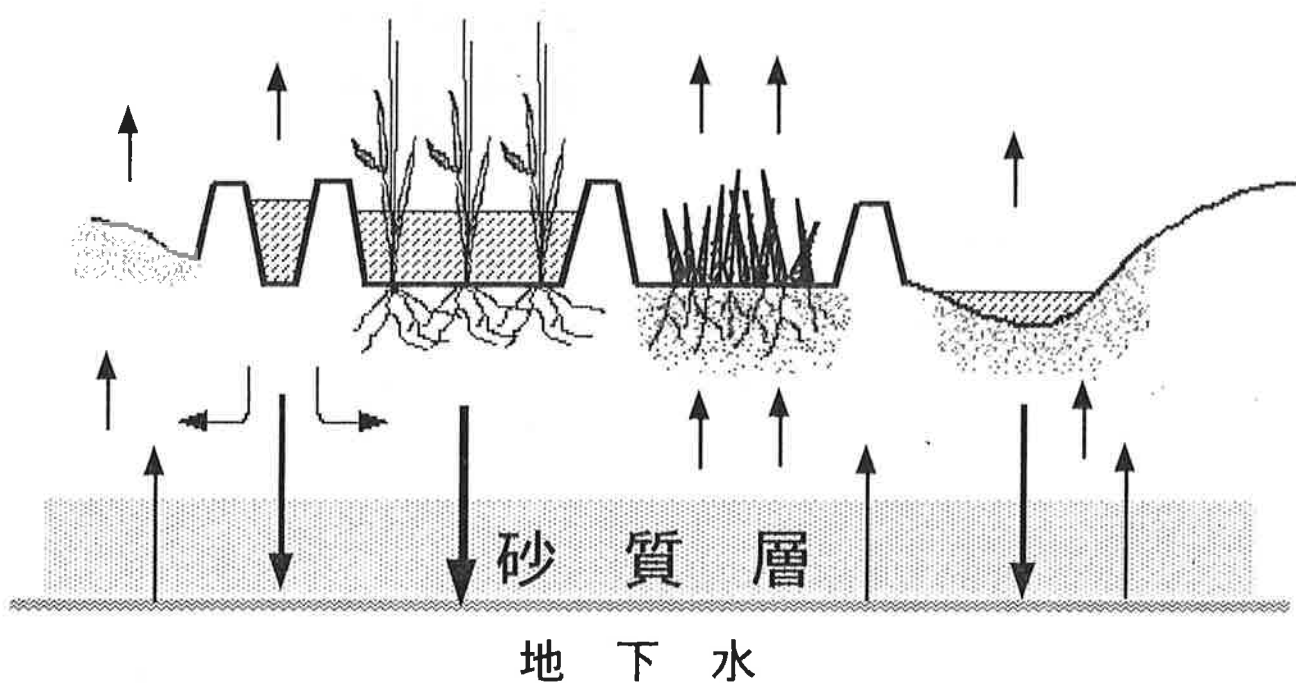
第2-12図に下層土の差異による水と塩類の動態の概念図を示した。放棄地では、細粒な層が下層に存在することにより土層内の水はけが悪くなっていると考えられた。このことにより、土壌に加えられた水は、細粒層の上方で一時的に停滞し、その停滞水が土壌中の可溶性塩類と共に地表の激しい蒸発散によって毛管上昇し、塩類集積を引き起こしやすくしている。また、地下水などの下方からの水は、土壌中の毛管孔隙に保持され易くなり、常に土壌内に湿った層が存在すると考えられた。土壌への多量の塩類集積は、粘質な下層土と水稻作を含む輪作体系が複合的に絡み合い、ウォーターロギングの状況が作り出されたといえる。一方、耕作地では下層の水はけがよく、土壌の下方浸透が比較的容易であり、塩類が洗脱されやすく毛管上昇も比較的抑えられていると考えられた。

水稻作を含む八圃式輪作は、周辺の畑地へ地下水を介して水分を補給し、水を有効利用できる利点はあるが、下層土が粘質な場合、毛管上昇による表層への塩類集積を助長する危険性が極めて高いといえる。また、この地域一帯の土壌が2:1型粘土鉱物に富んでいるため、塩の洗脱過程で土壌溶液濃度が低下することにより粘土の分散性が増し、土壌の透水性の著しい悪化が懸念される。分散性を増した粘土は灌漑水とともに断面内を下方移動し、粘土集積層を形成する危険性がある。このことは土壌の透

下層が粘質であると・・・



下層が砂質であると・・・



第2-12図 下層土の差異による水と塩類の動態

水性を更に悪化させることにもなる。現地では、当初、八圃式輪作が導入され、水田利用時にそれまで集積された塩類の除去が期待されていた。しかし現状では、逆に水田利用時に周辺の農地の塩濃度が著しく上昇し、かえって、地域全体の塩類集積を早めているものと推察された。また、当地は排水路への地下排水がほとんど機能していない。これは、排水路の両岸が農道として利用されているため、土壌への締め固めが進んだことによると考えられた。水稲作からの浸透水は、排水路の下を通過して耕作地へ移動し、その地下水位を高めている。そのことが畑作区への塩類集積を加速していると考えられた。

農場では農地を放棄するか、耕作を続行するかは作物の収量の減収具合で決められており、その収量の目安は、 $2t\ ha^{-1}$ 以下と言われている。しかし、現在の状況では、農地への播種量が多いためかろうじて収量が保たれていると考えられる。このため、いかに土壌に集積した塩類を除去し、あるいは塩類の集積を最小限に食い止めるかが重要な課題である。

#### 2.4. 総合考察

調査したメキシコ・カリフォルニア半島中央部、カザフスタン・シルダリア川下流域の灌漑農地では、地域、地点によって様々な塩類動態を示すことにより、引き起こされた土壌の塩類化・アルカリ化の程度は異なっていた。

砂質農地に灌漑水を施すと、土壌中の集積塩類は下層へ洗脱されていた。砂質な土性が幸いし、灌漑により塩類が効果的に洗脱された結果といえる。しかし、重炭酸ナトリウムを多量に含む灌漑水を利用することにより、塩類の洗脱に伴い塩組成が変化し、わずか数年間のうちに、土壌pHが著しく上昇していた。その結果、作物に栄養障害が誘発された。砂質農地では集積塩類組成が変化しやすい環境下にあると考えられた。塩類組成変化は、土壌中・灌漑水中の塩類量・組成、灌漑水量および管理歴に依存しており、ナトリウム塩と炭酸塩および重炭酸塩が土壌中・灌漑水中に過剰にあると、塩類が洗脱されていく過程で、土壌溶液中のSARとpHが上昇されてしまうと考えられた。また管理歴が長くなると、表層へナトリウム塩が集積する傾向が認められた。土壌のアルカリ化・塩類化の程度は灌漑水の水質・灌漑水量・管理歴等に起因すると考えられた。しかし、塩濃度が高い灌漑水を利用しているにもかかわらず10年以上安定した収穫を得ている農地があることは、砂質な土性であるために塩類が下層に洗脱され易く、表層に溜まりにくい事を反映していた。しかし、各種塩類とともに肥料中

の硝酸態窒素が下層へ洗脱されやすい環境下にあるため、地下水汚染が懸念された。

一方、粘質農地ではナトリウム塩を多量に含む灌漑水と粘土含量の高さに起因し、全層にわたり非常に硬盤になっていた。塩類が水に附随して土壤中に滞留されやすいため、可溶性塩類は下層に洗脱されにくいと考えられた。その結果、灌漑水中、肥料中の塩類がそのまま表層へ集積されやすい環境下にあると考えられた。しかし、地下水位が低く抑えられていれば、根群域に集積される塩類は主に灌漑水、肥料中の塩類に支配されており、下層からの地下水の上昇による塩類の付加は懸念されない。良質とはいえぬ灌漑水でも、十年以上にわたって栽培、収穫が継続され、安定した作物生産が確保でき、十分に活用されている農地があることは、過剰な灌漑水を与えない水管理がいかに重要であることを示唆するものといえる。

農地の土性と水および塩類の動態の関係は、畑作だけではなく水稲作においても大きく関与すると考えられた。排水整備が不十分な地域では、塩類の洗脱効果は土壤の性質に大きく関与していると考えられた。すなわち、粘質層が存在すると、灌漑水の透水性の悪化とともに、地下水位を上昇させ、毛管水上昇によるウォーターロギングの原因ともなり、土層内に大量の塩類が持ち込まれ、土壤の塩類化を助長させることにもなると考えられた。また、大量の灌漑水を施与していることも、塩類集積の進行を助長すると考えられた。

乾燥地の灌漑農業における土壤塩類化・アルカリ化を誘因する塩類動態は、土壤の性質、土壤中の集積塩類の量、組成および灌漑水の水質、量、灌漑方式、管理歴等の要因が複合的に絡み合ったものであり、地域によって異なっていた。すなわち、土壤の性質と土壤・灌漑水中の塩類の多様性によって土壤管理、水管理法も異なってくると考えられた。そのためには、土壤中の塩類の水に対する溶解特性を十分に把握し、灌漑による塩類動態の要因についての検討が必要であると考えられた。農業生産を持続的に向上維持させる方法を長期的視野に立って確立するためには、乾燥地で灌漑農業を営む地域に共通して、それらをあらかじめ考慮に入れて適切な土壤管理、水管理が必須な条件となると考えられた。

## 2.5. 要 約

乾燥地域における灌漑農地の土壤環境の実態について水環境において極めて対称的なメキシコ・カリフォルニア半島中央部とカザフスタン・シルダリア川下流域の二つの地域において土壤調査を行い、それらの土壤の特徴を明らかにし、土壤塩類化・ア

ルカリ化等の土壌劣化の実態，灌漑による塩類動態等の比較・検討を行った．両地域とも年降水量が100mm前後の乾燥地域であるが，水資源の面で大きく異なっていた．前者はわずかな水源の地下水，後者は大量に取水可能な河川水を利用しており，両地域とも，これらの水をいかに有効利用するかが重要な課題となっている．

メキシコ・カリフォルニア半島中央部の年降水量は100mm以下であり，灌漑は地下水に依存している．地下水はナトリウム塩（塩化ナトリウム，ナトリウム炭酸塩）を主体としていた．この地域は，風成第四紀系堆積層であるが，海岸近い砂丘地帯と内陸側に位置する砂漠地域で異なった土壌断面がみられた．灌漑に伴う土壌中の塩類の動態は，土性によって大きく異なっていた．

海岸に近い砂丘地帯のゲレロネグロは細砂を主体とした砂の堆積物であった．農地には土壌のECe値が比較的高い箇所（約3dS m<sup>-1</sup>）が局所的にみられたが，主に硫酸カルシウムに起因していた．しかし，全体的にECe値は1dS m<sup>-1</sup>程度で，ナトリウム塩が集積する傾向は認められなかった．砂質な土性が幸いし，灌漑により塩類が効果的に洗脱された結果といえる．しかし，塩類の洗脱に伴い，わずか数年間の管理により，土壌pHが著しく上昇（8.5以上）した．その結果，作物に栄養障害が誘発された．

また，ビスカイノの農地はゲレロネグロと同様に砂質な土壌断面であったが，表層へナトリウム塩が集積する傾向が認められた．これは，ゲレロネグロに比べ灌漑水の水質が悪いこと，灌漑水量が多いこと，管理歴が長いこと等に起因している．しかし，塩濃度が高い灌漑水を利用しているにもかかわらず10年以上安定した収穫を得ていることは，砂質な土性であるために塩類が下層に洗脱され易く，表層に溜まりにくい事を反映していた．しかし，肥料中の硝酸態窒素が下層へ洗脱されやすい環境下にあるため，地下水汚染が懸念された．

内陸に位置するヘスマリアは粘質からなる堆積物であった．農地の表層には多量の塩類集積がみられ，土壌のECe値は10dS m<sup>-1</sup>を越えていた．粘質な土性であるが故に，灌漑水中の塩が下層に浸透されにくい結果といえる．しかし，地下水位が低く抑えられおり，表層に集積される塩類は主に灌漑水，肥料中の塩類に支配されており，下層からの地下水の上昇による塩類の付加は懸念されていなかった．良質とはいえぬい灌漑水でも，十年以上に渡って栽培，収穫が継続され，安定した作物生産が確保できる農地として十分に活用されてきていたことは，過剰な灌漑水を与えない水管理がいかに重要であるかを示唆するものといえた．

カザフスタン・シルダリア川下流域で調査した地域の年降水量は約120mmで，



調査農地は、旧ソ連邦政権下、1960年代から開発された大規模灌漑農地の一つである。大量の灌漑水を河川から利用できるという点で、カリフォルニア半島とは水環境において大きな違いがある。灌漑に利用する河川水は、ナトリウム塩を多く含むが、カリフォルニア半島の地下水と異なり、硫酸ナトリウムに富むことが特徴的であった。排水不良となりやすい極めて平坦な地形、そして、大量の水を農地に灌漑することになる水稻作を含む輪作体系が、この地域の土壌の塩類化と密接に関係していた。調査農地は深刻な塩類化の状況にあり、30%以上が耕作放棄されていたが、放棄地は点在ではなく、各灌漑ブロック内にまとまって出現していた。表層への集積塩類の量は、下層土の土性と密接に関連していることが明らかであった。下層土が粘質な農地は、表層に極めて多量の塩が集積しており、放棄地の分布は下層土が粘質な土壌の分布とほぼ対応していた。このように、この地域では典型的なウォーターロギングによって、土壌下層から表層へ多量の塩類が移動集積していることが明らかになった。

乾燥地の灌漑農業における土壌塩類化・アルカリ化を誘因する塩類動態は、土壌の性質、土壌中の集積塩類の量、組成および灌漑水の水質、量、灌漑方式、管理歴等の要因が複合的に絡み合ったものであり、地域、地点によって異なっていた。

## 第3章 乾燥地土壌中の塩類の溶解特性

### 3.1. はじめに

乾燥地土壌中の集積塩類の量・組成の多様性は、土壌溶液に反映される。土壌溶液中の塩類濃度が一定の限界値を一時期でも超過すると、植物の生育は著しく抑制される。土壌溶液は植物に直接養分を供給する源であり、土壌溶液中のイオン活量と、植物によるイオン吸収量の高いに高い相関がある (Sposito, 1989) ことから、土壌溶液イオン組成の重要性は強く認識されている。しかし、土壌溶液に溶存する塩類は、土壌中に残存するものの量と比べるとはるかに少ないことが多い。そのため、土壌溶液組成は土壌の乾湿や施肥によって変動する。また、このような土壌中の集積塩類の量・組成の多様性は、灌漑による塩類動態にも反映される。つまり、前章で調査した灌漑農地の塩類動態の差異は、土壌の性質と集積塩類の多様性および灌漑水質・量によると考えられたが、そのことにより、適切な農地管理の指針も異なってくるといえた。乾燥地の灌漑農業の重要な技術課題の一つに、貴重な水の有効利用が挙げられるが、灌漑法によって塩類動態は大きく異なる。

したがって、適切な土壌管理、水管理を行うためには、土壌中の集積塩類の量・組成と土壌溶液中に溶出している塩類の量・組成の関係を把握することは極めて重要な課題である。本章では、土壌に対する水添加量の差異による土壌溶液中の塩類組成の変化を取り上げた。すなわち、塩類の水の溶解特性に着目し、土壌に対する水分条件の違いと塩類集積量および塩類組成の関係を明確にするために、集積塩類の量と組成の異なる土壌に対する添加する水の量を変え、塩類の溶解特性および土壌溶液中の存在形態を解析した。

### 3.2. 供試土壌および分析方法

#### 3.2.1. 供試土壌

土壌の水分状態と塩類集積量および塩類組成の関係を明確にするために、メキシコ合衆国・カリフォルニア半島中央部 (28° N, 114° W) とカザフスタン共和国・シルダリア川下流域 (46° N, 65° E) の乾燥地において、集積塩類量・組成の異なる土壌を7点供試した。土壌試料名はメキシコ土壌 ; M, カザフスタン土壌 ; Kとした。また、添字としてカルシウム塩集積土壌 ; c, マグネシウム塩集積土壌 ; m, ナトリウム塩集

積土壌；nとした。供試土壌の理化学性を第3-1表に示した。土壌飽和抽出液のpHは7.3~8.0でアルカリ土壌に分類される8.5を越えるものはなかった。電気伝導度（EC）をアメリカ合衆国塩類研究所から提案されている分類法（US Salinity Laboratory Staff, 1954）に準じ評価すると、Mは1.54dS m<sup>-1</sup>で非塩類性土壌，Mcは3.15dS m<sup>-1</sup>で弱塩類性土壌であった。また，Mnは5.50dS m<sup>-1</sup>で強塩類性土壌と分類され，塩類土壌の指標（ECe>4dS m<sup>-1</sup>）を上回っていた。さらに，Mcn，Kcmn1，Kcmn2およびKcmn3はいずれも50dS m<sup>-1</sup>を越え，極塩類性とされる16dS m<sup>-1</sup>をはるかに上回っており，極めて多量の塩類が集積していた。4dS m<sup>-1</sup>を越えている土壌試料については，作物の収量に影響を与えるため農地としては不適であるとされているが，本研究では塩類の集積量による溶解特性および溶液中での存在形態の違いを明確にするために供試した。

メキシコ土壌の砂画分は90%以上を占め，土性は砂土～壤質砂土（国際土壌学会法：S～LS）に区分された。一方，カザフスタン土壌は，メキシコ土壌とは対照的に比較的粘質な土性で，壤土～シルト質埴土（同法：L～SiC）に区分された。

### 3.2.2. 分析方法

土壌中の水分条件が塩類の溶解特性および土壌水抽出溶液中の存在形態に与える影響を検討するため，各土壌の土壌：水比（以下，土液比と称す）を土壌飽和抽出相当量から1：50まで各段階に調節した。

2mm以下の風乾細土について，以下の方法により分析を行った。

各土壌に対する水添加量は，メキシコ土壌について，土液比を土壌飽和抽出および1：0.3，1：0.5，1：1，1：2.5，1：5，1：10，1：25，1：50の9段階に調節して，水抽出液を採取した。一方，カザフスタン土壌については，土壌試料が少なかつたため，飽和抽出および1：2.5，1：5，1：10，1：25，1：50の6段階に調節して，水抽出液を採取した。

以下，本論文中では土壌1に対して $\chi$ の水を添加した水抽出液を1： $\chi$ と称す。

土壌飽和抽出液から1：1までは土壌に水を加え，25℃で18時間静置した後，それぞれの試料を土壌溶液採取用の遠心分離管に入れ遠心分離（3000rpm，40min）し，pF3.0以下の抽出液を採取した（土壌養分分析測定法委員会，1986）。また，1：2.5から1：50までは土壌に水を加え，25℃で1時間振とうした後，遠心分離（15,000rpm，10min）によって抽出液を採取した。抽出液について，それぞれカルシウムイオン（Ca<sup>2+</sup>），マグネシウムイオン（Mg<sup>2+</sup>），カリウムイオン（K<sup>+</sup>），ナト

第3-1-1表 供試土壌の特性 (1)

試料名	供試土壌	pH <sup>*</sup>	EC <sup>*</sup> (dS m <sup>-1</sup> )	粒径組成 (I.S.S.S.)				土性	CEC
				粗砂	細砂	微砂	粘土		
メキシコ・ゲレロネグロ									
M	耕作地・表層	8.0	1.5	14.9	79.5	3.3	2.3	S	1.1
Mc	耕作地・下層	7.7	3.2	13.9	75.6	6.3	4.2	LS	1.0
Mn	自然土壌・表層	7.6	5.5	13.8	84.6	1.0	0.6	S	0.9
Mcn	自然土壌・下層	7.3	61.3	15.8	71.0	8.2	5.0	LS	2.3
カザフスタン・クジルオルダ									
Kcmn1	放棄地・表層	7.6	62.2	5.9	67.9	13.4	12.8	L	5.5
Kcmn2	放棄地・中層	7.8	57.5	0.1	1.1	60.1	38.7	SiC	12.1
Kcmn3	放棄地・下層	7.9	54.7	0.0	7.4	57.5	35.1	SiC	11.1

\*飽和抽出法

第3-1-2表 供試土壌の特性 (2)

試料名	全イオン含量 <sup>**</sup> (cmolc Kg <sup>-1</sup> )									
	陽イオン					陰イオン				
	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	合計	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> +HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	合計
メキシコ・ゲレロネグロ										
M	28.2	1.2	0.4	0.4	30.3	0.4	0.1	28.1	0.5	29.1
Mc	105.6	1.0	0.3	0.4	107.2	72.8	0.0	27.9	2.4	103.2
Mn	21.1	1.8	0.2	1.5	24.6	0.3	0.0	20.2	3.4	23.9
Mnc	47.9	3.7	1.2	23.3	76.1	18.5	0.0	28.2	28.3	75.1
カザフスタン・クジルオルダ										
Kcmn1	140.1	13.7	0.8	26.7	181.4	92.5	0.0	43.5	42.3	178.3
Kcmn2	77.3	23.1	1.0	43.7	145.1	32.6	0.0	51.2	45.1	128.8
Kcmn3	79.4	21.1	0.8	46.9	148.2	43.2	0.0	56.2	41.8	141.2

\*\*酢酸アンモニウム溶液抽出

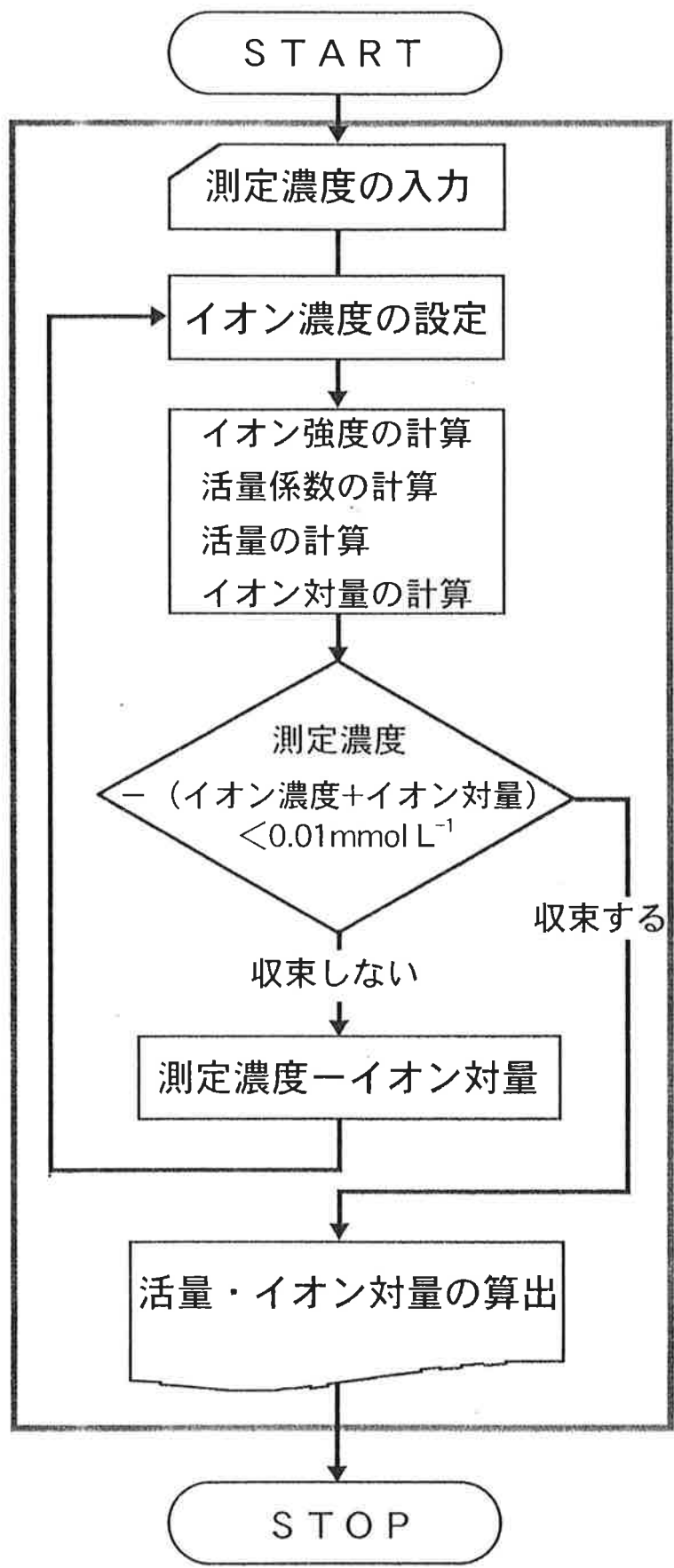
リウムイオン ( $\text{Na}^+$ ) , 硫酸イオン ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) , 硝酸イオン ( $\text{NO}_3^-$ ) , 重炭酸イオン ( $\text{HCO}_3^-$ ) , 塩化物イオン ( $\text{Cl}^-$ ) を測定し, 土液比と抽出溶液の塩類量・組成の関係を検討した. なお $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ については原子吸光光度法,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ についてはイオンクロマトグラフィー法,  $\text{HCO}_3^-$ については微量拡散法によって測定した. また, pHはガラス電極法, ECは電気伝導度計によって測定した.

水溶液中の独立成分濃度は, 質量作用則と保存則から導かれる連立方程式から, 繰り返し計算法による化学平衡計算のプログラムを用いることによって推定するものである (Paul *et al.* 1966). 土壤溶液中の各独立成分濃度を求める時においても, 通常, Adams (1971) の繰り返し計算を用いることによって求められる. したがって本研究では, 得られた抽出液中の各イオン濃度を測定し, 測定濃度からDaviesの理論式を用いた繰り返し計算によって独立成分濃度を推定した. アルゴリズムを使ったプログラムにより, 各測定イオン ( $\text{Ca}^{2+}$ や $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ など) を仮定独立成分濃度として初期値を与え, 独立成分濃度を推定した.

第3-1図に繰り返し計算のフローチャートを示した.

最初に溶液中のイオンが全て解離していると仮定して, 測定結果よりDaviesの理論式を用いてイオン強度 (I) を求め, 各イオンの活量係数と活量を計算した. 次に溶液中に生成すると考えられるイオン対 ( $\text{CaSO}_4^0$ や $\text{CaCl}^+$ などの20種類を考慮) の活量を求め, 各イオン対の平衡定数からイオン対量を計算した. 推定したイオン濃度とイオン対量の合計量が測定濃度に等しいかどうか判定し, 等しくない場合に先の手順で得られたイオン対量を測定濃度から差し引き, この値を解離しているイオン濃度と仮定して, 再びイオン強度の計算以降の過程を繰り返した. 推定イオン濃度とイオン対量の合計値が測定濃度の値に収れんするまで計算過程を繰り返した (岡島ら, 1976).

プログラムの概略は以下の通りである. 言語としてはMicrosoft Excel Basic-Basicを使った. 1. 化学種の数や平衡定数, 化学式などを入力した. また独立成分濃度の初期値として各測定濃度 ( $C_i$ ;  $\text{Ca}^{2+}$ や $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ など) およびpHを入力した. 2. 活量係数の計算をし, 独立成分iの活量を計算した. なお, 活量係数の算出にはDaviesの式を使った. 3. 質量作用の法則から従属成分 ( $\text{CaSO}_4^0$ や $\text{CaCl}^+$ など) の活量および濃度を求めた. 4. 独立成分iを含む各化学種の濃度を求め, 測定濃度 ( $C_i$ ) と比較し, 独立成分濃度 ( $C'$ ) を計算した. 5. 全ての化学種について収束しているか判断し, 収束していなければ2. にもどり, 収束していれば次に進んだ. 判定条件は,  $|C_i - C'| < 0.01$  である. 6. 計算結果を算出した.



Daviesの計算式

$$I = 1/2 \sum M_i Z_i^2$$

$$\log \gamma_i = -AZ_i^2 \left( \frac{I^{1/2}}{1 + I^{1/2}} - 0.3I \right)$$

合計値の収れん判定

収束する

収束しない

新たなイオン濃度設定

結果の算出

第3-1図 繰り返し計算フローチャート

繰り返し計算に用いた塩類のイオン対種とその反応および溶解度積のパラメーターはWada and Seki (1994) に準じ、第3-2表に示した。

### 3.3. 結果および考察

#### 3.3.1. 土液比の変化に伴うイオン濃度の変化とその機構

第3-2図に各土壌の水分条件によるECの変化を示した。水添加量の減少に伴うECの増加度は土壌によって異なり、特に水添加量が少なくなるとその違いが著しかった。このことは、塩類の集積量・組成の違いを反映しているといえた。

水添加量と土壌水抽出液中のイオン濃度の関係を第3-3図に示した。

土壌試料、水添加量に関わらず、陽イオン濃度と陰イオン濃度はほぼつりあっていた。このことから、これら8種のイオンがここで用いた土壌試料中の主要イオンとみなしてよいと考えられた。

いづれの土壌試料においても、水添加量の減少に伴いイオン濃度は増加したが、単純な反比例的な増加傾向は示さなかった。また、土壌試料によって水添加量の減少に伴うイオン濃度の増加傾向は異なった。各イオンについて見ると、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Cl}^-$ 濃度はほぼ反比例的に増加したが、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 濃度は反比例的な増加傾向は示さなかった。その程度は土壌試料により異なり、Mc, Mcn, Kcmn1, Kcmn2, Kcmn3で著しかった。この差異は、土壌溶液のイオン濃度の支配要因としての難溶性塩の存在が考えられた。そこで、本研究では、Adams (1971) の提案している繰り返し計算法を応用し、溶液中で支配要因となっている硫酸カルシウムの沈殿生成について考察した。イオン対を考慮しながら硫酸カルシウムの溶解度積を求め、硫酸カルシウムに対する飽和度指数(SI)を次式によって計算し、その結果を第3-4図に示した。

$$\text{SI}_{\text{CaSO}_4} = \log \left( (\text{Ca}^{2+})(\text{SO}_4^{2-}) / K_{\text{Sp}_{\text{CaSO}_4}} \right)$$

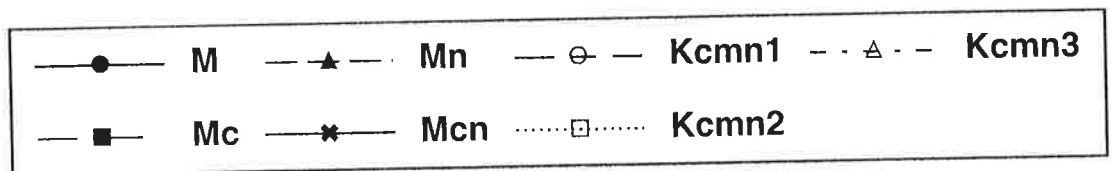
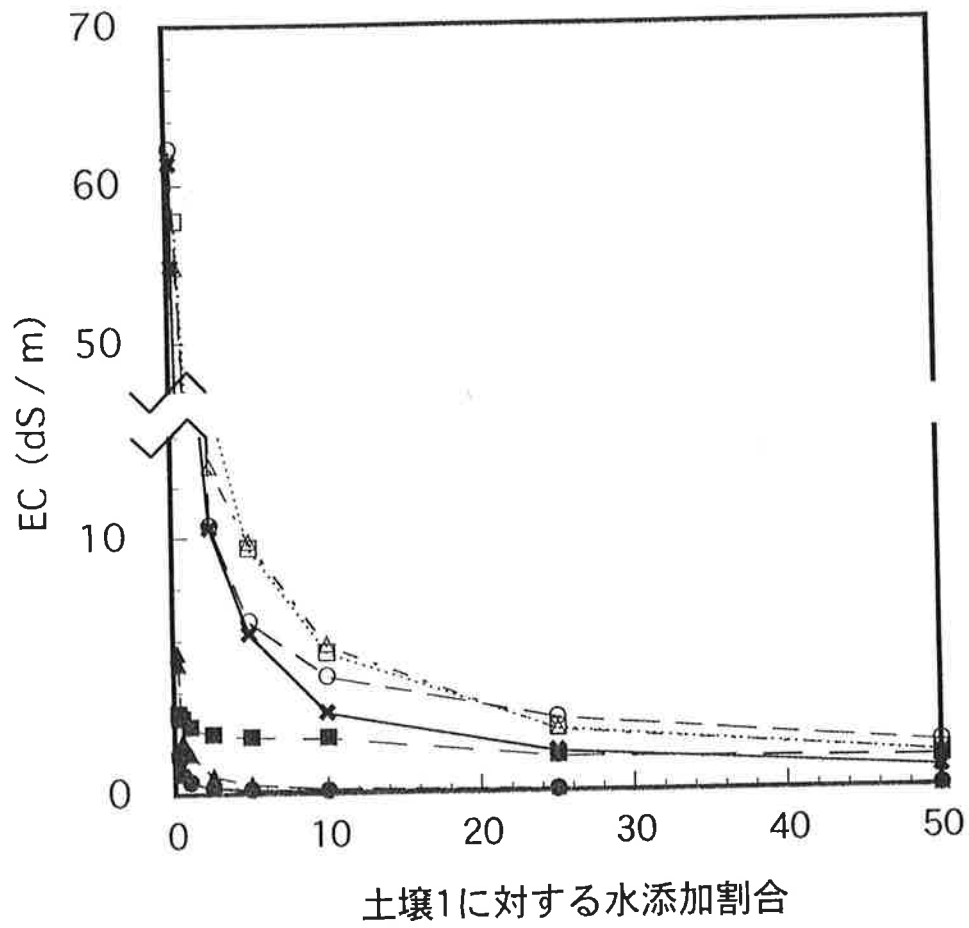
ここで丸括弧はイオンの活量を、 $K_{\text{Sp}_{\text{CaSO}_4}}$ は硫酸カルシウムの溶解度積を示す。

Mcn, Kcmn2, Kcmn3では、1:10で $\text{SI}_{\text{CaSO}_4}$ が0を大きく下回ったことから、1:5までは抽出液には硫酸カルシウムが過飽和の状態が存在していたが、1:10ではほぼ全量に近い硫酸カルシウムが溶解されたと考えられた。また、Mc, Kcmn1においても同様の傾向を示し、1:25まで硫酸カルシウムが過飽和の状態が存在し、1:50付近ではほぼ全量に近い硫酸カルシウムが溶解されたと考えられた。一方、M, Mnでは飽和抽出液でも $\text{SI}_{\text{CaSO}_4}$ が0を大きく下回っており未飽和であることから、土壌中に沈澱していた硫酸カルシウムは比較的少ないことが考えられた。水添加量の減少に伴う単純なイオ

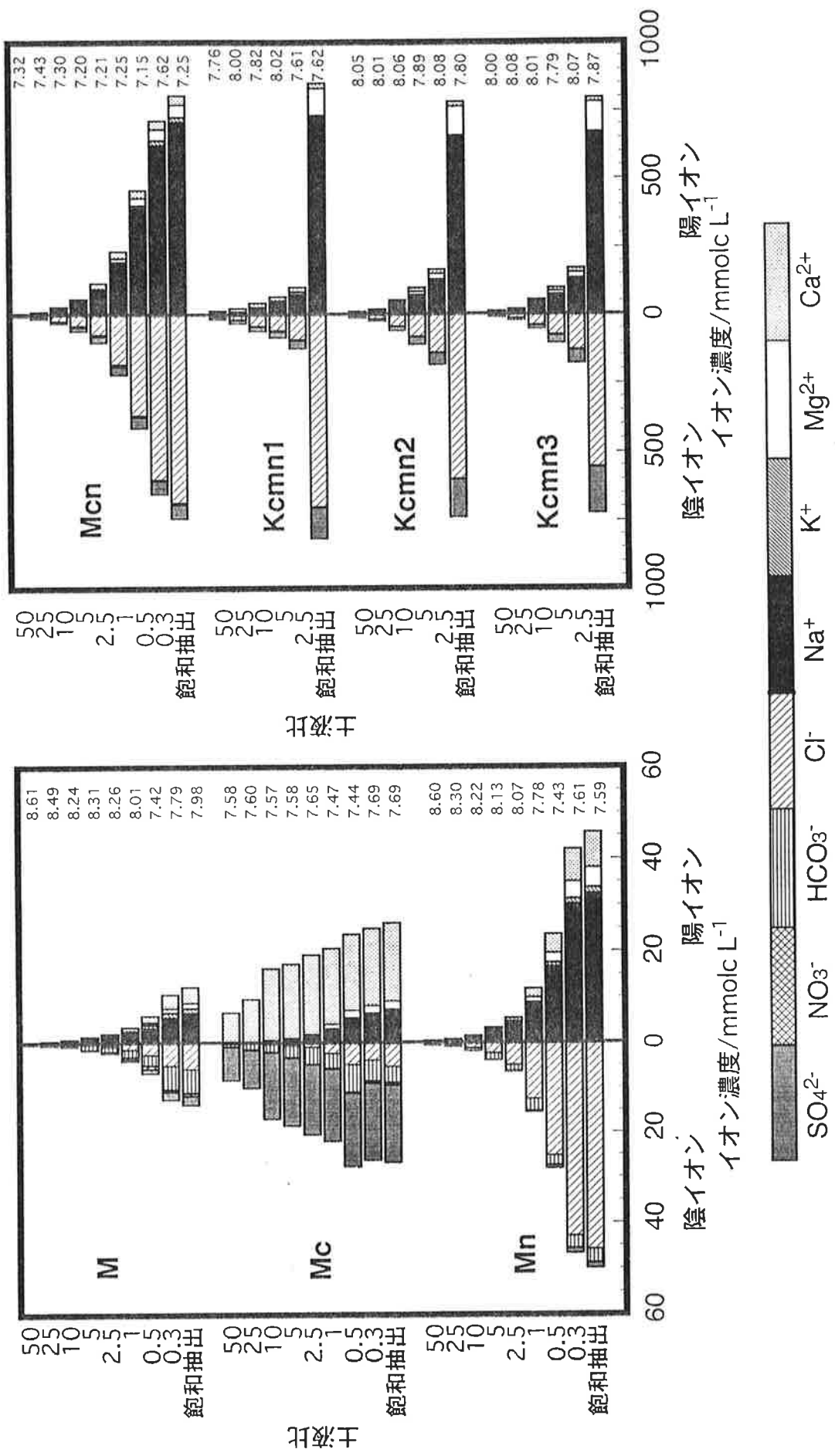
第3-2表 繰り返し計算に組み入れたイオンペア生成反応と生成定数

反応	$\log K^{\circ}$	引用文献
$\text{Na}^+ + \text{Cl}^- = \text{NaCl}^0$	-0.48	Absharah and Zughul(1990)
$\text{Na}^+ + \text{HCO}_3^- = \text{NaHCO}_3^0$	-0.25	Garrels and Thompson(1962)
$\text{Na}^+ + \text{CO}_3^{2-} = \text{NaCO}_3^-$	1.27	Garrels and Thompson(1962)
$2\text{Na}^+ + \text{CO}_3^{2-} = \text{Na}_2\text{CO}_3^0$	0.67	Garrels and Christ(1965)
$\text{Na}^+ + \text{SO}_4^{2-} = \text{NaSO}_4^{2-}$	0.70	Lindsay(1979)
$2\text{Na}^+ + \text{SO}_4^{2-} = \text{Na}_2\text{SO}_4^0$	0.40	Absharah and Zughul(1990)
$\text{K}^+ + \text{Cl}^- = \text{KCl}^0$	-1.59	Hanna et al.(1971)
$\text{K}^+ + \text{SO}_4^{2-} = \text{KSO}_4^{2-}$	0.96	Garrels and Thompson(1962)
$\text{Mg}^{2+} + \text{H}_2\text{O} = \text{MgOH}^+ + \text{H}^+$	-11.45	Lindsay(1979)
$\text{Mg}^{2+} + \text{Cl}^- = \text{MgCl}^+$	0.42	Sposito et al.(1983)
$\text{Mg}^{2+} + \text{HCO}_3^- = \text{MgHCO}_3^+$	1.16	Garrels and Thompson(1962)
$\text{Mg}^{2+} + \text{CO}_3^{2-} = \text{MgCO}_3^0$	3.40	Garrels and Thompson(1962)
$\text{Mg}^{2+} + \text{SO}_4^{2-} = \text{MgSO}_4^0$	2.36	Garrels and Thompson(1962)
$\text{Ca}^{2+} + \text{H}_2\text{O} = \text{CaOH}^+ + \text{H}^+$	-12.70	Lindsay(1979)
$\text{Ca}^{2+} + \text{Cl}^- = \text{CaCl}^+$	0.42	Sposito et al.(1983)
$\text{Ca}^{2+} + \text{NO}_3^- = \text{CaNO}_3^+$	0.70	Smith and Martell(1976)
$\text{Ca}^{2+} + \text{HCO}_3^- = \text{CaHCO}_3^+$	1.26	Garrels and Thompson(1962)
$\text{Ca}^{2+} + \text{CO}_3^{2-} = \text{CaCO}_3^0$	3.20	Smith and Martell(1976)
$\text{Ca}^{2+} + \text{SO}_4^{2-} = \text{CaSO}_4^0$	2.31	Bell and George(1953)
$\text{H}_2\text{O} = \text{H}^+ + \text{OH}^-$	-14.00	Novazamsky and Beek(1976)



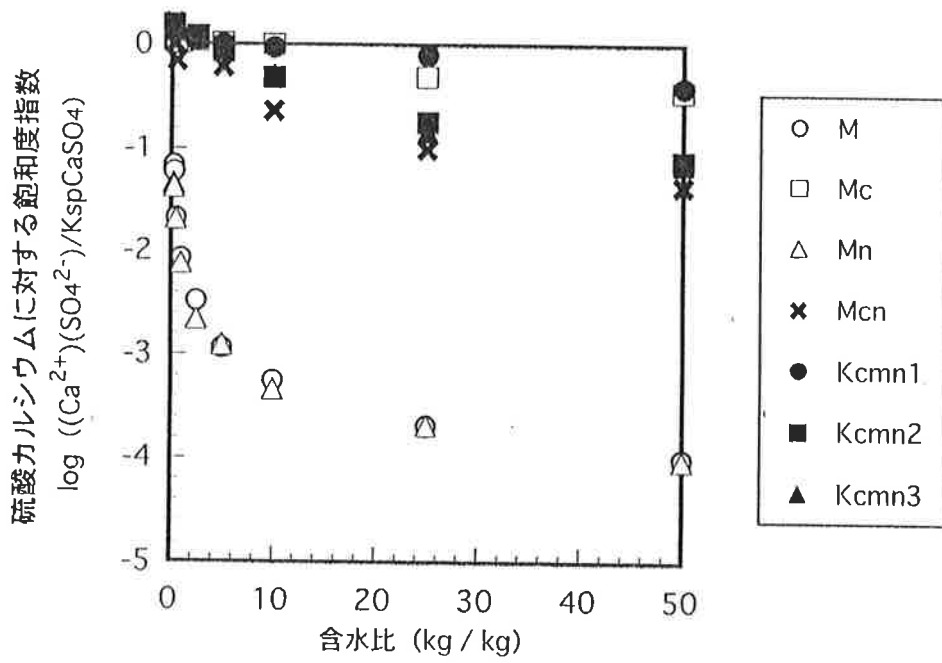


第3-2図 各土壌の水分条件によるECの変化



第3-3図 土壌水抽出溶液のイオン濃度

土液比；飽和抽出=飽和抽出法，0.3=1：0.3，0.5=1：0.5，.....，50=1：50  
 右端の数値は土壌水抽出溶液中のpH

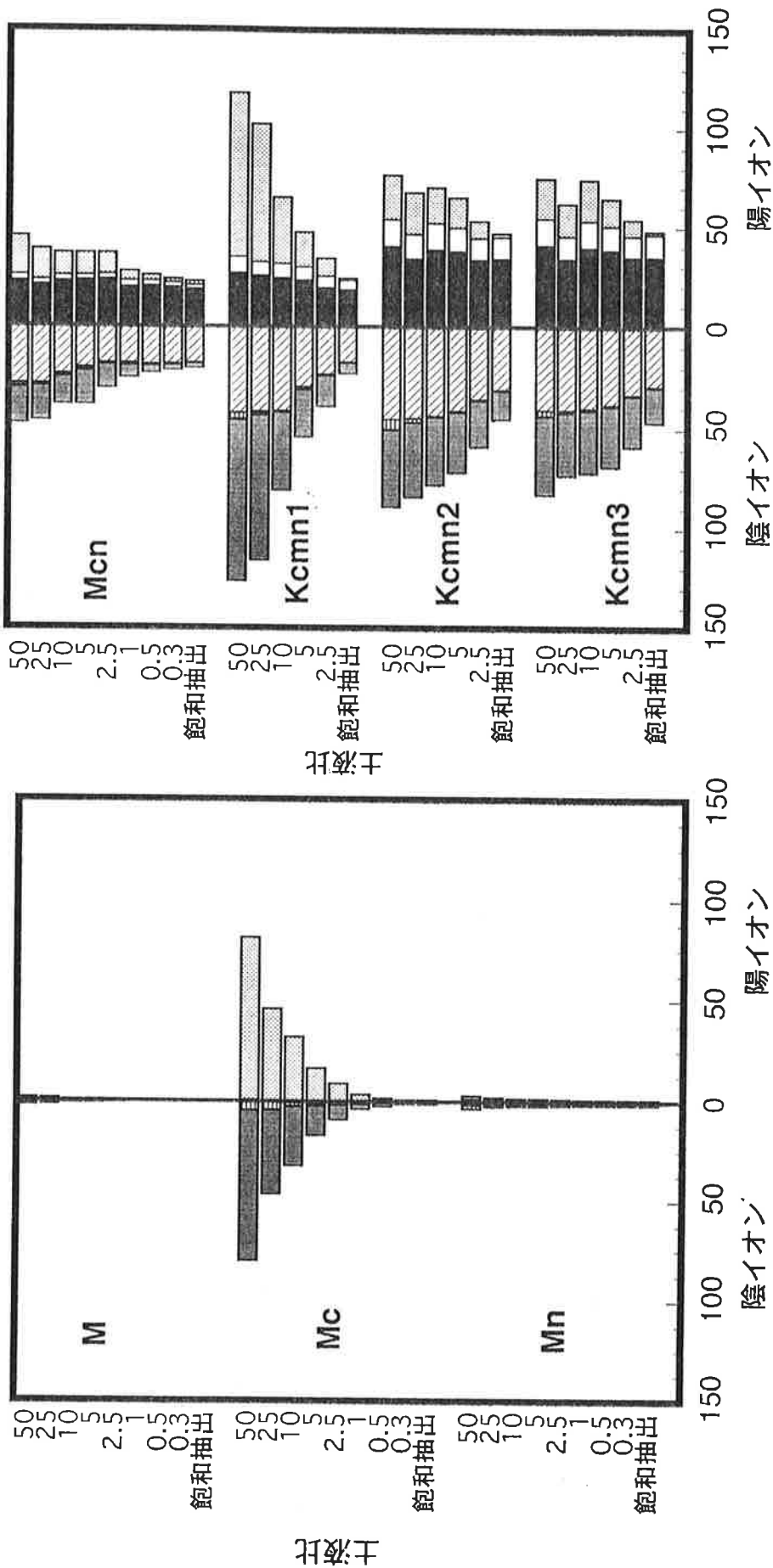


第3-4図 土壌含水比と硫酸カルシウムの飽和指数

ン濃度の増加を制限する要因として、土壤中に硫酸カルシウム等の多量の難溶性塩類の存在が考えられた。多量の難溶性塩類を含む土壤ほど、水添加量の減少に伴うイオン濃度の増加傾向は、比較的抑えられると考えられた。すなわち、水添加量が少なくなるほど、難溶性塩類の溶解量が低下するため、土壤水抽出溶液中のイオン濃度は、土壤に対する水添加量の減少に伴い、単純な増加傾向を示さないと考えられた。

乾燥地土壤中には溶解度の異なる塩類が共存しており、その溶解特性は集積塩類の量、組成によって異なる。また、その差異によって各塩類の沈澱生成する水分量がそれぞれ異なると考えられた。そして、それはそれぞれの塩類の溶解度によって支配されている。そのことにより、水分量の低下とともに易溶性塩類の濃度は増加されるが、ある一定の水分量になると難溶性塩類は沈澱を生成し、溶解量が頭打ちになると考えられた。

水添加量と乾土あたりの溶存イオン量の関係を第3-5図に示した。すべての試料で水添加量が多くなるほど、乾土あたりの溶存イオン量は増加した。しかし、土壤試料によって、水添加量の増加に伴う溶存イオン量の増加傾向に著しい差異がみられた。土壤により集積塩類の量および組成が異なっていることを反映していた。特に、Mc中には多量の硫酸カルシウムが含まれているため、水添加量の増加とともに $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ の溶存イオン量に著しい増加がみられた。難溶性塩類を多量に含む土壤ほど、その傾向が著しいと考えられた。水分量が少ない時には溶解されない難溶性塩類が、水分量の増加に伴い溶解される事を示唆していた。一方、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Cl}^-$ の溶存イオン量は水添加量に関わらずほぼ同量のイオン量が溶解されていた。易溶性塩類は、水分量の多少に関わらず、添加した水分量に相当するイオン量が溶解される事を示唆していた。つまり、土壤中に難溶性塩類を多量に含むほど、水添加量の増加とともに乾土あたりの溶存イオン量が著しく増加すると考えられた。乾燥地土壤中には溶解度の異なる塩類が土壤中に共存しているため、各土壤によって水添加量の増加に伴う乾土あたりの溶存イオン量の増加傾向は異なることを示唆していた。水分条件の変化に伴う乾土あたりの溶存イオン量の変化において、塩化ナトリウム等の易溶性塩類は、集積量に関わらずほぼ一定であるのに対し、硫酸カルシウム等の難溶性塩類は、その溶解度及び集積量によって大きく異なると考えられた。したがって、水添加量の増加に伴う溶存イオン量の変化は、沈澱している難溶性塩類の量に大きく左右され、水添加量を増加しても、難溶性塩類が全て溶解されるまで、溶存イオン量は増加し続けると考えられた。土壤中の塩類の存在が、水分条件の変化に伴う溶質組成変化の要因の一つであることを示



第3-5図 乾土あたりの溶存イオン量 / cmolc kg<sup>-1</sup>

第3-5図 乾土あたりの溶存イオン量

土液比 ; 飽和抽出=飽和抽出法, 0.3=1 : 0.3, 0.5=1 : 0.5; ·····, 50=1 : 50

唆するものである。

水の添加量と水抽出液中のナトリウム吸着比 (SAR) の関係を第3-6図に示した。

理論的に考えると、土壤溶液がX倍濃縮されるとSARは $X^{1/2}$ 倍濃縮される。しかし、そのような単純な関係はみられなかった。水の添加量が減少することによって土壤溶液が濃縮され、塩類濃度が高くなると、理論値よりも急速にSARが増加した。土壤中に難溶性のCa塩、Mg塩と易溶性のNa塩を共存しており、水添加量の減少につれて難溶性塩類の溶解量が低下したことを反映していた。また、このことは、塩類化過程と同時にソーダ質化も進行することを示唆していた。

### 3.3.2. 土液比の変化に伴う塩類の存在形態の変化とその機構

前節までは、土壤中の水分量の変化に伴うイオンの溶解特性を述べてきたが、乾燥によって土壤中の水分量が低下する時、土壤中の難溶性塩類の沈澱生成を考えなければならない。それらを考察する上で、分析結果より得られた測定値はイオン濃度が非常に高く、濃度と活量の差や、イオン対生成を考慮する必要があること推察された。

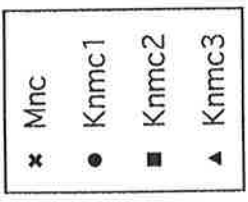
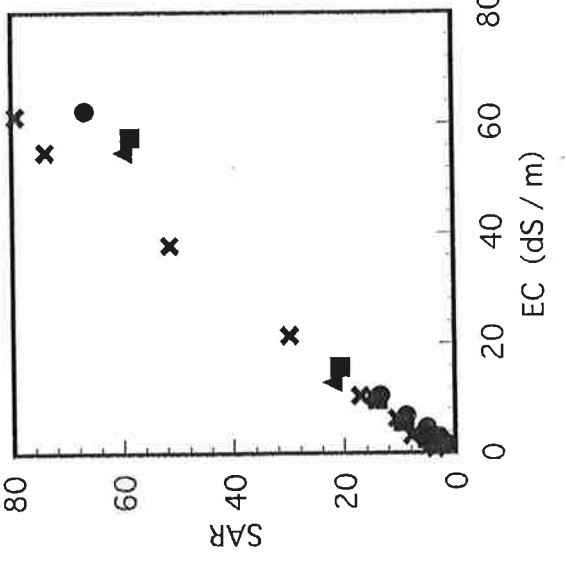
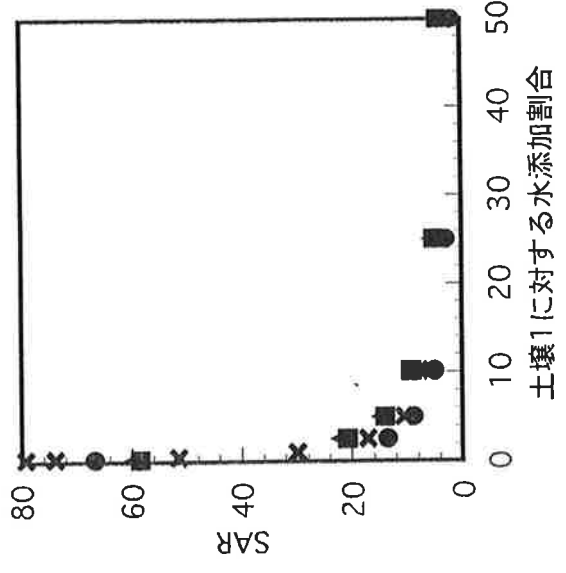
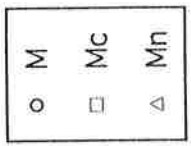
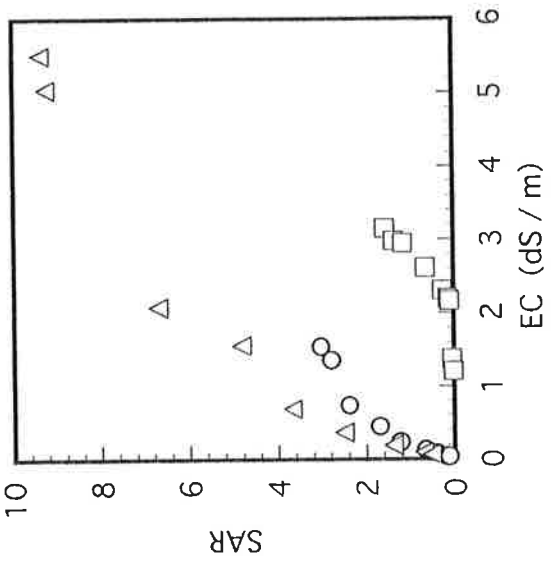
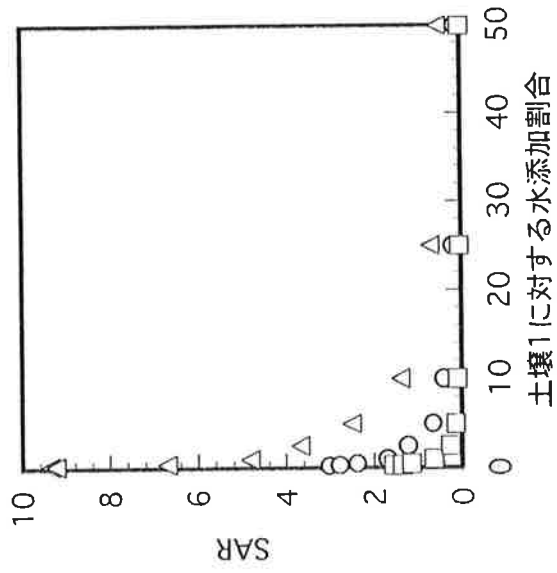
そこで、繰り返し計算法 (Adams, 1971) を応用することにより、水抽出溶液中での各イオンの存在形態について解析を行った。

各土壤の土液比に伴う活量係数の変化を第3-7図に示した。塩類を多量に含んでいる土壤では、水添加量が少ない時、 $\text{Na}^+$ や $\text{Cl}^-$ 等の一価イオンの活量係数がやや低くなった。しかし、各土壤とも水添加量に関わらずほぼ解離したイオン形態であった。一方、二価イオンの活量係数は低く推移し、解離したイオン形態は非常に少なかった。特に多量の塩類を含んでいる土壤ではその傾向が顕著であった。また、その傾向は水添加量が少なくなるほど顕著であった。

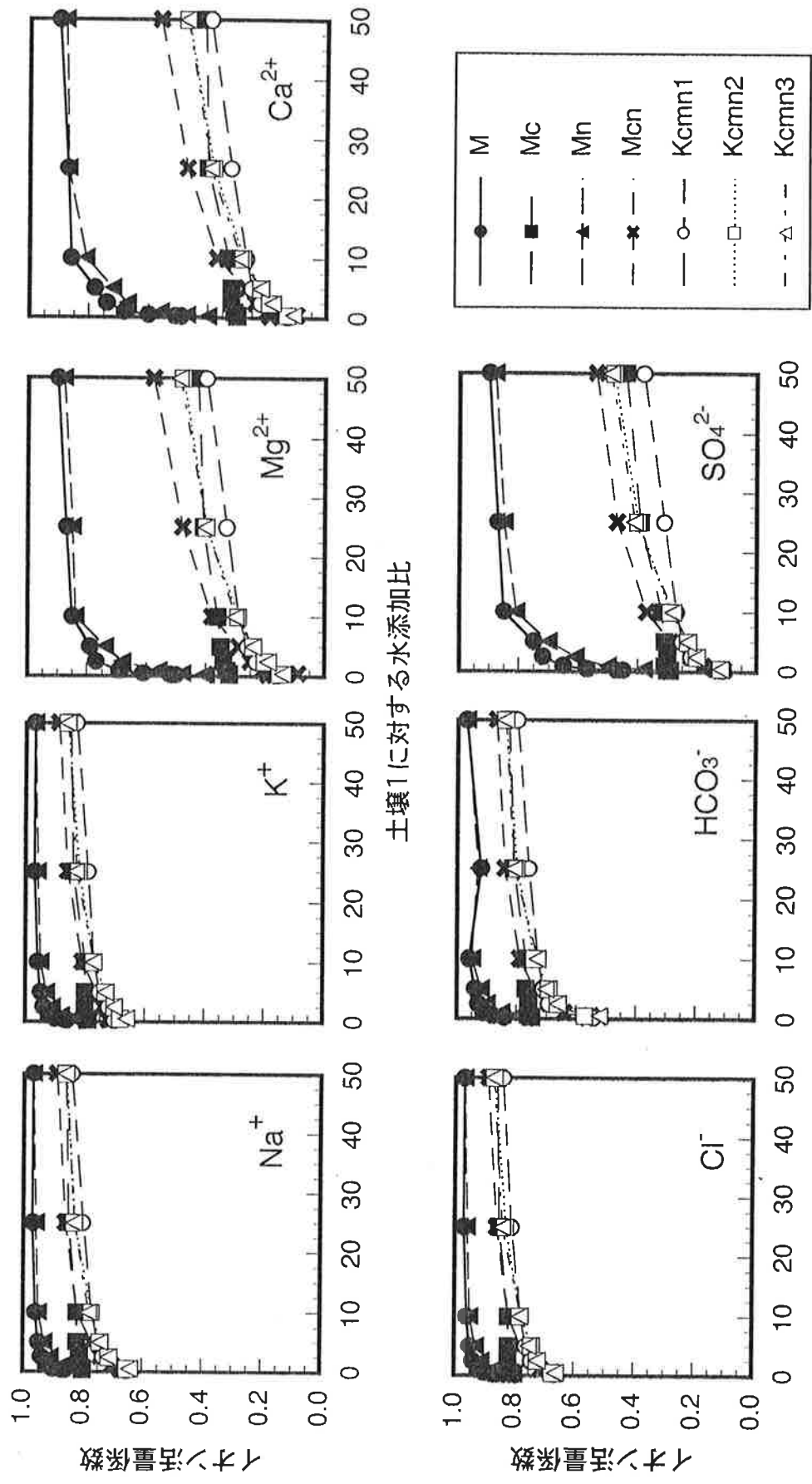
塩類濃度と活量係数の関係を第3-8図に示した。塩類濃度が高くなると、一価イオンの活量係数は約0.7で若干低くなったが、二価イオンに比較して高く推移しており、解離イオン形態で多く存在していた。一方、二価イオンの活量係数は塩類濃度の上昇に伴い急激に低下し、約0.2で推移し、解離イオン形態は大幅に減少した。

第3-9図に各土壤中の抽出溶液中に占めるイオン対の生成割合を示した。また、第3-10-1図にM, Mn, Mc, Mcn, 第3-10-2図にKcmn1, Kcmn2, Kcmn3の土液比の変化に伴う塩類の存在形態を示した。

イオン対生成割合は土壤中の集積塩類量に関係なく、集積塩類組成に関与しており、土壤溶液中のイオン種およびイオン対生成定数によって決定されると考えられた。硫酸カルシウムや硫酸マグネシウム等の比較的難溶性塩類を主体とする土壤は、土壤に



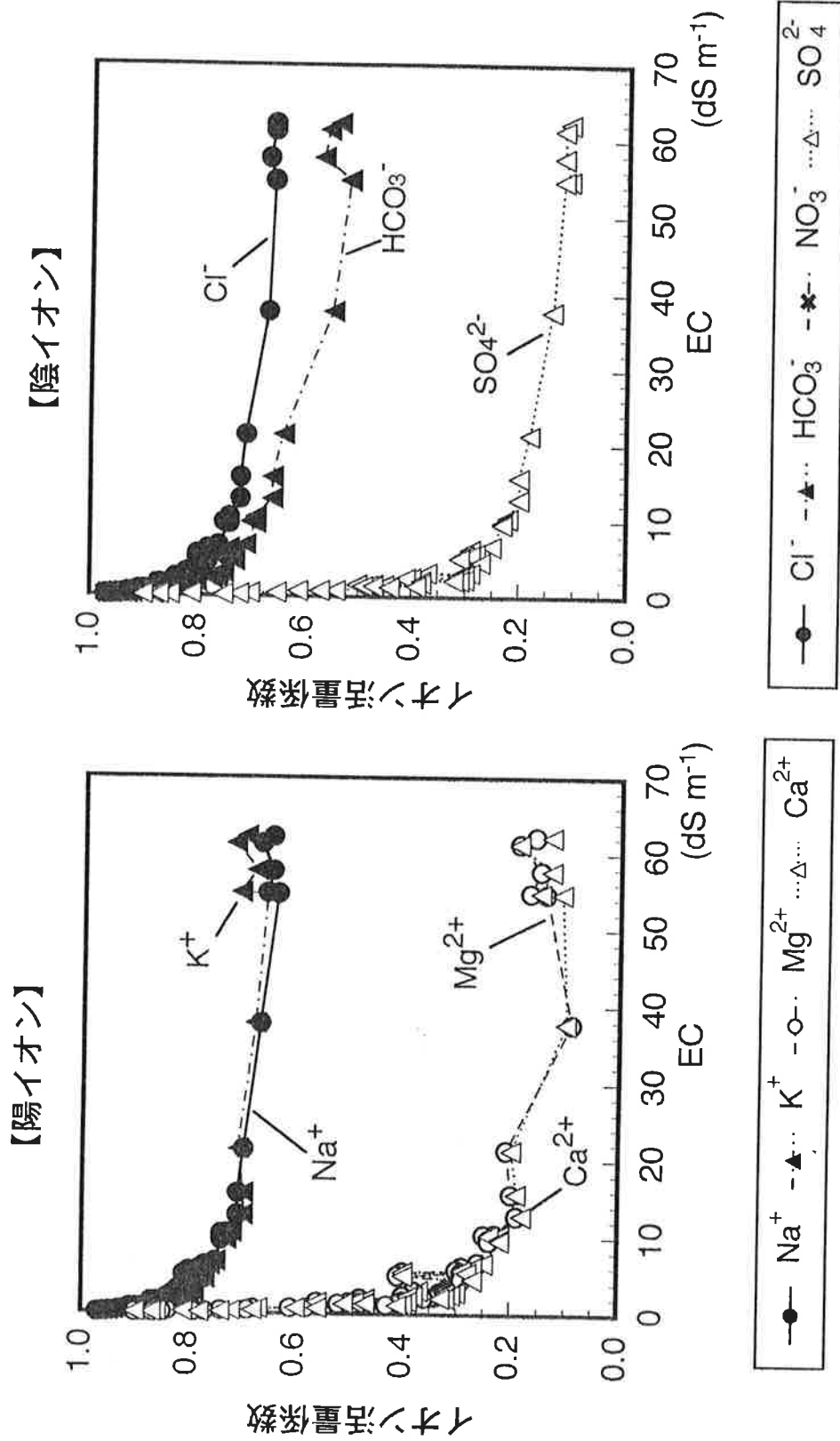
第3-6図 土液比-SARおよびEC-SARの関係



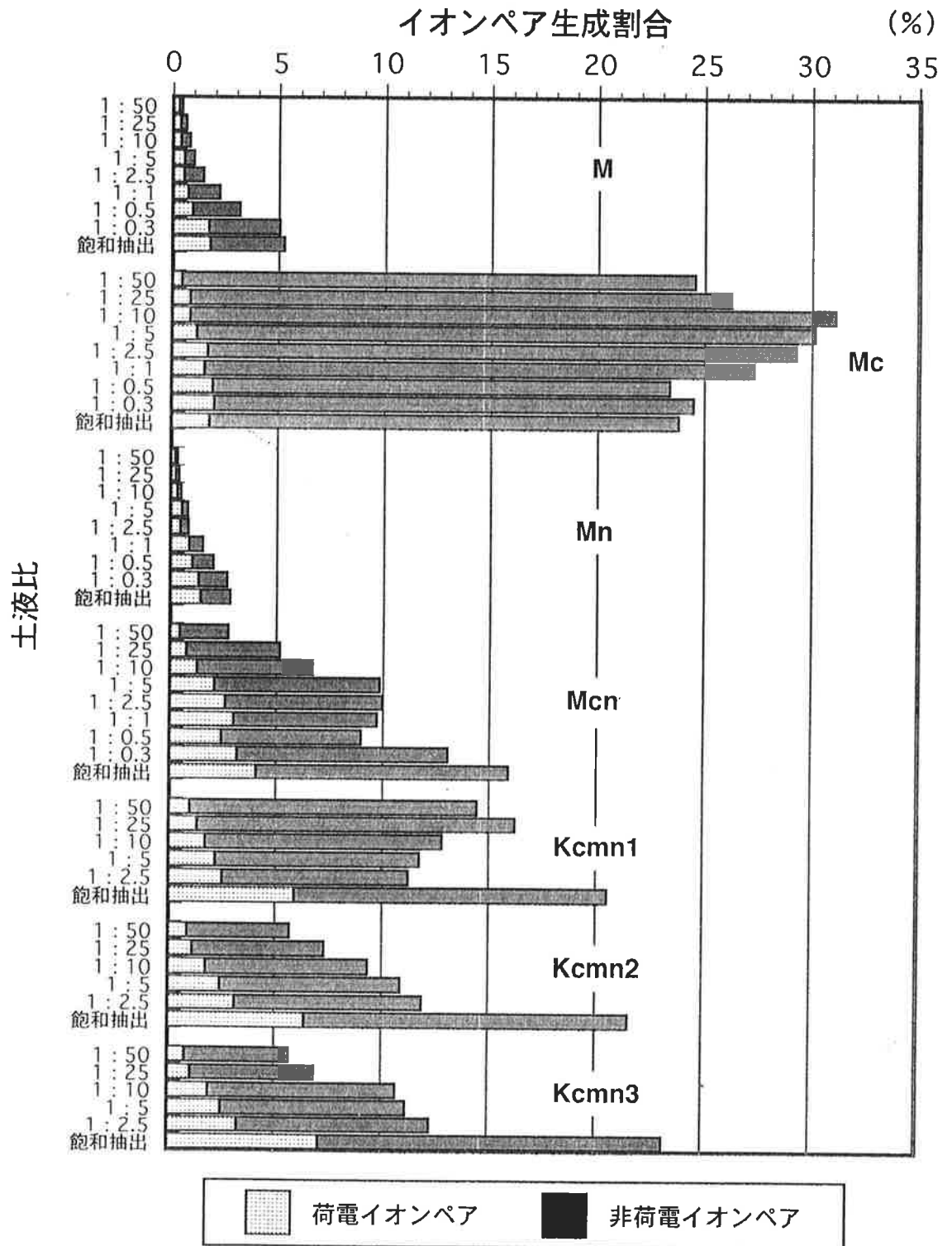
土壌1に対する水添加比

第3-7図 各土壌の水添加比に伴う活量係数の変化

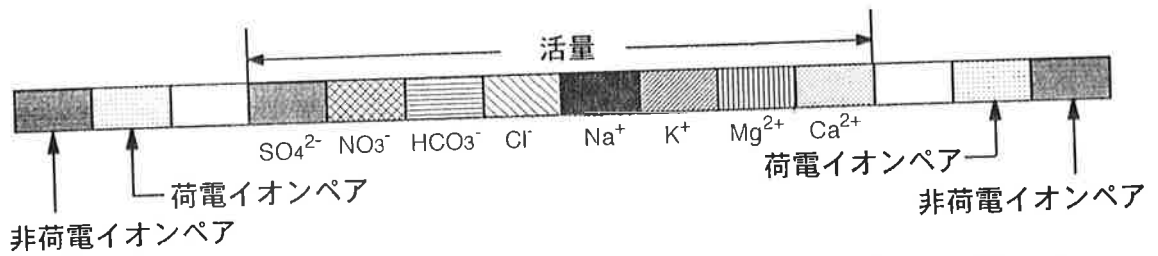
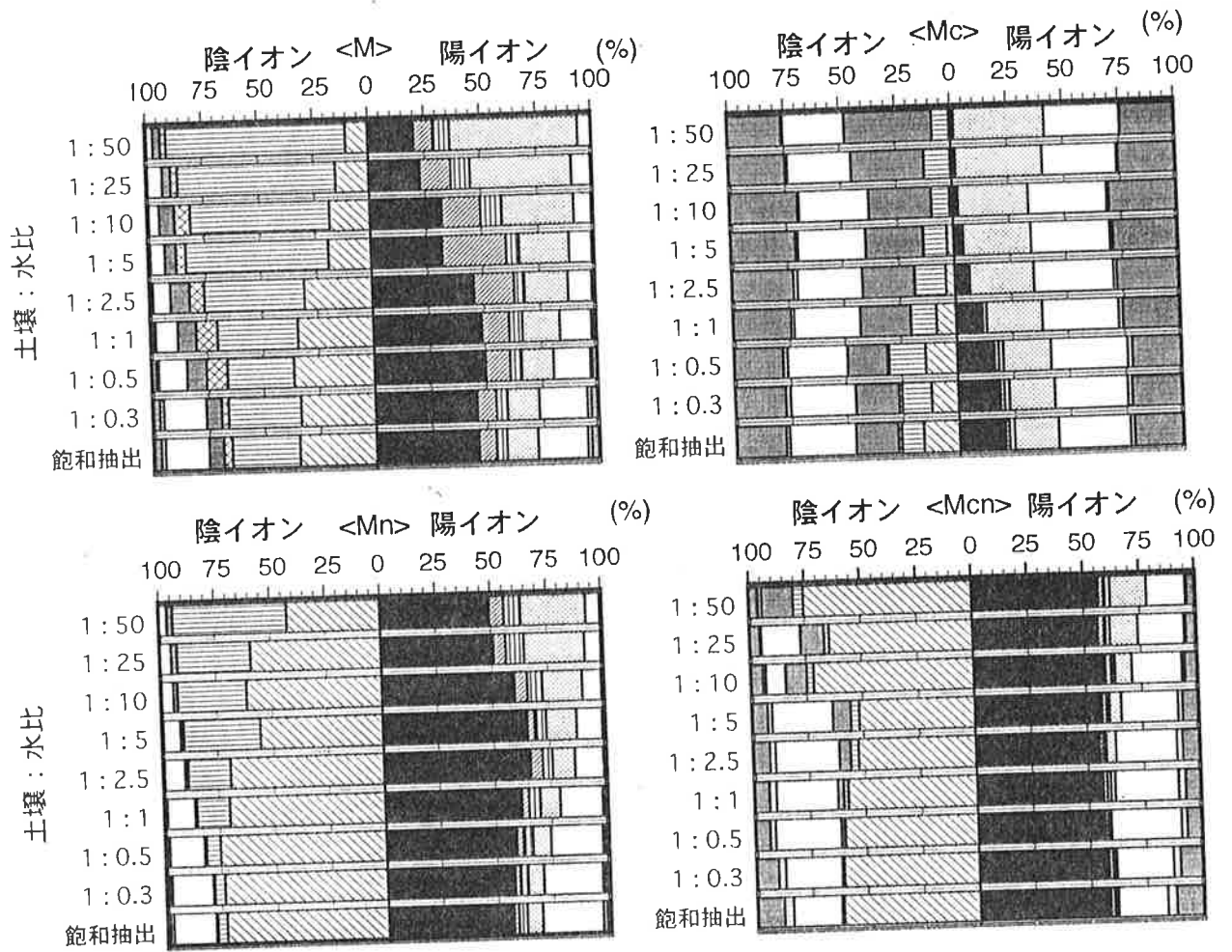




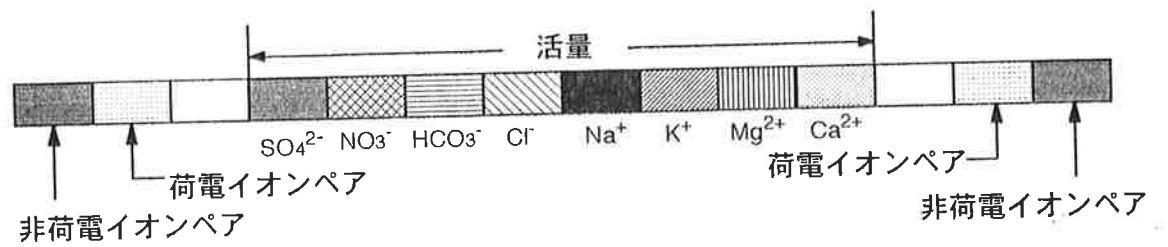
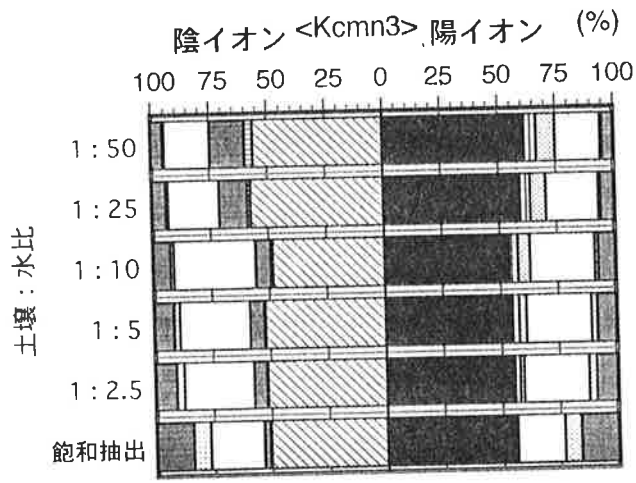
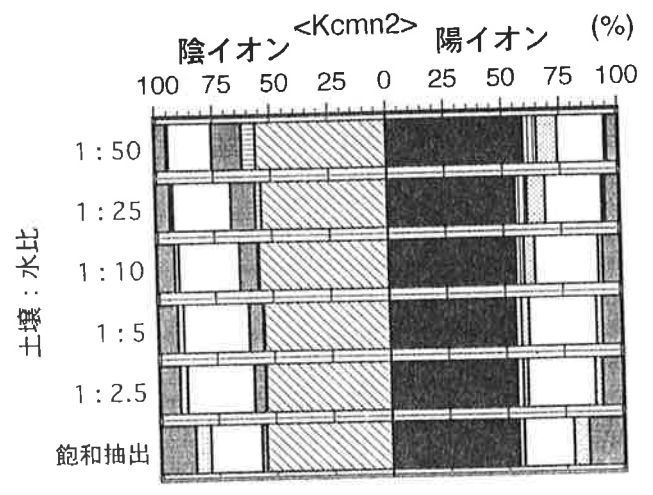
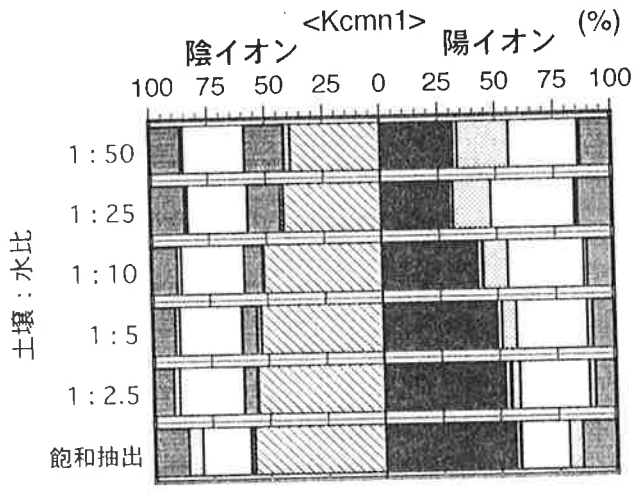
第3-8図 土壤水抽出溶液中のECと活量係数の関係



第3-9図 各土壤水抽出溶液中に占めるイオンペア生成割合



第3-10-1図 水添加量と水抽出液中の塩類の存在形態 (メキシコ)



第3-10-2図 水添加量と水抽出液中の塩類の存在形態 (カザフスタン)

添加する水の量が少ないほど、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ の形成するイオン対割合が高くなった。特に、非荷電イオン対 ( $\text{CaSO}_4^0$ 、 $\text{MgSO}_4^0$ ) の占める割合が高くなっていた。 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 等が各種のイオン対を形成する結果、それらの解離イオンが低濃度に抑えられたと考えられた。さらに塩化ナトリウム等の易溶性塩類を多量に共存する土壌では、水添加量の増減に関わらず、解離している $\text{Na}^+$ や $\text{Cl}^-$ の割合はほぼ一定で、溶液中の存在割合は高かった。しかし、イオン対生成割合は非常にわずかであった。しかし、水添加量の減少に伴いイオン対生成割合は増加し、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 等の形成するイオン対が増加した。これは、高濃度の水抽出液中に各種塩類が共存して、各イオンの活量係数が低下することに起因すると考えられた。 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ が各種のイオン対を形成する結果、それらの解離イオンが低濃度に抑えられ、 $\text{CaSO}_4^0$ 、 $\text{MgSO}_4^0$ 等の非荷電のイオン対が支配的となったと考えられた。

またM、Mnは、土液比の増加とともに $\text{HCO}_3^-$ の割合が増加した、土壌中には炭酸ナトリウム、重炭酸ナトリウムとして含まれていた塩が、水添加量の増加に伴い溶出され、土壌溶液中で支配的になった結果といえる。それに伴い、炭酸ナトリウム、重炭酸ナトリウムが加水分解され、pHが増加した(第3-3図)と考えられた。一方、Mcは土壌溶液中に $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ が占めており、 $\text{HCO}_3^-$ の割合はほぼ一定して少ないため、pHの増加傾向は示さなかった。

### 3.3.3. 土壌水抽出溶液中のEC値に対する塩類の存在形態の影響

各イオンの存在形態が塩類濃度の指標であるEC値に及ぼす影響を検討した。

溶液中のイオン荷電量の多くが水溶性塩類の解離による無機イオンに由来すると考えられ、土壌溶液のECはイオン活量の合計値と直線的な関係にあることが報告されている (Willard *et al.*, 1979 ; 水野, 1984) 。そこで、土壌水抽出液中のECを各イオンの活量と極限モル電導率の積の合計値として、Mcneal *et al.* (1970) および亀和田 (1991) の方法に準じて、次の式により求めた。

$$\kappa = \sum a_i \lambda_i$$

ここで、 $\kappa$ は計算された溶液のEC、 $a_i$ はイオンまたはイオン対 $i$ の活量、また、 $\lambda_i$ はイオンまたはイオン対 $i$ の極限モル電導率を表す。無機イオンの極限モル電導率の値は第3-3表に示した。イオン対のうち荷電している種の極限モル電導率の値は明らかでなかったため、荷電に寄与しているイオンの値を用いた。

土壌ECの測定値はイオン濃度よりもイオン活量が影響を及ぼしていると考えられて

第3-3表 水溶液中のイオンの極限モル電導率 (25°C)

電導率		電導率	
イオン	(S cm <sup>2</sup> mol <sup>-1</sup> )	イオン	(S cm <sup>2</sup> mol <sup>-1</sup> )
H <sup>+</sup>	349.8	OH <sup>-</sup>	198.3
(1/2)Ca <sup>2+</sup>	59.5	(1/2)SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	80.0
(1/2)Mg <sup>2+</sup>	53.1	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	71.5
K <sup>+</sup>	73.5	Cl <sup>-</sup>	76.4
Na <sup>+</sup>	50.1	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	44.5
		(1/2)CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	72.0

(日本化学会編, 1984)

いるが、第3-11図に本研究で得られた土壤水抽出液中のECとイオン強度 (I) の関係、第3-12図にECの測定値と活量によって算出された計算値の関係を示した。ECとIの間には以下の式が成立した。

$$I = 0.0126 \text{ EC} + 0.0096 \quad r=0.992$$

ECとIには正の相関がみられた。また、土壤水抽出液中のECの測定値と計算値の間は、ほぼ直線的な関係にあり、電荷量の多くの部分が水溶性塩類の解離による無機イオンに由来していると考えられた。

以上の事からも、易溶性塩類が土壤中に多量に含んでおり、土壤溶液中で解離イオンの生成が多くなるほど、土壤溶液のEC値に及ぼす影響が増加すると考えられた。

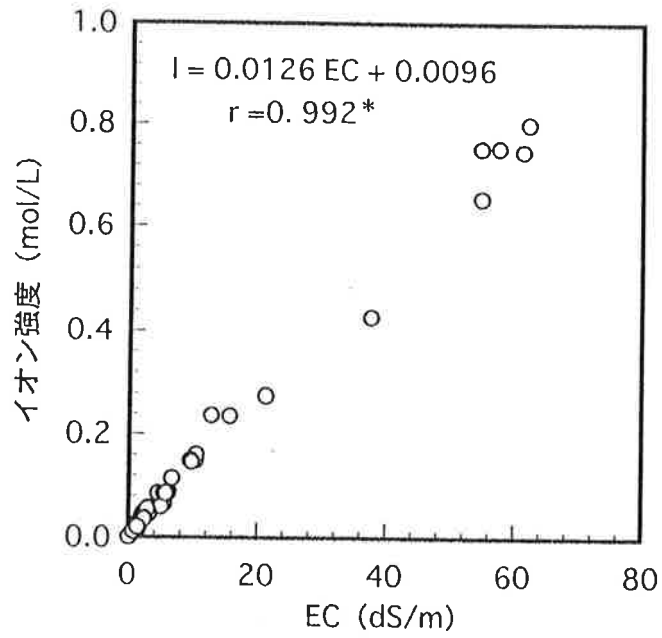
### 3.4. 要 約

本章では、乾燥地土壤に対する水分条件の違いと塩類集積量および塩類組成の関係を明確にするために、集積塩類の量と組成の異なる土壤に対する添加する水の量を変え、塩類の溶解特性および土壤溶液中の存在形態を解析した。

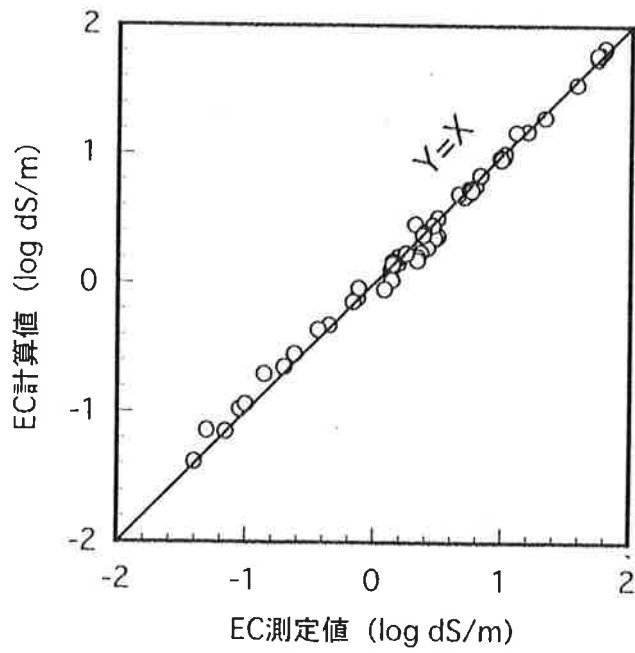
土壤中の水分条件によって、塩類の溶解特性が大きく異なっていた。これは、灌漑に伴う塩類の動態および塩類の集積量と組成に大きく影響していた。

土壤への水添加量が多くなるほど、乾土あたりの溶存イオン量は増加し、溶液中のイオン濃度は減少したが、それらは単純な反比例関係ではなかった。これは、難溶性塩類の存在に起因しており、各種塩類の溶解度の差異に反映するものであった。また、水添加量が少なくなるにつれて、塩類濃度とともに急速にSARが増加した。このことは、塩類化過程と同時に、急速にソーダ質化も進行することを示唆していた。

さらに、繰り返し計算法を応用し、土壤水抽出溶液中での各イオンの存在形態について解析を行った。土壤溶液のECに及ぼす影響は易溶性塩類を多く含む土壤ほど著しく、それは、解離イオンの量に反映していた。溶液中のEC値は、解離イオンの量に反映しており、易溶性塩類を多量に含む土壤ほど、この傾向が著しかった。Na<sup>+</sup>、Cl<sup>-</sup>等の一価イオンは水分条件に関わらずほぼ解離イオンとして存在していた。つまり、これらのイオンは、溶液の濃度に関わらず、解離していた。一方、比較的難溶性塩類を形成しているCa<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>等の二価イオンは水分量が少なくなるほど、イオン対として多く存在していた。つまり、溶液の濃度が高くなると、解離イオンの割合が低下した。そのことにより、作物への吸収阻害が懸念された。



第3-11図 ECとイオン強度の関係  
\* 1%レベルで有意



第3-12図 土壤水抽出液中のECの測定値と計算値との関係



## 第4章 乾燥地土壌中におけるナトリウム-カルシウム交換・溶解平衡

### —粘土の種類および量に伴う土壌固相/溶液相間の化学平衡—

#### 4.1. はじめに

灌漑水および肥料等の施与によって土壌断面内に塩類が付加されると、土壌溶液中の塩類濃度や組成とともに土壌固相の塩基組成にも変化が生じる (Cho, 1985)。塩類土壌は、通常、集積された塩類を洗脱することによって改良されるが、洗脱効果は土壌の性質や透水性に依存する。しかし、乾燥地の灌漑農地では、適切な排水が行われず、土壌塩類化を助長する例が多い (Shainberg and Letey, 1984)。また、最も易溶性であるナトリウム (Na) 塩が土壌断面内に集積し易いことにより、土壌固相へ  $\text{Na}^+$  が吸着されやすい環境下に置かれる。土壌固相に  $\text{Na}^+$  が吸着されると、ソーダ質土壌が生成され、土壌は容易に分散する。そのことによって、土壌の著しい硬化・透水性の低下を引き起こす。また、土壌構造が不安定な上に透水性が著しく低くなるため、洗脱による除塩を阻害する。このような土壌のNa障害は、高い土壌溶液濃度とともに農業生産の低下を引き起こす結果となる (Reeve and Bower, 1960)。また、地表近くに形成されたソーダ質土壌は侵食を促進する要因にもなる。

土壌固相に吸着されている交換性陽イオンの量・組成は、土壌溶液中の可溶性陽イオンの量・組成に大きく依存している。そのことから、土壌溶液中のナトリウム吸着比 (SAR) は、土壌固相の交換性ナトリウム率 (ESP) の評価として簡単に得られるため、乾燥地土壌のNa障害の間接的な指標として利用されている (US Salinity Laboratory Staff, 1954)。ESPは交換平衡式に基づくESR-SAR関係式を確立することによって予測される (Paliwal and Gandhi, 1976; Jurinak *et al.*, 1984; Curtin *et al.*, 1995)。しかし、この関係を用いる時、土壌の性質や土壌溶液中の塩類の量・組成によって交換平衡定数が大きく変わるという問題点がある (Sinanuwong and El Swaify, 1974; Miller *et al.*, 1990)。そのことから現在でも、乾燥地土壌に適用する陽イオン交換モデルの確立はされていない。

本章では、土壌塩類化・アルカリ化過程における土壌固相/溶液相間の化学平衡を考慮して論じることを目的として、二種類の粘土鉱物 (モンモリロナイト, イライト) を用いて、ESR-SAR関係式の確立を試みると同時に、乾燥地土壌の陽イオン交換特性について検討した。

## 4.2. 理論

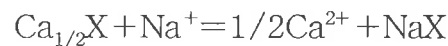
### 4.2.1. イオン交換平衡反応 (Gapon, 1984 ; Bohn *et al.*, 1985)

土壌中のイオン交換平衡反応は土壌溶液中の解離イオンと交換複合体間で行われる。吸着されたイオンの一部は表面から解離し、土壌コロイドの周囲にイオン雰囲気を形成しており、他のイオンとほとんど任意の割合で容易に交換される。

一般に、乾燥地における土壌中の塩類動態を調査・予測する際に、イオン交換平衡式としてGapon交換平衡式が経験的によく用いられている。

Gaponは、交換基によって吸着される液体の量は、その液体によって占められる表面積に比例し、同様なことはイオン交換過程にも成立し、イオン交換容量が先の表面積に対応するとした。これに基づいて、交換相中でイオンはその価数と交換体の電荷量に応じて当量関係で支配され、溶液相ではその数（モル数）によって支配されるとした。

Na-Caにおけるイオン交換反応式は以下の式で表される。



この反応は土壌固相と土壌液相間の反応で、平衡状態に達した時には以下の関係が成立する。

$$\frac{[\text{NaX}]}{[\text{Ca}_{1/2}\text{X}]} = K_G \times \frac{[\text{Na}^+]}{[\text{Ca}^{2+}]^{1/2}}$$

ここで、 $K_G$ はガボン選択係数、液相中の  $[\text{Na}^+]$   $[\text{Ca}^{2+}]$  は当量濃度 ( $\text{mmolc L}^{-1}$ )、 $[\text{NaX}]$   $[\text{Ca}_{1/2}\text{X}]$  は乾土重量あたりの吸着当量 ( $\text{cmolc kg}^{-1}$ ) である。

一般に、土壌溶液に溶存する一価陽イオン ( $\text{Na}^+$ )、二価陽イオン ( $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ) の濃度とこれらのイオンの土壌固相への吸着量の間には、前者をSAR、後者をESPで表した場合、以下のような経験式で表されるイオン吸着交換平衡反応が成立する。

$$\text{ESR} = \frac{\text{NaX}}{\text{CaX} + \text{MgX}} = \frac{\text{NaX}}{\text{CEC} - \text{NaX}} = \frac{\text{ESP}}{100 - \text{ESP}} = K_G \times \frac{[\text{Na}^+]}{[(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/2]^{1/2}} = K_G \times \text{SAR} + C$$

ここでESRは交換性ナトリウム比、SARはナトリウム吸着比、ESPは交換性ナトリウ

ム率, CECは陽イオン交換容量,  $K_G$ はGapon選択係数, Cは補数を示す.

SAR, ESPは以下によって定義される.

$$SAR = \frac{[Na^+]}{|(Ca^{2+} + Mg^{2+})/2|^{1/2}}$$
$$ESP(\%) = \frac{[NaX]}{CEC} \times 100 = \frac{100ESR}{(1+ESR)}$$

[ ] は当量濃度 (mmolc L<sup>-1</sup>)を示す.

アメリカ合衆国塩類研究所では, 塩類土壌における灌漑計画の諸元算出のため, アメリカ合衆国西部の土壌試料を用いて以下の式を導いた.

$$ESR = -0.126 + 0.01475 SAR$$

しかし, これまで報告されている $K_G$ は, 0.005以下 (Jurinak *et al.*, 1984) から 0.03以上 (Sinanuwong and El-Swaify, 1974 ; Miller *et al.*, 1990) と, 研究者によって見解が異なっており, それらは現在でも一致した見解を示していない.

#### 4.2.2. 拡散電気二重層 (岩田ら, 1997)

水中で正または負に帯電したコロイド粒子の表面近くには, 反対符号のイオンが対イオンとして溶液内部から引き寄せられ, 電気二重層が形成される. 粘土表面も電荷を持つため, 静電気力により粘土の電荷と反対符号の電荷 (対イオン) を表面近傍に引きつけ, 同符号の電荷 (副イオン) を近傍から排除する. イオンは, 熱運動による拡散力で均一に広がろうとすることから, GouyとChapmanは, 二重層を形成しようとする静電力とイオン分布を均一にしようとする熱運動の釣り合いの考え方を提唱した. さらに, 熱運動に比べて対イオンの吸着力が強いときには, 表面に吸着層が形成されることから, Sternは帯電表面へのイオンの吸着を単分子層 (スターン層) と仮定し, スターン層につづいて, 溶液内部に向かってGouy-Chapmanの拡散二重層が形成されているとした. すなわちスターン層の近くでは, 対イオンの過剰と副イオンの不足が見られ, この層より遠ざかるにつれて, 正と負のイオンの電荷が等しくなるような拡散的な性質な分布を示す. 拡散電気二重層モデルでは, 粒子の表面荷電の反対イオン, すなわち対イオンは, 溶液中に広く分布しているため, 固定層の表面からの距

離はまちまちである。その平均的な距離は次式で与えられる。

$$r_D = \frac{1}{eL} \left\{ \frac{eRT}{2I\rho} \right\}^{1/2}$$

ここで $r_D$ はデバイ長、 $e$ はプロトンの電荷 ( $1.6022 \times 10^{-19} \text{ C}$ )、 $L$ はアボガドロ数 ( $6.0221 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ )、 $\epsilon$ は水の誘電率 ( $6.954 \times 10^{-10} \text{ J}^{-1} \text{ C}^2 \text{ m}^{-1}$ )、 $R$ は気体定数 ( $8.3148 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$ )、 $T$ は絶対温度、 $I$ は溶液のイオン強度 ( $\text{mol kg}^{-1}$ )、 $\rho$ は溶媒の密度 ( $\text{kg m}^{-3}$ )を示す。

### 4.3. 分析方法

#### 4.3.1 吸着型粘土試料 (粒径 $\leq 2 \mu\text{m}$ ) の調整

粘土鉱物原鉱として、乾燥地・半乾燥地で膨潤性・分散性の点で農業上大きな問題となっているモンモリロナイト (Shainberg, 1973) と、乾燥地で普遍的に多くみられるイライト (日本砂丘学会編, 2000) を試料とした。

吸着型粘土試料を Shainberg *et al.* (1980) の方法に準じて調整した。モンモリロナイト (山形産) およびイライト (アメリカ合衆国イリノイ産) の粘土原鉱をイオン交換水中に入れ、 $1 \text{ molc L}^{-1}$  水酸化ナトリウム溶液を加えてpHを9~10とし、分散・懸濁液系の形成をした。攪拌して一様な懸濁液とした後、ストークスの法則に基づき、粒径 $\leq 2 \mu\text{m}$ 画分の粘土懸濁液を採取した。採取した粘土懸濁液に、 $1 \text{ molc L}^{-1}$  塩酸を滴下してpHを5.0まで低下させ、分散状態の粘土粒子を凝集・沈殿させた。得られた粘土に、イオン交換水およびエタノールを加え洗浄した。洗浄した粘土懸濁液を遠心分離 (4000rpm, 10min) し、得られた上澄み液に硝酸銀 ( $\text{AgNO}_3$ ) 溶液を滴下したときに塩化物イオン ( $\text{Cl}^-$ ) による塩化銀 ( $\text{AgCl}$ ) の沈殿反応が見られなくなるまで繰り返した。

以上の操作によって得られた塊状粘土を $25^\circ\text{C}$ の通風乾燥機中で約3週間風乾させた後、粉碎して、粒径 $\leq 2 \mu\text{m}$ 画分の粘土鉱物を精製した。得られた粒径 $\leq 2 \mu\text{m}$ 画分の粘土鉱物に、 $1 \text{ molc L}^{-1}$  塩化ナトリウム ( $\text{NaCl}$ ) 溶液を徐々に加えて、懸濁液とした後、十分に攪拌して、 $\text{Na}^+$ を粘土表面に吸着させた。懸濁液を遠心分離 (15,000rpm, 10min) して、遠心管中に粘土を回収していった。塊状粘土に対して、同様の操作を5回繰り返し、Na型粘土とした。また同様に、 $1 \text{ molc L}^{-1}$  塩化カルシウム ( $\text{CaCl}_2$ ) 溶液に

よってCa<sup>2+</sup>を粘土表面に吸着させ、Ca型粘土とした。

得られた単一陽イオン吸着・飽和型粘土にイオン交換水、エタノールを加えて、攪拌・洗浄、遠心分離・回収（15,000rpm, 10min）を行った。

以上の操作を、遠心分離後に得られた上澄み液にAgNO<sub>3</sub>溶液を滴下したときにCl<sup>-</sup>によるAgClの沈殿反応が見られなくなるまで繰り返した。

以上の操作で得られた飽和型粘土は風乾・粉碎して単一陽イオン飽和型粘土鉱物試料として、後の実験に供試した。

#### 4.3.2. 陽イオン交換平衡実験

Na-Ca交換平衡特性をWada and Okamura（1977）の方法に準じて求めた。

遠心管に4.3.1.で得られた各陽イオン吸着型粘土試料（イライト、モンモリロナイト）の粘土含量を変え（石英砂+粘土=1g；粘土含量=5, 15, 25, 45%：乾物重）採取した。同時に、粘土鉱物試料を入れないブランクも用意した。また、参考値として、粘土鉱物試料のみ（0.3g；100%：乾物重）も用意した。

遠心管中に交換平衡溶液（溶液濃度：10, 40mmolc L<sup>-1</sup>）25mlを加え、十分に攪拌し、一様な懸濁液とした。交換平衡溶液は、NaCl, CaCl<sub>2</sub>の当量比を考慮することによってSARを変えて、調整した。25℃の恒温で1時間振とうさせた後、遠心分離（15,000rpm, 10min）を行った。同様の操作を5回繰り返した。3回目には24時間以上静置した（この間、時々転倒攪拌した）。5回目の遠心分離で得られた平衡系における外液（自由溶液）中に溶存する2種の陽イオンの定量を行った。遠心分離で得られた上澄み液の残りの一部のpHを測定し、平衡溶液のpHとした。同時に石英砂のみ（ブランク）で同様の操作を行った溶液のpHも測定し、これらの値を比較することによって交換反応における水素イオン（H<sup>+</sup>）の関与の有無を調べた。

遠心分離後の遠心管全体の質量を測定し、あらかじめ精秤しておいた遠心管の質量との差が、全て遠心分離後に残存している平衡溶液の質量によるものとし、さらに、その液の密度が1.00（g ml<sup>-1</sup>）とし、残存する外液の体積を求めておいた。

その後、遠心管中に1mol L<sup>-1</sup> 酢酸アンモニウム（pH：7.0）溶液25mlを加え、一様な懸濁液とした後、室温において2～3時間振とうを行い、遠心分離（15,000rpm, 10min）し、得られた上澄み液を250mlメスフラスコ中に移した。以上の操作を5回繰り返した後、イオン交換水で250mlに定容した。

得られた浸出液中に溶存するNa<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>濃度の結果から、平衡系の粘土鉱物表面における陽イオンの吸着量を算出した。

以上により、粘土鉱物表面の吸着相と溶液相間の陽イオン交換平衡の定量を行った。

#### 4.4. 結果および考察

##### 4.4.1. 粘土層間中の水分子層の形成

飽和処理を行った各風乾粘土の水分含量を比較すると、Na型、Ca型イライトはそれぞれ5.71、4.59%であるのに対し、Na型、Ca型モンモリロナイトはそれぞれ9.93、15.77%であった。モンモリロナイトはイライトと比較して、水分含量が多かった。

モンモリロナイトは、イライトと比較して膨潤しやすく、イオンが層間に入り込む際に、多くの水分子を伴うことに起因すると考えられた。

また、Ca型モンモリロナイトは層間に数枚の水分子層を有するのに対し、Na型モンモリロナイトは一枚の水分子層しか有さない（須藤，1974）ことに反映しており、Ca型モンモリロナイトの水分含量は、Na型モンモリロナイトと比較して多いと考えられた。すなわち、イオンによって層間に入り込む水分子数の数が異なっているため、Na<sup>+</sup>と比較してCa<sup>2+</sup>に伴って層間に入り込む水分子が多いと考えられた。

##### 4.4.2. 交換・溶解平衡に伴う水素イオンの関与

各系の試料の単位乾物重量あたりのH<sup>+</sup>吸着量は、それぞれのブランク溶液と交換平衡溶液のH<sup>+</sup>量の差により算出した。各系の交換平衡溶液のSARとpHおよびH<sup>+</sup>吸着量を第4-1-1表と第4-1-2表に示した。

Ca-Na交換平衡溶液のpHは、ブランク溶液のpHと比較して高くなっており、土壌固相/溶液相間のイオン交換過程において、粘土鉱物によるH<sup>+</sup>の吸着が生じた。しかし、それぞれのpHの変化および系の溶液量、各粘土試料の重量を考慮し、H<sup>+</sup>吸着量を各系の陽イオン吸着量と比較したとき、H<sup>+</sup>吸着量は非常に小さく、無視できる量であった。このことから、以降、Ca<sup>2+</sup>、Na<sup>+</sup>を交換平衡に関する二成分として扱った。

##### 4.4.3. 交換・溶解平衡に伴う塩化物イオンの関与

交換平衡実験には塩化物を使用したことから、各系内にはCl<sup>-</sup>が非対イオンとして存在している。よって、系内にCaCl<sup>+</sup>のような一価陽イオンとしてふるまう錯体が生成する。それらは交換体に対する親和力も高いため、吸着相中での一価陽イオンとしてふるまう錯体の量も増加する。しかし、巨視的にその平衡系の吸着イオンの当量数を算出するときには吸着されているCa<sup>2+</sup>として扱う結果として算出され、見かけのCEC値がCa<sup>2+</sup>の量とともに増加すると結論付けた報告がある（Bower and Truog, 1940；

第4-1-1表 各系の交換平衡溶液のSARとpH値およびH<sup>+</sup>の吸着量（モンモリロナイト）

10mmolc L <sup>-1</sup>					40mmolc L <sup>-1</sup>				
粘土含量	SAR (mmol L <sup>-1</sup> ) <sup>-1/2</sup>	pH		H <sup>+</sup> 吸着量 (mol Kg <sup>-1</sup> )	粘土含量	SAR (mmol L <sup>-1</sup> ) <sup>-1/2</sup>	pH		H <sup>+</sup> 吸着量 (mol Kg <sup>-1</sup> )
		ブランク	試料				ブランク	試料	
5%	5.21	5.63	6.05	1.82E-04	5%	5.03	6.05	6.09	9.68E-06
	5.27	5.63	5.96	1.55E-04		5.06	6.05	6.12	1.67E-05
	15.37	5.66	5.89	1.13E-04		14.98	5.83	6.05	7.39E-05
	15.45	5.66	5.88	1.11E-04		15.03	5.83	6.02	6.71E-05
	24.45	5.69	5.94	1.09E-04		25.05	5.57	5.88	1.68E-04
	26.81	5.69	5.90	9.66E-05		25.21	5.57	5.75	1.11E-04
	36.54	5.82	6.05	7.86E-05		47.70	5.67	5.97	1.32E-04
	56.91	5.82	6.14	9.99E-05		48.49	5.67	5.89	1.05E-04
15%	5.15	5.63	6.25	2.23E-04	15%	5.05	6.05	6.23	3.87E-05
	5.24	5.63	6.19	2.12E-04		5.12	6.05	6.31	5.03E-05
	14.67	5.66	6.34	2.17E-04		14.92	5.83	6.42	1.38E-04
	22.24	5.69	6.15	1.64E-04		14.97	5.83	6.26	1.16E-04
	22.97	5.66	6.22	1.98E-04		25.45	5.57	6.02	2.14E-04
	26.92	5.82	6.23	1.16E-04		25.67	5.57	5.93	1.85E-04
	43.20	5.69	6.14	1.63E-04		46.64	5.67	6.22	1.91E-04
	80.46	5.82	6.26	1.21E-04		49.12	5.67	6.08	1.63E-04
25%	5.19	5.63	6.38	2.41E-04	25%	5.04	6.05	6.38	5.94E-05
	5.35	5.63	6.33	2.35E-04		5.06	6.05	6.27	4.51E-05
	14.40	5.66	6.36	2.20E-04		14.82	5.83	6.43	1.39E-04
	20.80	5.69	6.33	1.94E-04		15.00	5.83	6.32	1.26E-04
	24.39	5.82	6.34	1.33E-04		25.35	5.57	6.23	2.60E-04
	32.93	5.66	6.34	2.17E-04		25.80	5.57	6.04	2.19E-04
	54.21	5.69	6.29	1.89E-04		44.03	5.67	6.35	2.10E-04
	81.35	5.82	6.33	1.32E-04		51.57	5.67	6.17	1.83E-04
45%	5.15	5.63	6.57	2.59E-04	45%	5.02	6.05	6.32	5.12E-05
	6.68	5.63	6.41	2.45E-04		5.04	6.05	6.44	6.61E-05
	14.15	5.66	6.45	2.30E-04		15.10	5.83	6.49	1.45E-04
	18.26	5.69	6.47	2.10E-04		15.20	5.83	6.37	1.32E-04
	21.06	5.82	6.45	1.46E-04		25.06	5.57	6.27	2.66E-04
	44.22	5.66	6.39	2.23E-04		27.36	5.57	6.09	2.31E-04
	61.16	5.69	6.39	2.02E-04		39.67	5.67	6.52	2.29E-04
	102.09	5.82	6.42	1.42E-04		56.58	5.67	6.29	2.02E-04
100% (参考値)	5.11	5.63	6.48	8.39E-04	100% (参考値)	4.98	6.05	6.37	1.94E-04
	5.39	5.63	6.36	7.94E-04		5.03	6.05	6.3	1.63E-04
	14.56	5.66	6.41	7.52E-04		15.20	5.83	6.33	4.25E-04
	20.11	5.69	6.43	6.88E-04		15.26	5.83	6.53	4.95E-04
	24.32	5.82	6.41	4.71E-04		26.16	5.57	6.35	9.24E-04
	35.82	5.66	6.36	7.31E-04		26.47	5.57	6.15	8.14E-04
	55.09	5.69	6.29	6.30E-04		42.45	5.67	6.48	7.50E-04
	100.23	5.82	6.40	4.67E-04		52.63	5.67	6.30	6.78E-04

第4-1-2表 各系の交換平衡溶液のSARとpH値およびH<sup>+</sup>の吸着量（イライト）

10mmolc L <sup>-1</sup>					40mmolc L <sup>-1</sup>				
粘土含量	SAR (mmol L <sup>-1</sup> ) <sup>-1/2</sup>	pH		H <sup>+</sup> 吸着量 (mol Kg <sup>-1</sup> )	粘土含量	SAR (mmol L <sup>-1</sup> ) <sup>-1/2</sup>	pH		H <sup>+</sup> 吸着量 (mol Kg <sup>-1</sup> )
		ブランク	試料				ブランク	試料	
5%	5.18	5.63	6.01	1.71E-04	5%	5.03	6.05	6.14	2.10E-05
	14.89	5.66	5.98	1.43E-04		14.58	5.83	6.17	1.01E-04
	24.96	5.69	6.07	1.46E-04		26.17	5.57	5.77	1.21E-04
	45.61	5.82	6.02	7.06E-05		49.08	5.67	5.97	1.32E-04
15%	5.08	5.63	6.12	1.98E-04	15%	5.00	6.05	6.23	3.79E-05
	14.98	5.66	6.12	1.79E-04		14.87	5.83	6.30	1.23E-04
	25.11	5.69	6.27	1.86E-04		25.58	5.57	6.01	2.11E-04
	41.24	5.82	6.20	1.11E-04		49.10	5.67	6.16	1.80E-04
25%	5.20	5.63	6.19	2.12E-04	25%	5.05	6.05	6.30	4.89E-05
	15.07	5.66	6.25	2.04E-04		15.25	5.83	6.49	1.45E-04
	25.09	5.69	6.29	1.89E-04		24.94	5.57	6.22	2.58E-04
	38.93	5.82	6.41	1.41E-04		48.79	5.67	6.26	1.98E-04
45%	5.14	5.63	6.36	2.39E-04	45%	4.99	6.05	6.35	5.57E-05
	15.00	5.66	6.32	2.14E-04		15.01	5.83	6.51	1.47E-04
	24.33	5.69	6.52	2.15E-04		25.82	5.57	6.25	2.63E-04
	33.50	5.82	6.56	1.56E-04		48.28	5.67	6.41	2.18E-04
100%	5.11	5.63	6.21	7.20E-04	100%	5.10	6.05	6.38	1.98E-04
(参考値)	14.89	5.66	6.21	6.57E-04	(参考値)	15.19	5.83	6.40	4.52E-04
	24.64	5.69	6.47	7.01E-04		25.30	5.57	6.10	7.80E-04
	40.18	5.82	6.39	4.64E-04		48.64	5.67	6.33	6.93E-04



Babcock *et al.*, 1959) . これに対して, G. Sposito *et al.* (1983) やD.L.Suarez *et al.* (1989) は否定している.

本論文では前者の報告も考慮に入れ, 吸着相のイオン組成の変化に伴う見かけのCEC値の変化の有無を, 吸着量のデータより判断した.

交換平衡実験より算出された各系の吸着量の結果を第4-2-1表~第4-2-4表に示した.

交換性陽イオンは, 粘土表面の負荷電を中和するために吸着されている. したがって, 粘土のCECは, その粘土に固有の不変な定数ではなく, 表面荷電量に伴って変化する. しかし, 交換相中の $\text{Ca}^{2+}$ の当量分率の増加に伴う見かけのCEC値の系統的な変化は認められなかった. すなわち, 交換相中の陽イオンに占める錯体陽イオンはかなり少ないと考えられた. このことから, 算出された交換相中の $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ を単独イオンとして判断した.

#### 4.4.4. 溶液濃度に対する交換・溶解平衡の影響

拡散二重層の厚さは, 溶液相の塩濃度に影響されている. そこで, 粘土の懸濁溶液の安定性を粒子間に働く斥力と引力の相互作用を示すために $r_D$ によって比較した. 各系の交換複合体における $r_D$ を第4-3表に示した.  $r_D$ は高濃度溶液ほど小さく, 低濃度溶液ほど大きかった. 拡散二重層の厚さが高濃度溶液で減少し, 低濃度溶液で増加することを意味している. このことは, 灌漑による塩類動態にも影響を及ぼす. 乾燥地の灌漑において, 一時的にも大量の水が付加され, 土壌溶液が希釈された場合, 拡散二重層は膨張し, 土壌の分散が引き起こされやすくなり, 透水性が悪化する. また, 蒸発散による土壌溶液濃度の上昇によって, 拡散二重層は収縮し, 土壌が凝集し, 緻密層を生成やすくなると考えられた. すなわち, 灌漑水の濃度が低いほど土壌の分散作用は著しいと考えられた.

交換相中の各イオンの吸着比率は, 交換平衡溶液の合計当量濃度によって異なった(第4-2-1表~第4-2-4表). 溶液相中のSARを一定にして考慮すると, 溶液濃度が低濃度である時, ESPは低かった, これは希釈効果によるものと考えられた(日本粘土学会編, 1987) .

#### 4.4.5. ナトリウム吸着比に対する交換・溶解平衡の影響

第4-3表に示すように, SARの増加とともにそれぞれの交換複合体の $r_D$ が大きくなった. SARの増加に伴い, 平衡溶液中の $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ 率が高くなったためといえる. そのことに伴い, 粘土表面への吸着力の強い $\text{Ca}^{2+}$ の割合が $\text{Na}^+$ に比較して減少したため, 拡散二重層の厚さが増加したと考えられた.

第4-2-1表 交換平衡実験結果 (モンモリロナイト : 10mmolc L<sup>-1</sup>)

粘土含量	SAR (mmol L <sup>-1</sup> ) <sup>1/2</sup>	溶液相中の当量比		交換吸着量		CEC	ESP	ESR	K <sub>G</sub>
		RNa (%)	RCa (%)	Na <sup>+</sup> (cmolc kg <sup>-1</sup> )	Ca <sup>2+</sup> (cmolc kg <sup>-1</sup> )				
5%	5.21	0.67	0.33	0.38	3.68	4.06	9.30	0.103	0.0197
	5.27	0.67	0.33	0.39	3.65	4.04	9.72	0.108	0.0204
	15.37	0.93	0.07	1.05	3.38	4.43	23.63	0.309	0.0201
	15.45	0.93	0.07	1.02	3.06	4.07	24.96	0.333	0.0215
	24.45	0.97	0.03	1.51	3.12	4.63	32.59	0.484	0.0198
	26.81	0.97	0.03	1.61	3.16	4.78	33.79	0.510	0.0190
	36.54	0.98	0.02	2.47	2.62	5.09	48.55	0.944	0.0258
	56.91	0.98	0.02	2.96	1.98	4.93	59.96	1.497	0.0263
15%	5.15	0.66	0.34	0.98	11.89	12.87	7.65	0.083	0.0161
	5.24	0.67	0.33	0.99	11.14	12.13	8.20	0.089	0.0170
	14.67	0.92	0.08	2.96	10.63	13.59	21.78	0.278	0.0190
	22.24	0.96	0.04	4.37	9.59	13.96	31.33	0.456	0.0205
	22.97	0.96	0.04	5.09	9.01	14.10	36.10	0.565	0.0246
	26.92	0.97	0.03	6.14	8.92	15.06	40.76	0.688	0.0256
	43.20	0.98	0.02	7.45	6.87	14.32	52.04	1.085	0.0251
	80.46	0.98	0.02	10.02	4.99	15.01	66.76	2.009	0.0250
25%	5.19	0.67	0.33	1.42	20.56	21.98	6.48	0.069	0.0133
	5.35	0.67	0.33	1.48	19.15	20.63	7.16	0.077	0.0144
	14.40	0.92	0.08	4.29	18.40	22.69	18.91	0.233	0.0162
	20.80	0.96	0.04	8.55	16.92	25.47	33.58	0.505	0.0243
	24.39	0.96	0.04	9.79	15.76	25.55	38.32	0.621	0.0255
	32.93	0.96	0.04	10.49	12.60	23.10	45.43	0.833	0.0253
	54.21	0.98	0.02	14.33	10.35	24.67	58.06	1.385	0.0255
	81.35	0.98	0.02	16.06	8.44	24.51	65.54	1.902	0.0234
45%	5.15	0.66	0.34	2.47	38.85	41.32	5.97	0.064	0.0123
	6.68	0.74	0.26	2.91	38.76	41.67	6.99	0.075	0.0112
	14.15	0.91	0.09	7.49	36.24	43.74	17.14	0.207	0.0146
	18.26	0.95	0.05	10.94	31.28	42.22	25.91	0.350	0.0192
	21.06	0.95	0.05	13.80	30.10	43.90	31.43	0.458	0.0218
	44.22	0.95	0.05	22.60	21.91	44.51	50.77	1.031	0.0233
	61.16	0.97	0.03	24.69	18.02	42.71	57.80	1.370	0.0224
	102.09	0.98	0.02	34.29	15.54	49.83	68.81	2.206	0.0216
100% (参考値)	5.11	0.66	0.34	6.00	81.28	87.28	6.87	0.074	0.0144
	5.39	0.68	0.32	6.22	78.93	85.15	7.31	0.079	0.0146
	14.56	0.92	0.08	19.13	80.13	99.25	19.27	0.239	0.0164
	20.11	0.95	0.05	31.43	66.09	97.52	32.23	0.476	0.0237
	24.32	0.97	0.03	33.87	62.05	95.92	35.31	0.546	0.0224
	35.82	0.97	0.03	44.60	51.90	96.50	46.22	0.859	0.0240
	55.09	0.98	0.02	59.62	39.13	98.75	60.37	1.524	0.0277
	100.23	0.98	0.02	69.58	33.06	102.65	67.79	2.104	0.0210

第4-2-2表 交換平衡実験結果 (モンモリロナイト : 40mmolc L<sup>-1</sup>)

粘土含量	SAR (mmol L <sup>-1</sup> ) <sup>-1/2</sup>	溶液相中の当量比		交換吸着量		CEC	ESP	ESR	K <sub>G</sub>
		RNa (%)	RCa (%)	Na <sup>+</sup> (cmolc kg <sup>-1</sup> )	Ca <sup>2+</sup> (cmolc kg <sup>-1</sup> )				
5%	5.03	0.42	0.58	1.17	3.65	4.82	24.49	0.321	0.0639
	5.06	0.43	0.57	1.03	4.00	5.02	20.44	0.257	0.0508
	14.98	0.78	0.22	1.73	3.40	5.13	33.71	0.509	0.0340
	15.03	0.78	0.22	1.79	3.21	5.00	35.91	0.559	0.0372
	25.05	0.90	0.10	2.28	2.84	5.12	44.59	0.805	0.0321
	25.21	0.90	0.10	2.28	2.75	5.03	45.38	0.830	0.0329
	47.70	0.97	0.03	2.93	2.01	4.94	59.28	1.456	0.0305
	48.49	0.97	0.03	2.94	1.94	4.88	60.20	1.512	0.0312
15%	5.05	0.43	0.57	2.41	12.57	14.99	16.21	0.192	0.0380
	5.12	0.43	0.57	2.58	14.21	16.79	15.34	0.181	0.0354
	14.92	0.78	0.22	5.02	10.84	15.86	31.66	0.463	0.0310
	14.97	0.78	0.22	4.89	9.83	14.71	33.35	0.498	0.0332
	25.45	0.90	0.10	5.51	9.51	15.01	36.69	0.579	0.0228
	25.67	0.90	0.10	5.85	8.67	14.52	40.42	0.675	0.0263
	46.64	0.97	0.03	7.00	6.76	13.76	50.87	1.036	0.0222
	49.12	0.97	0.03	7.34	6.75	14.09	52.04	1.087	0.0221
25%	5.04	0.43	0.57	2.85	23.61	26.46	10.78	0.121	0.0240
	5.06	0.43	0.57	2.80	22.01	24.81	11.34	0.127	0.0252
	14.82	0.78	0.22	6.28	18.86	25.14	24.97	0.333	0.0225
	15.00	0.78	0.22	6.36	18.56	24.92	25.52	0.342	0.0228
	25.35	0.90	0.10	9.48	17.27	26.74	35.44	0.549	0.0217
	25.80	0.90	0.10	9.25	16.21	25.45	36.37	0.571	0.0221
	44.03	0.96	0.04	10.01	12.05	22.06	45.36	0.830	0.0189
	51.57	0.97	0.03	10.96	12.76	23.72	46.12	0.858	0.0166
45%	5.02	0.42	0.58	4.45	39.72	44.17	10.07	0.112	0.0224
	5.04	0.42	0.58	4.78	41.18	45.96	10.39	0.116	0.0230
	15.10	0.78	0.22	11.57	34.80	46.37	24.96	0.333	0.0220
	15.20	0.79	0.21	11.36	34.74	46.10	24.63	0.327	0.0215
	25.06	0.90	0.10	16.74	32.54	49.28	33.98	0.515	0.0205
	27.36	0.91	0.09	15.85	29.74	45.59	34.84	0.533	0.0195
	39.67	0.95	0.05	18.51	24.03	42.55	43.52	0.770	0.0194
	56.58	0.97	0.03	18.96	23.97	42.93	44.16	0.791	0.0140
100% (参考値)	4.98	0.42	0.58	11.76	93.79	105.55	11.14	0.125	0.0251
	5.03	0.42	0.58	10.81	91.96	102.78	10.50	0.118	0.0234
	15.20	0.79	0.21	25.58	72.57	98.15	26.06	0.353	0.0232
	15.26	0.79	0.21	25.99	73.52	99.51	26.11	0.353	0.0232
	26.16	0.90	0.10	36.60	67.15	103.76	35.28	0.545	0.0208
	26.47	0.90	0.10	36.18	63.77	99.95	36.24	0.567	0.0214
	42.45	0.96	0.04	42.70	51.39	94.08	45.38	0.831	0.0196
	52.63	0.97	0.03	43.69	51.71	95.40	45.79	0.845	0.0161

第4-2-3表 交換平衡実験結果 (イライト : 10mmolc L<sup>-1</sup>)

粘土含量	SAR (mmol L <sup>-1</sup> ) <sup>-1/2</sup>	溶液相中の当量比		交換吸着量		CEC	ESP	ESR	K <sub>g</sub>
		RNa	RCa	Na <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>				
		(%)		(cmolc kg <sup>-1</sup> )					
5%	5.18	0.66	0.34	0.26	0.62	0.88	29.19	0.412	0.0797
	14.89	0.92	0.08	0.45	0.57	1.03	44.13	0.790	0.0530
	24.96	0.97	0.03	0.55	0.51	1.06	51.98	1.083	0.0434
	45.61	0.98	0.02	0.69	0.38	1.07	64.66	1.830	0.0401
15%	5.08	0.66	0.34	0.38	1.95	2.33	16.39	0.196	0.0386
	14.98	0.92	0.08	0.79	1.84	2.63	30.05	0.430	0.0287
	25.11	0.97	0.03	1.06	1.64	2.70	39.26	0.646	0.0257
	41.24	0.98	0.02	1.43	1.34	2.77	51.71	1.071	0.0260
25%	5.20	0.66	0.34	0.51	3.45	3.96	12.96	0.149	0.0286
	15.07	0.92	0.08	1.11	3.08	4.19	26.50	0.360	0.0239
	25.09	0.97	0.03	1.49	2.81	4.30	34.62	0.530	0.0211
	38.93	0.98	0.02	2.04	2.50	4.54	44.91	0.815	0.0209
45%	5.14	0.66	0.34	0.77	6.46	7.23	10.66	0.119	0.0232
	15.00	0.92	0.08	1.66	5.55	7.21	23.05	0.300	0.0200
	24.33	0.97	0.03	2.30	4.97	7.27	31.70	0.464	0.0191
	33.50	0.98	0.02	2.96	4.60	7.56	39.19	0.645	0.0192
100% (参考値)	5.11	0.66	0.34	1.86	14.05	15.90	11.66	0.132	0.0259
	14.89	0.92	0.08	4.02	12.33	16.35	24.61	0.326	0.0219
	24.64	0.97	0.03	5.75	11.34	17.08	33.64	0.507	0.0206
	40.18	0.98	0.02	7.59	8.98	16.56	45.80	0.845	0.0210

第4-2-4表 交換平衡実験結果 (イライト : 40mmolc L<sup>-1</sup>)

粘土含量	SAR (mmol L <sup>-1</sup> ) <sup>-1/2</sup>	溶液相中の当量比		交換吸着量		CEC	ESP	ESR	K <sub>g</sub>
		RNa	RCa	Na <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>				
		(%)		(cmolc kg <sup>-1</sup> )					
5%	5.03	0.42	0.58	0.38	0.59	0.97	39.40	0.650	0.1295
	14.58	0.78	0.22	0.47	0.57	1.03	44.95	0.791	0.0543
	26.17	0.90	0.10	0.80	0.51	1.31	61.04	1.568	0.0599
	49.08	0.97	0.03	0.97	0.47	1.44	67.28	2.076	0.0423
15%	5.00	0.42	0.58	0.61	2.16	2.77	21.94	0.281	0.0562
	14.87	0.78	0.22	1.04	1.85	2.89	36.02	0.563	0.0379
	25.58	0.90	0.10	1.30	1.65	2.95	44.17	0.791	0.0309
	49.10	0.97	0.03	1.59	1.37	2.95	53.71	1.160	0.0236
25%	5.05	0.43	0.57	0.73	3.73	4.46	16.32	0.195	0.0387
	15.25	0.79	0.21	1.74	3.39	5.13	33.83	0.513	0.0336
	24.94	0.90	0.10	1.91	2.97	4.88	39.19	0.645	0.0258
	48.79	0.97	0.03	2.45	2.40	4.85	50.45	1.018	0.0209
45%	4.99	0.42	0.58	1.08	7.29	8.38	12.95	0.149	0.0298
	15.01	0.78	0.22	2.51	6.20	8.71	28.80	0.405	0.0270
	25.82	0.90	0.10	3.15	5.53	8.68	36.24	0.568	0.0220
	48.28	0.97	0.03	4.01	4.49	8.50	47.19	0.894	0.0185
100% (参考値)	5.10	0.43	0.57	2.94	17.79	20.73	14.20	0.165	0.0325
	15.19	0.79	0.21	6.57	13.70	20.27	32.39	0.480	0.0316
	25.30	0.90	0.10	6.89	11.88	18.77	36.72	0.580	0.0229
	48.64	0.97	0.03	9.36	9.73	19.09	49.02	0.961	0.0198

第4-3表 各系の交換複合体のデバイ長

—モンモリロナイト—					—イライト—											
		10mmolc L <sup>-1</sup>		40mmolc L <sup>-1</sup>				10mmolc L <sup>-1</sup>		40mmolc L <sup>-1</sup>						
粘土含量	SAR	デバイ長 (nm)	SAR	デバイ長 (nm)	粘土含量	SAR	デバイ長 (nm)	SAR	デバイ長 (nm)	粘土含量	SAR	デバイ長 (nm)				
5%	5.21	77.66	5.03	35.14	5%	5.18	77.51	5.03	35.12	5%	5.18	77.51				
	5.27	77.58	5.06	35.09		14.89	91.46	14.58	42.39		14.89	91.46	14.58	42.39		
	15.37	90.63	14.98	41.99		24.96	94.09	26.17	43.99		24.96	94.09	26.17	43.99		
	15.45	91.02	15.03	41.87		45.61	95.47	49.08	46.98		45.61	95.47	49.08	46.98		
	24.45	93.88	25.05	44.74		15%	5.08	77.79	5.00		35.08	15%	5.08	77.79		
	26.81	94.15	25.21	44.64			14.98	91.34	14.87		42.04		14.98	91.34	14.87	42.04
	36.54	93.88	47.70	47.59			25.11	93.93	25.58		44.38		25.11	93.93	25.58	44.38
	56.91	94.42	48.49	47.36			41.24	96.44	49.10		46.98		41.24	96.44	49.10	46.98
15%	5.15	78.01	5.05	35.08	25%	5.20	77.54	5.05	35.23	25%	5.20	77.54				
	5.24	78.11	5.12	35.12		15.07	91.26	15.25	41.72		15.07	91.26	15.25	41.72		
	14.67	91.31	14.92	42.01		25.09	93.57	24.94	44.87		25.09	93.57	24.94	44.87		
	22.24	92.88	14.97	41.92		38.93	95.58	48.79	47.12		38.93	95.58	48.79	47.12		
	22.97	93.84	25.45	44.55		45%	5.14	77.72	4.99		35.22	45%	5.14	77.72		
	26.92	94.82	25.67	44.43			15.00	91.23	15.01		41.99		15.00	91.23	15.01	41.99
	43.20	94.64	46.64	46.87			24.33	93.93	25.82		44.20		24.33	93.93	25.82	44.20
	80.46	95.80	49.12	47.20			33.50	96.64	48.28		47.31		33.50	96.64	48.28	47.31
25%	5.19	77.92	5.04	35.18	100%	5.11	77.84	5.10	35.11	100%	5.11	77.84				
	5.35	78.18	5.06	35.09		(参考値)	14.89	91.29	15.19		41.85	(参考値)	14.89	91.29		
	14.40	90.87	14.82	42.07		24.64	94.16	25.30	44.49		24.64	94.16	25.30	44.49		
	20.80	92.15	15.00	42.01		40.18	93.68	48.64	47.09		40.18	93.68	48.64	47.09		
	24.39	94.05	25.35	44.45												
	32.93	93.46	25.80	44.53												
	54.21	94.83	44.03	46.85												
	81.35	94.56	51.57	47.24												
45%	5.15	77.93	5.02	35.19												
	6.68	82.38	5.04	35.10												
	14.15	88.81	15.10	41.89												
	18.26	91.44	15.20	42.07												
	21.06	92.57	25.06	44.43												
	44.22	92.53	27.36	44.87												
	61.16	94.49	39.67	46.05												
	102.09	94.53	56.58	47.15												
100%	5.11	78.22	4.98	35.23												
	(参考値)	5.39	78.98	5.03	35.16											
	14.56	89.92	15.20	41.87												
	20.11	91.87	15.26	41.74												
	24.32	93.04	26.16	43.93												
	35.82	93.25	26.47	44.39												
	55.09	94.67	42.45	46.62												
	100.23	94.60	52.63	47.22												

第4-1図に各試料のSARによるESPの変化を示した。SARの増加に伴いESPが高くなり、交換相へのNa<sup>+</sup>吸着選択性が高くなっていった。

溶液濃度によってSARに上昇に伴うESPの増加傾向に違いが見られ、高濃度溶液に比較して低濃度溶液の時に著しかった。特に、モンモリロナイトで、その傾向が顕著に認められた。これは、同一SARでも濃度によって溶液中のNa/Ca率が異なることも一因であるが、単純な溶液中のNa<sup>+</sup>/Ca<sup>2+</sup>率の違いに起因するだけではないと考えられた。すなわち、高濃度溶液に比較して低濃度溶液、また、低SARに比較して高SARの下で、拡散二重層の厚さが増加することに基づくといえる。モンモリロナイトは膨張性であるため、低濃度溶液の時、SARの上昇に伴い、Na<sup>+</sup>が土壌固相に選択的に吸着されやすくなり、分散しやすい条件になったと考えられた。

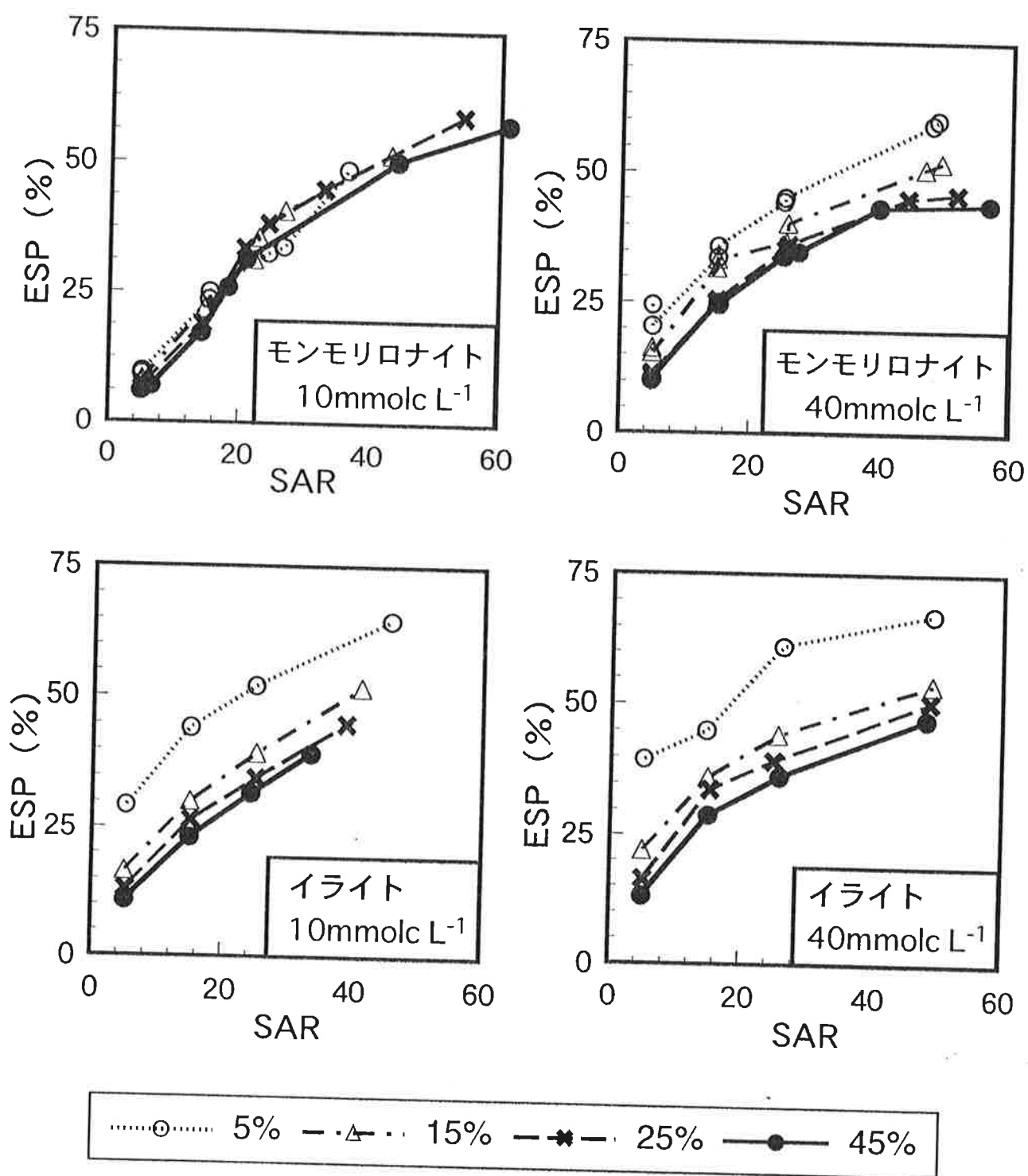
#### 4.4.6. 陽イオン交換容量に対する交換・溶解平衡の影響

各粘土試料のCECは、溶液濃度およびSARによって若干異なった。モンモリロナイト（100%）のCECは、10mmolc L<sup>-1</sup>の交換平衡溶液相で85.2~102.7、40mmolc L<sup>-1</sup>の交換平衡溶液相で94.1~105.6であった。また、イライト（100%）のCECは10mmolc L<sup>-1</sup>の交換平衡溶液相で15.9~17.1、40mmolc L<sup>-1</sup>の交換平衡溶液相で18.8~20.7であった。CECはいずれも交換平衡溶液が高濃度の時、高い値を示した。これは、溶液濃度による電荷発現量の差異によると考えられた。つまり、高濃度溶液ほど電荷発現量が多くなることに起因すると考えられた。しかし、今回用いたモンモリロナイトおよびイライトは、同形置換によるケイ酸塩構造内部の負荷電発現が著しく、この負荷電は構造末端の破壊原子価による負荷電をはるかに上回っている。これらの粘土鉱物の負荷電は溶液のpHによって左右されることなく、表面荷電密度はほぼ一定の値を示す。濃度、SARによってCECは若干変化したが、今回の研究では、粘土の吸着比を考慮に入れるため、今回使用した粘土鉱物のCEC値と判断した。

モンモリロナイトおよびイライトのCECは、粘土含量に比例して増加した。各系とも、Na<sup>+</sup>吸着量はCECとともに増加したが、ESPはCECの増加に伴い減少した。表面荷電量の増加によって、交換相中のNa<sup>+</sup>吸着量が増加したと考えられた。しかし、ESPが減少したことから、表面荷電量の増加に伴って、交換相中へCa<sup>2+</sup>が優先的に吸着されやすくなっていると考えられた。

#### 4.4.7. 交換平衡定数の算出

乾燥地土壤中のK<sub>G</sub>を算出する際、経験的にGapon式が用いられるため、溶液相では活量の代わりに濃度が用いられている。K<sub>G</sub>を算出する際にSARを式に組み込むことに



第4-1図 粘土鉱物・含量および濃度によるSARとESPの関係

より、一価イオンと二価イオンの活量係数の平方根の割合がほぼ一致するために適切であるとされている (Blesler *et al.*, 1982) . しかし、土壌溶液濃度が高くなるにつれて、一価イオンに比べて二価イオンの活量係数は急速に低下する。その結果、塩類土壌では濃度と活量に大きな違いが考えられた。SARを計算式に組み込む論拠を得るため、本論文の第2章で供試した土壌試料の土壌溶液95点について、濃度で算出されたSARconc.と活量で算出されたSARact.の関係を第4-2図に示した。

$$\text{SARact.} = 1.065 \text{ SARconc.} \quad r = 0.992$$

両者は土壌溶液濃度に関わらず正の相関がみられた。このことから、濃度によるSARが $K_G$ の算出に利用できると判断した。

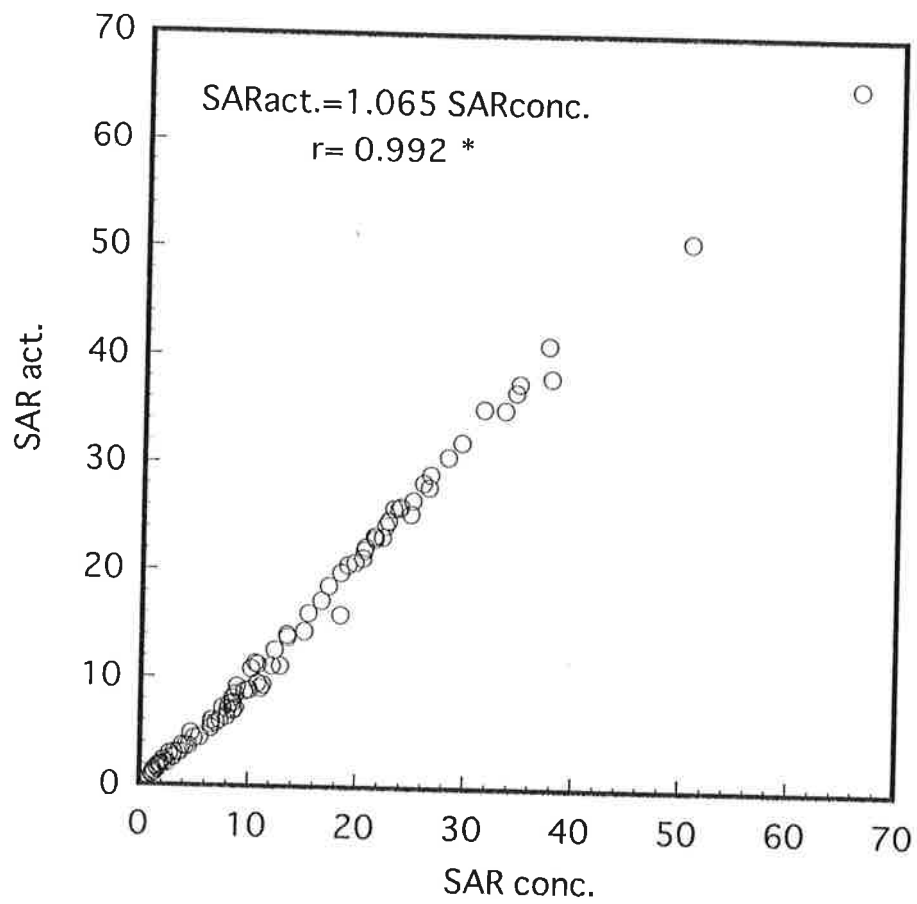
第4-3図に各試料のSARによる $K_G$ の変化を示した。

SARの上昇に伴う $K_G$ の変化は、溶液濃度および粘土鉱物によって異なっていた。

$K_G$ は低濃度溶液ほど低く、高濃度溶液ほど高かった。このことは土壌塩類化に伴い、 $\text{Na}^+$ 吸着選択性が高くなることを示唆していた。また、高濃度溶液では、粘土鉱物種に関わらず、SARの上昇に伴い $K_G$ が減少した。しかし、低濃度溶液では、粘土鉱物種によって異なっていた。イライトでは、SARの上昇に伴い $K_G$ が減少したが、モンモリロナイトでは、SARに関わらずほぼ一定の $K_G$ を示し、質量作用則がほぼ成立しているといえた。粘土鉱物間の $K_G$ を比較すると、高濃度溶液では、SARに関わらずイライトの $K_G$ が大きかった。一方、低濃度溶液では、SARによって差異が見られた。 $K_G$ は低SARの時にイライトの方が大きく、高SARになるとモンモリロナイトの方が大きくなった。この機構は、電気二重層理論に基づくと考えられた。つまり、低濃度、高SARほど、モンモリロナイトの膨潤性が強く表れた結果を反映するものであった。つまり、溶液が低濃度で $\text{Na}^+$ の当量分率が高くなるほど、土壌固相に $\text{Na}^+$ を選択的に吸着しやすくなり、分散性を増すため、 $\text{Na}^+$ 選択性とともにより $K_G$ が増加したと考えられた。

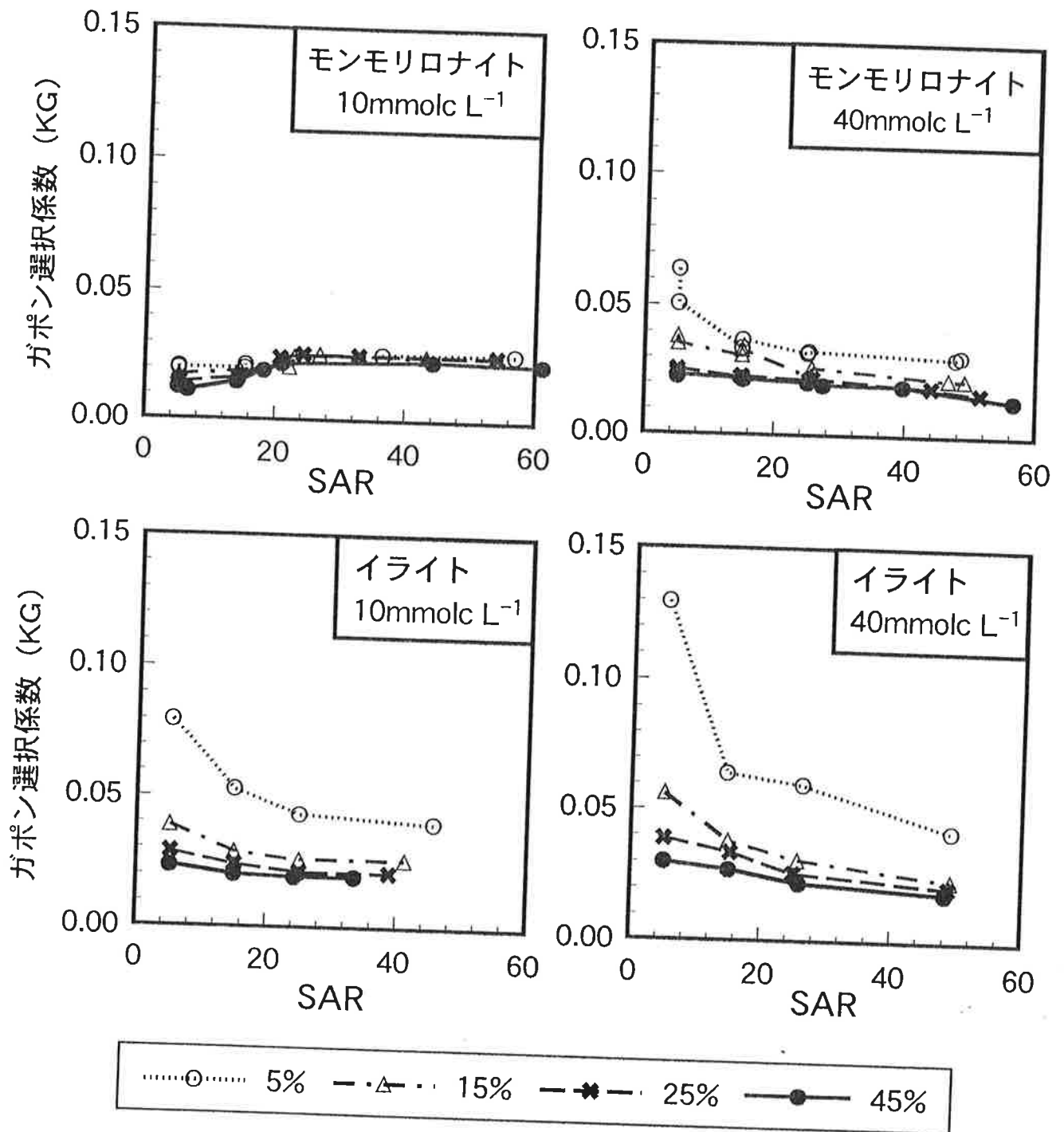
また、粘土鉱物種に関わらず、各試料とも粘土含量の低下に伴い $K_G$ は高くなった。粘土含量が少ないほど $\text{Na}^+$ 吸着/ $\text{Ca}^{2+}$ 放出に進行しやすいといえた。しかし、粘土鉱物種および溶液濃度によって、 $K_G$ の増加度は異なっていた。粘土含量の低下に伴う $K_G$ の増加度はモンモリロナイトよりもイライトの方が大きく、低濃度溶液よりも高濃度溶液の方が大きいといえた。Shainberg *et al.* (1980) によると、Na-Ca交換平衡系は、交換基に対して一様に両イオンが分布するのではなく、それぞれのイオンが交換基に





第4-2図 SARconc.とSARact.の関係

\*1%レベルで有意



第4-3図 粘土鉱物・含量および濃度によるSARと交換平衡定数 ( $K_g$ ) の関係

対して偏って分布している。また、佐々木ら（1979）によると、 $\text{Ca}^{2+}$ は粘土の外部表面よりも内部表面のほうに優先的に吸着され、 $\text{Na}^+$ は内部表面に吸着されている $\text{Ca}^{2+}$ によって外部表面に駆逐されている。これらのことから、粘土含量が低い時には、内部表面に吸着されているイオンの絶対量が少ないため、外部表面に吸着されるイオン吸着割合が増加すると考えられる。そのことにより、外部表面に吸着されている $\text{Na}^+$ の占める割合が増加するため、 $K_G$ が上昇したと考えられた。そして粘土含量の増加に伴い、粘土鉱物内の内部表面とともに負荷電量が増すため $K_G$ が低下したと考えられた。つまり、表面荷電量や負荷電密度の違いにより、粘土試料、含量および溶液濃度により交換平衡特性が異なると考えられた。

以上の結果に基づいてESR-SAR関係式を算出し、第4-4表に示した。

算出されたESR-SAR関係式から、いづれにおいても粘土含量が低いほど $K_G$ は大きく、粘土含量が高いほど $K_G$ は小さかった。つまり、粘土含量の低い土壌ほど、陽イオン交換反応において、 $\text{Na}^+$ 吸着/ $\text{Ca}^{2+}$ 放出に進行しやすく、粘土含量の高い土壌ほど、 $\text{Na}^+$ 吸着/ $\text{Ca}^{2+}$ 放出は比較的抑えられている環境下に置かれているといえた。

本研究で得られた $K_G$ は、これまで報告されている $K_G$ とは異なり高く算出されたが、その理由として以下の事が考えられる。ESR-SAR関係式を導き出す場合、土壌の性質や土壌溶液の濃度・組成および測定法によって $K_G$ が大きく変わると考えられた。つまり、乾燥地土壌中には可溶性塩類が多量に存在しているために、交換性塩基、CECの測定には様々な問題が生じている（Mehlich, 1939 ; Bower *et al.*, 1952 ; Levy and Hillel, 1976 ; Mario and Rhoades, 1977 ; Harron *et al.*, 1983 ; Flenkel and Alperovitch, 1984 ; Amrherin and Suarez, 1990 ; Snmner *et al.*, 1996）。そのことにより、これまで報告されている $K_G$ は誤差が生じているためと考えられた。また、実際の土壌では様々な鉱物種が含まれていることも一因であると考えられた。

以上のことを踏まえ、第2章の砂質農地、粘質農地における塩類動態について考察した。砂質農地では、塩類が下層に洗脱されやすい環境下にあるが、陽イオン交換反応において、 $\text{Na}^+$ 吸着/ $\text{Ca}^{2+}$ 放出へ進行しやすい環境下に置かれ、ESPが急速に上昇したと考えられた。一方、粘質農地では、陽イオン交換反応において、 $\text{Na}^+$ 吸着/ $\text{Ca}^{2+}$ 放出への進行は比較的抑えられている環境下にあるが、灌漑や施肥によって塩類が土壌中に付加されることによって、土壌中に塩類が集積しやすくなり、土壌溶液の塩類濃度の増加によって $\text{Na}^+$ 吸着/ $\text{Ca}^{2+}$ 放出へ進行しやすい環境下になり、ESPは上昇したと考えられた。

第4-4表 粘土の種類および量に伴うESR-SAR式

粘土含量		r
モンモリロナイト 10mmolc L <sup>-1</sup>		
5%	ESR = 0.02696 SAR - 0.0909	0.978**
15%	ESR = 0.02585 SAR - 0.0571	0.997**
25%	ESR = 0.02477 SAR - 0.0357	0.991**
45%	ESR = 0.02262 SAR - 0.0512	0.996**
モンモリロナイト 40mmolc L <sup>-1</sup>		
5%	ESR = 0.02797 SAR + 0.1289	0.996**
15%	ESR = 0.01973 SAR + 0.1278	0.981**
25%	ESR = 0.01647 SAR + 0.0821	0.972**
45%	ESR = 0.01426 SAR + 0.1001	0.924**
イライト 10mmolc L <sup>-1</sup>		
5%	ESR = 0.03469 SAR + 0.2427	0.998**
15%	ESR = 0.02408 SAR + 0.0656	0.998**
25%	ESR = 0.01951 SAR + 0.0523	0.998**
45%	ESR = 0.01845 SAR + 0.0224	0.999**
イライト 40mmolc L <sup>-1</sup>		
5%	ESR = 0.03432 SAR + 0.4576	0.953*
15%	ESR = 0.01942 SAR + 0.2398	0.980*
25%	ESR = 0.01793 SAR + 0.1713	0.969*
45%	ESR = 0.01666 SAR + 0.1122	0.982*

\*5%レベルで有意 \*\*1%レベルで有意

本研究では、二種類の粘土鉱物（モンモリロナイト、イライト）を用いて、粘土鉱物種、量および溶液濃度によって、異なったESR-SAR関係式が導き出された。このことは、それぞれの粘土鉱物、粘土含量、荷電量、膨潤性の差異によって引き起こされた結果と考えられた。実際の土壌系では様々な粘土鉱物種および含量が存在しているため、今後のさらなる基礎データの積み重ねにより、より実現可能になるものと期待される。

#### 4.5. 要 約

本章では、土壌塩類化・アルカリ化過程における土壌固相/溶液相間の化学平衡を考慮して論じることを目的として、二種類の粘土鉱物（モンモリロナイト、イライト）を用いて、ESR-SAR関係式の確立を試みると同時に、乾燥地土壌の陽イオン交換特性について検討した。

Ca-Na交換平衡溶液の濃度が低く、SARが大きいほど、拡散二重層の厚さが増加し、分散が引き起こされやすかった。また、粘土含量の増加に伴い交換性ナトリウムの量は増加したが、ESPは減少した。

上記のことを踏まえ、それぞれの粘土試料粘土含量によるESR-SAR関係式を導いた。これまで報告されている $K_G$ とは異なり、高い値が算出された。乾燥地土壌中には可溶性塩類が多量に存在しているために、交換性塩基、CECの測定には様々な問題が生じているため算出される $K_G$ に誤差が生じており、これまでの報告されている $K_G$ は低く算出されていた。また、算出された $K_G$ は粘土鉱物の種類および含量、土壌溶液の濃度および組成によって異なっていた。表面荷電密度の高さ、層荷電が大きさによる原子価効果により、イライトの方がモンモリロナイトに比較して $K_G$ が高かった。また、溶液の濃度が高いほど $K_G$ が高く、溶液の濃度が低いほど $K_G$ が低かった。また、粘土含量が低い土壌ほど $K_G$ は高く、粘土含量が高い土壌ほど $K_G$ は低かった。

以上のことから、砂質農地では比較的塩類は下層に洗脱されやすい環境下にあるが、陽イオン交換反応が、 $\text{Na}^+$ 吸着/ $\text{Ca}^{2+}$ 放出に進行しやすい環境下に置かれることによりESPが急速に上昇されるといえた。一方、粘質農地は、陽イオン交換反応は、比較的、 $\text{Na}^+$ 吸着/ $\text{Ca}^{2+}$ 放出への進行は抑えられている環境下にあるが、灌漑や施肥によって塩類が土壌中に付加されることによって、土壌中に塩類が集積しやすくなり、塩類濃度が増加することによってESPは上昇するといえた。

## 第5章 総合考察

本論文で述した灌漑農地の土壌断面内の塩類動態は各地域によって異なり、そのことによって、土壌の塩類化、アルカリ化過程は異なった。その差異は、土壌の性質、土壌中の集積塩類の量・組成、灌漑水の量・水質、灌漑方式、管理歴等が大きく関与する支配要因であると考えられた。

### 5.1. 塩類の溶解特性の把握の意義

乾燥地土壌中の集積塩類の量・組成は多様であり、溶解度の異なる塩類が共存しているため、土壌溶液中に溶存する塩類は農地および水分条件によって大きく異なる。そのことにより、土壌の性質、灌漑方法、灌水量によって土壌溶液中の塩類形態も大きく変化するため、土壌断面内における塩類動態が大きく異なってくると考えられた。多量の灌漑水の付加によって、塩類はそれぞれの溶解度積に従い溶解され、解離状態のイオンとして存在しやすい。しかし、蒸発散などによる土壌の乾燥に伴い土壌水分が低下してくると、易溶性塩類の解離イオン濃度がほぼ反比例的に増加されると同時に、難溶性塩類中のイオンの解離は抑えられ、イオン対、沈殿を生成しやすい環境になると考えられた。そのことにより、土壌溶液中に占める塩類の割合は、集積塩類の量よりも相対的に異なってくると考えられた。

砂質農地では、灌漑によって溶解された塩類は下層へ洗脱されやすい。そのため、土壌溶液濃度は低濃度に抑えられるが、灌漑水の影響により、土壌中の塩類組成および土壌溶液中のイオン組成は絶えず変化し易い環境下にあると考えられた。灌漑により、易溶性塩類は比較的多量に溶解されるため、溶解された難溶性塩類中のイオンは、イオン対の生成と有効濃度の低下を引き起こし易い環境下になり、洗脱されると考えられた。したがって、土壌中の集積塩類の洗脱効果および土壌溶液中のイオン組成変化は、利用する灌漑水の量および質に左右すると考えられた。

一方、粘質農地は土壌中に灌漑水を滞留し易く、灌漑によって溶解した塩類は下層へ洗脱しにくい環境下にある。そして、蒸発散により土壌水分量が低下すると、土壌溶液中の易溶性塩類に起因する解離イオン濃度がほぼ反比例的に増加されると同時に、難溶性塩類に起因する解離イオンの生成は抑えられ、非荷電イオン対および沈殿を生成しやすい環境になると考えられた。最終的には易溶性塩類も土壌に残存し、施与し

た灌漑水・肥料中の塩類の大部分が土壌へ付加される結果になると考えられた。土壌溶液中では、一価イオンのナトリウム塩は解離イオンの形態として存在する一方、二価イオンのカルシウム塩、マグネシウム塩などは非解離イオンの形態で存在していると考えられた。各塩類の沈澱は、それぞれの溶解度積によって支配されているため、土壌の乾燥に伴う土壌溶液の濃縮により、難溶性塩類の沈殿が生成され、土壌溶液中の $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 濃度は一定となる一方、 $\text{Na}^+$ 濃度は増加し続けた。つまり、土壌溶液中の $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 割合が減少するとともに $\text{Na}^+$ 割合が増加することにより、ECとSARが急速に増加した。また、SARの増加は土壌溶液濃度が高くなるほど顕著であった。

多様な塩類が共存する乾燥地では、土壌溶液中の易溶性塩類に起因する解離イオンは増加するが、難溶性塩類に起因する解離イオンは低下する。土壌溶液中のイオン活量と、植物によるその吸収量の高い相関があることから、作物の吸収阻害が生じると考えられた。

乾燥地農業開発の重要な技術課題の一つに貴重な水の有効利用にあるが、土壌溶液中の塩類の存在形態の変化を知ることによって、適切な改良資材・灌漑水量の施与量および時期などきめ細やかな土壌管理が必要である。

## 5.2. 土壌固相/溶液相間の化学平衡の把握の意義

土壌溶液中の塩類濃度や組成とともに土壌固相中の塩基組成にも変化が生じているため、土壌固相/溶液相間の化学平衡は灌漑と乾燥の繰り返しの環境により絶えず変動している。

砂質農地では、塩類は下層に洗脱されやすいが、土壌の陽イオン交換反応は $\text{Na}^+$ 吸着/ $\text{Ca}^{2+}$ 放出に進行しやすい環境下に置かれているため、ESPが急速に上昇し、ソーダ質土壌が生成されやすいことが明らかであった。砂質農地では、土壌の膨潤に伴う土壌物理性の悪化は懸念されない。しかし、土壌中および灌漑水中にナトリウム炭酸塩が含まれている時、土壌溶液中の $\text{Na}^+$ 、 $\text{HCO}_3^-$ の存在割合が増加するため、土壌のソーダ質化に起因するpH上昇が懸念された。

一方、粘質農地では、土壌の陽イオン交換反応は、比較的、 $\text{Ca}^{2+}$ 吸着/ $\text{Na}^+$ 放出へ進行しやすい環境であるが、土壌中に塩類が集積しやすく、蒸発散により土壌溶液が濃縮されるにつれて、難溶性のカルシウム塩、マグネシウム塩の沈殿が生成される一方、 $\text{Na}^+$ 割合が増加しするため、SARが増加すると考えられた。つまり、塩類集積の進行に伴ってSARの増加が引き起こされ、その結果、土壌固相に $\text{Na}^+$ が吸着され易くなり、

ESPは増加すると考えられた。土壤溶液がX倍濃縮されるとSARは $X^{1/2}$ 倍以上になることから、塩類化過程と同時に、ソーダ質化が急速に進行することを示唆していた。乾燥地環境下では、 $\text{CaCO}_3$ の低い溶解度積によって土壤溶液中の $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 濃度が一定水準以上に上がらないという事実から、塩類化が進行する過程で、ソーダ質化は不可逆的に進むと考えられた。そして、土壤のアルカリ化はソーダ質化によって助長されるといった。

以上のことから、灌漑農地では、土壤の性質によって土壤固相/溶液相間の化学平衡も異なっており、そのことは塩類動態にも影響を及ぼし、土壤塩類化、アルカリ化過程も大きく異なっていると考えられた。これらのことは灌漑農地の集積塩類量・組成および土壤の性質による塩類動態を把握する上で重要なことである。

### 5.3. 灌漑農地における塩類動態の要因

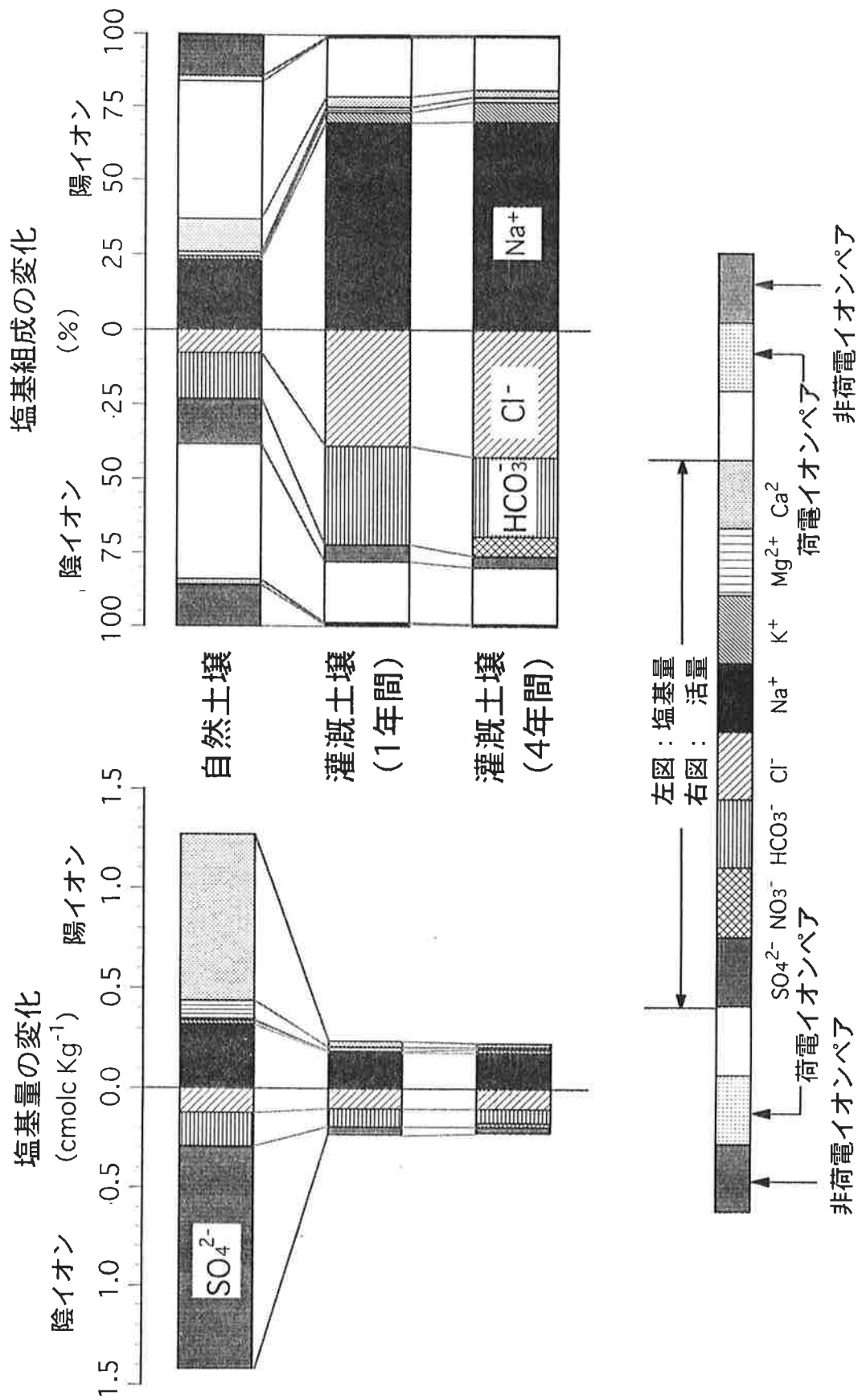
#### 5.3.1. メキシコ・カリフォルニア半島中央部の灌漑農地

ゲレロネグロではわずか数年の灌漑により集積塩類量・組成が変化し、塩類の洗脱に伴い土壤pHが著しく上昇した。ゲレロネグロの農地周辺の自然土壤の調査土壤断面内には、一般的に、30~40cmの厚さで $\text{CaSO}_4$ の沈積している層が土壤断面内に堆積されていた。農地は切り盛りにより造成されたため、 $\text{CaSO}_4$ 集積層が農地では異なる深さになったと推察された。そこで、灌漑開始前には $\text{CaSO}_4$ が多量に沈積していたと推察される赤褐色層を農地の灌漑に伴う塩類動態を探る上での鍵層と判断し、第5-1表に灌漑前後の土壤飽和抽出液の活量、第5-1図に土壤飽和抽出液中の塩基量および活量の存在割合を示した。ECe値は $3.4\text{dS m}^{-1}$ から $0.8\text{dS m}^{-1}$ および $0.9\text{dS m}^{-1}$ に低下し、塩類は洗脱されたが、pHは8.1から8.8および9.0に上昇した。灌漑後、土壤飽和抽出液中の $\text{Ca}^{2+}$ および $\text{SO}_4^{2-}$ の活量の存在割合が減少し、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{HCO}_3^-$ の存在割合が増加した。また、各イオン対はほとんど減少したが、炭酸塩イオン対が増加した。 $\text{Na}^+$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 濃度が高い灌漑水を利用しているため、 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 、 $\text{NaHCO}_3$ が土壤中に沈積した結果であると考えられた。 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 、 $\text{NaHCO}_3$ は $\text{CaCO}_3$ 、 $\text{MgCO}_3$ に比較して高い溶解度を示すため、土壤飽和抽出液中のナトリウム炭酸塩の溶存濃度が高くなったと考えられる。灌漑の結果、土壤溶液中に易溶性塩類の占める割合が増加された結果を反映していた。さらに、灌漑による $\text{CaSO}_4$ の溶解により、 $\text{Ca}^{2+}$ が生成されたが、当地では $\text{Na}^+$ 濃度の高い灌漑水を利用しているため、 $\text{Ca}^{2+}$ より多量の $\text{Na}^+$ が付加されていた。さらに、砂質農地であることから、陽イオン交換反応は、 $\text{Na}^+$ 吸着/ $\text{Ca}^{2+}$ 放出に



第5-1表 灌漑による土壌飽和抽出溶液中の活量変化

	ゲレロネグロ						ヘススマリア			
	自然土壌		灌漑土壌 (1年間)		灌漑土壌 (4年間)		自然土壌		灌漑土壌 (11年間)	
	濃度	活量	濃度	活量	濃度	活量	濃度	活量	濃度	活量
	mmolc L <sup>-1</sup>		mmolc L <sup>-1</sup>		mmolc L <sup>-1</sup>		mmolc L <sup>-1</sup>		mmolc L <sup>-1</sup>	
pH	8.11		8.78		8.96		8.58		8.12	
EC	3.40		0.82		0.88		1.81		13.2	
Ca <sup>2+</sup>	8.77	4.11	0.41	0.28	0.27	0.19	2.26	1.27	19.03	6.22
Mg <sup>2+</sup>	1.10	0.56	0.23	0.16	0.19	0.13	1.56	0.91	19.77	7.52
K <sup>+</sup>	0.59	0.47	0.31	0.28	0.60	0.54	2.13	1.81	12.70	8.81
Na <sup>+</sup>	10.65	8.66	6.16	5.58	6.00	5.47	10.41	8.92	79.23	57.72
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	13.58	5.79	0.69	0.46	0.42	0.29	1.03	0.55	1.26	0.33
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	5.20	4.22	2.84	2.58	2.17	1.98	10.15	8.70	13.08	9.53
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.54	0.49	0.00	0.00	0.00	0.00
Cl <sup>-</sup>	3.88	3.10	3.36	3.04	3.45	3.13	11.35	9.62	140.92	97.77
CaCl <sup>+</sup>	3.4×10 <sup>-2</sup>		2.2×10 <sup>-3</sup>		1.5×10 <sup>-3</sup>		3.2×10 <sup>-2</sup>		1.600	
MgCl <sup>+</sup>	4.5×10 <sup>-3</sup>		1.3×10 <sup>-3</sup>		1.1×10 <sup>-3</sup>		2.3×10 <sup>-2</sup>		1.933	
NaSO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	2.1×10 <sup>-1</sup>		1.1×10 <sup>-2</sup>		6.6×10 <sup>-3</sup>		2.0×10 <sup>-2</sup>		8.0×10 <sup>-2</sup>	
KSO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	2.5×10 <sup>-2</sup>		1.2×10 <sup>-3</sup>		1.4×10 <sup>-3</sup>		9.1×10 <sup>-3</sup>		2.7×10 <sup>-2</sup>	
CaHCO <sub>3</sub> <sup>+</sup>	3.2×10 <sup>-1</sup>		1.3×10 <sup>-2</sup>		6.7×10 <sup>-3</sup>		2.0×10 <sup>-1</sup>		1.079	
MgHCO <sub>3</sub> <sup>+</sup>	3.4×10 <sup>-2</sup>		5.9×10 <sup>-3</sup>		3.8×10 <sup>-3</sup>		1.2×10 <sup>-1</sup>		1.036	
NaCl <sup>0</sup>	8.9×10 <sup>-3</sup>		5.6×10 <sup>-3</sup>		5.7×10 <sup>-3</sup>		2.8×10 <sup>-2</sup>		1.869	
KCl <sup>0</sup>	3.7×10 <sup>-5</sup>		2.2×10 <sup>-5</sup>		4.4×10 <sup>-5</sup>		4.5×10 <sup>-4</sup>		2.2×10 <sup>-2</sup>	
CaSO <sub>4</sub> <sup>0</sup>	4.867		2.6×10 <sup>-2</sup>		1.1×10 <sup>-2</sup>		1.4×10 <sup>-1</sup>		4.2×10 <sup>-1</sup>	
MgSO <sub>4</sub> <sup>0</sup>	5.5×10 <sup>-1</sup>		1.2×10 <sup>-2</sup>		6.6×10 <sup>-3</sup>		8.5×10 <sup>-2</sup>		4.3×10 <sup>-1</sup>	
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> <sup>0</sup>	1.1×10 <sup>-3</sup>		3.6×10 <sup>-5</sup>		2.2×10 <sup>-5</sup>		1.1×10 <sup>-4</sup>		2.8×10 <sup>-3</sup>	
NaHCO <sub>3</sub> <sup>0</sup>	2.1×10 <sup>-2</sup>		8.1×10 <sup>-3</sup>		6.1×10 <sup>-3</sup>		4.4×10 <sup>-2</sup>		3.1×10 <sup>-1</sup>	
NaCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	4.2×10 <sup>-6</sup>		4.9×10 <sup>-5</sup>		1.3×10 <sup>-4</sup>		1.4×10 <sup>-4</sup>		4.3×10 <sup>-5</sup>	
CaCO <sub>3</sub> <sup>0</sup>	1.7×10 <sup>-4</sup>		2.1×10 <sup>-4</sup>		3.8×10 <sup>-4</sup>		1.7×10 <sup>-3</sup>		4.0×10 <sup>-4</sup>	
MgCO <sub>3</sub> <sup>0</sup>	3.7×10 <sup>-5</sup>		1.9×10 <sup>-4</sup>		4.2×10 <sup>-4</sup>		1.9×10 <sup>-3</sup>		7.6×10 <sup>-4</sup>	
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> <sup>0</sup>	9.2×10 <sup>-9</sup>		6.9×10 <sup>-9</sup>		1.8×10 <sup>-10</sup>		3.1×10 <sup>-7</sup>		6.3×10 <sup>-7</sup>	

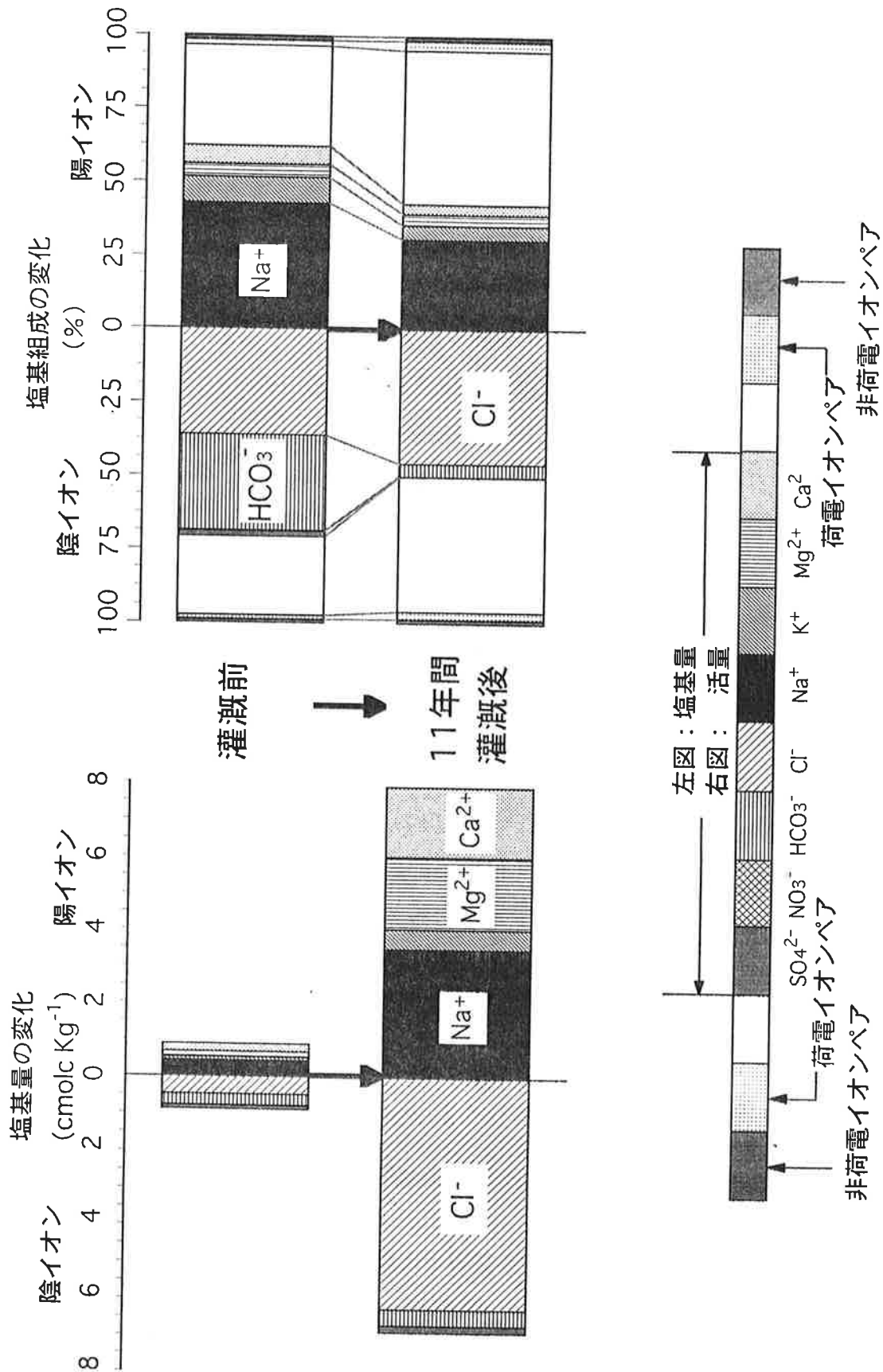


第5-1図 ゲレロネグロ土壌の灌漑歴による塩基量および塩基組成の比較

進行しやすい環境下に置かれていると考えられた。つまり、土壌固相へは $\text{Na}^+$ が優先的に吸着され、 $\text{Ca}^{2+}$ は下層へ洗脱されたと考えられた。その結果、ESPが急速に上昇し、ソーダ質土壌を生成したといえる。

また、砂質農地でも管理歴の長いビスカイノでは、土壌pHの上昇とともに土壌塩類化も顕在化していた。灌漑水中の $\text{Na}^+$ が土壌に付加され続けた結果である。今後も土壌溶液中の $\text{Na}^+$ 濃度が高くなり続けると予測され、 $\text{Na}^+$ が土壌固相へ積極的に吸着され、さらにアルカリ化の進行が示唆された。それと同時に灌漑水中の各種塩類が徐々に表層に残存し、塩類化も進行すると推察された。

ヘスマリアでは、灌漑前の土壌断面内のECe値は全層にわたり $1\text{dS m}^{-1}$ 程度で過剰な塩類集積はみられなかった。しかし、11年間の管理後、表層に多量の塩類集積が見られ、ECe値で $10\text{dSm}^{-1}$ を超えていた。第5-1表に灌漑前後の土壌飽和抽出液の活量の比較、第5-2図に土壌飽和抽出液中の塩基量および活量の存在割合の比較を示した。集積塩類は主に $\text{NaCl}$ 、 $\text{MgCl}_2$ 、 $\text{CaCl}_2$ 等の塩化物を主体とした水に溶解しやすい形態であった。これらの可溶性塩類は、土壌が粘土質であるため灌漑によって下層に洗脱されにくく、激しい蒸発散により表層に集積されたものである。これまでの灌漑、施肥の繰り返しにより、灌漑水中、肥料中に含まれている塩類の大部分が、作土層に残存した結果と考えられた。11年間の灌漑後、ほとんどの活量は増加していた。しかし、各活量の存在割合を比較すると、 $\text{HCO}_3^-$ の割合が大きく減少した。各イオン対もほとんどが増加したが、炭酸塩のイオン対は減少した。耕作地の土壌飽和抽出液中には $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ が $\text{HCO}_3^-$ に対して過剰にあり、 $\text{NaCl}$ 、 $\text{MgCl}_2$ 、 $\text{CaCl}_2$ 等の中性塩が残存し、塩類土壌を生成し、土壌pHは低下したと考えられた。当地は、粘質農地であることから、土壌の陽イオン交換反応において、 $\text{Na}^+$ 吸着/ $\text{Ca}^{2+}$ 放出の進行は、比較的抑えられている環境下になっていると考えられた。しかし、これまでの管理により、灌漑水中、肥料中に含まれていた塩類がそのまま土壌中へ残存しており、土壌溶液中の濃度およびSARが高くなり、今後、 $\text{Na}^+$ 吸着/ $\text{Ca}^{2+}$ 放出の方向へ進み易い環境下に置かれると推察された。すでに、土壌溶液中の $\text{Na}^+$ の存在割合が大きくなっていることから、灌漑水中に $\text{Na}^+$ が多量に含まれている限り、今後も土壌溶液中の $\text{Na}^+$ 濃度が高く維持され続けると考えられた。その上、土壌中の粘土鉱物はスメクタイトが卓越しているため、 $\text{Na}$ 吸着選択性が高くなっている。今後、 $\text{Na}$ 集積/ $\text{Ca}$ 溶脱の繰り返しによる $\text{Na}$ 卓越型土壌の生成や、高分散性粘土による緻密層の形成など、土壌の物理性悪化に伴う作物の生育障害の危険性が示唆された。しかし、作土層に集積される塩類は主に灌漑水、肥料



第5-2図 ヘススマリア土壤の灌漑に伴う塩基量および塩基組成の変化

中の塩類に支配されており，地下水位が低いため，下層からの地下水による塩類の付加は影響されていない．良質とはいえぬ灌漑水により，これまでの11年間，栽培，収穫が継続され，安定した作物生産が確保できる農地として十分に活用されていた．これは，水の絶対量が限られているため，湛水害が生じなかったためであると考えられる．つまり，灌漑を節水型のより効率的な方法に変えればより長期的な耕作を継続できるという，乾燥地で過剰な灌漑水を与えない水管理がいかに重要であることを示唆するものといえた．

### 5.3.2. カザフスタン・シルダリア川下流域の灌漑農地

カザフスタン・シルダリア川下流域の灌漑農地では，耕作地，放棄地ともに多量の塩類が集積しており，土壤溶液中の濃度およびSARは管理歴に伴って上昇していた．イエルタイブロックにおける耕作地，放棄地の断面内における土壤飽和抽出液中の塩基量および活量の存在割合を第5-3図に示した．土壤溶液中には，解離している $\text{Na}^+$ ， $\text{Cl}^-$ の存在割合が大きくなっており，蒸発により $\text{NaCl}$ を主体とした塩が残存し，塩類土壤を生成したと考えられた．また，土壤溶液濃度は非常に高くなっていったことから， $\text{Ca}^{2+}$ ， $\text{Mg}^{2+}$ のイオン対が形成され，それらの解離イオンが低濃度に抑えられたと考えられた．さらに土壤溶液中には， $\text{HCO}_3^-$ が低濃度に抑えられていたため，土壤pHの増加傾向は認められなかったと考えられた．しかし，今後も $\text{Na}$ ， $\text{Mg}$ ， $\text{Ca}$ ， $\text{Cl}$ ， $\text{SO}_4$ の各種塩類の沈積によって土壤塩類化が進行し，土壤溶液中の $\text{Na}^+$ 濃度が高く維持され続けると考えられる．そして土壤表層では，土壤溶液のSARが増加し続け，土壤固相と平衡状態におかれるため，陽イオン交換反応は $\text{Na}^+$ 吸着/ $\text{Ca}^{2+}$ 放出へ進行されると予測される．その上，土壤中には膨張性の2：1型粘土鉱物であるスメクタイトが卓越しているため $\text{Na}$ 吸着選択性が高くなっている．これらのことは，今後，高分散性粘土による緻密層の形成などの土壤の物理性ととも化学性の悪化が急速に進行する危険性があることを示唆している．現在のような農業形態の継続では，放棄地が急速に拡大する可能性が極めて大きく，何らかの対策が必要である．

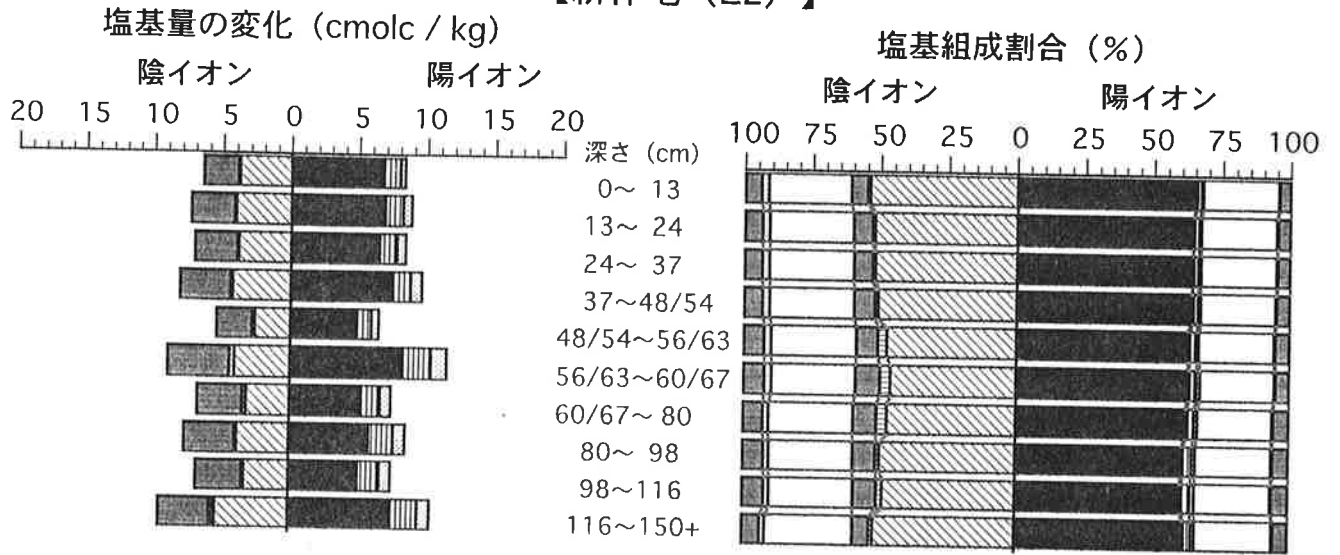
## 5.4. 塩類の多様性を考慮に入れた土壤管理

### 5.4.1. 砂質農地の土壤管理への提言

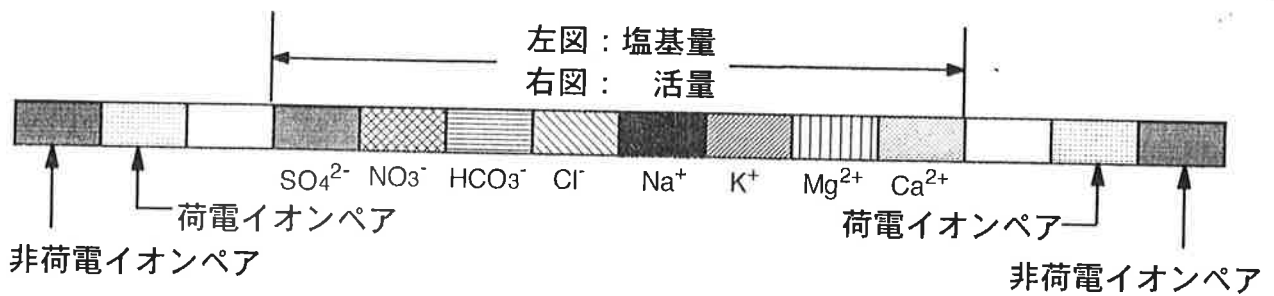
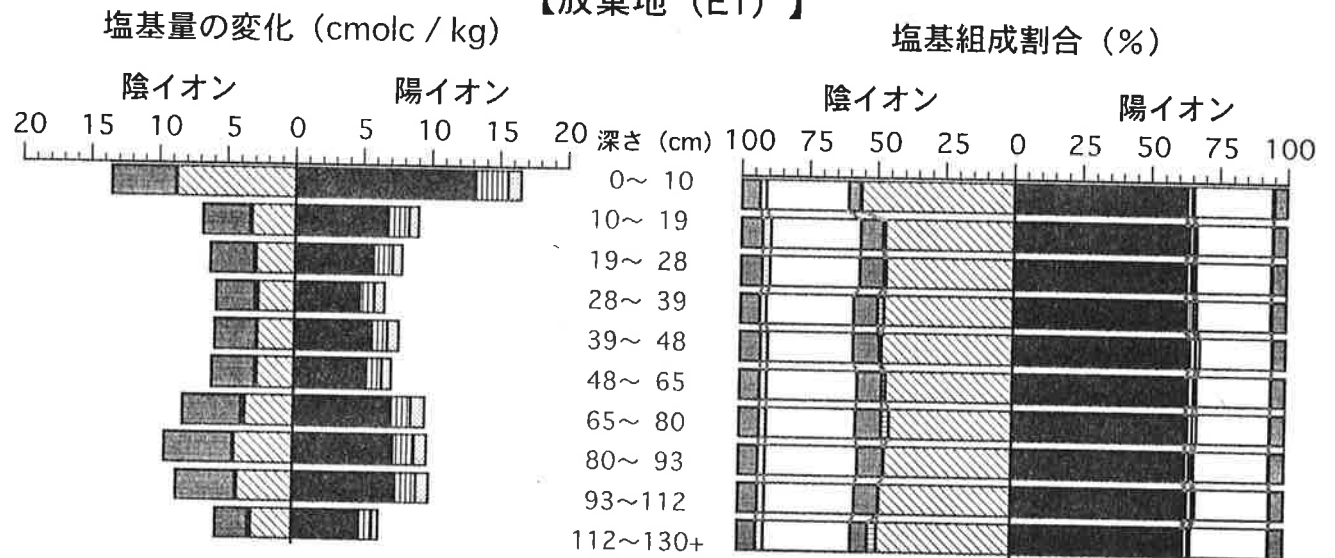
第5-4図に砂質農地における塩類動態および粘土（2：1型層状ケイ酸塩）内におけるイオン動態の概念図を示した．

砂質農地では，灌漑により土壤中の集積塩類は洗脱されやすい環境下に置か

【耕作地 (E2)】



【放棄地 (E1)】



第5-3図 カザフスタン・イエルタイ土壤の塩基量および塩基組成の変化



れ、土壌中の集積塩類の量・組成の変化は、灌漑水量および質に左右され、それらの影響によって土壌環境は絶えず変化していることが明らかであった。土壌中には溶解度の異なる塩類が共存しているため、灌漑や降水に伴う塩類の洗脱過程で、難溶性塩類に起因するイオンは、イオン対として生成し易い環境になり、有効濃度が低下したまま洗脱される。その結果、土壌中では易溶性塩類が支配的になる。一般的にNa塩は易溶性塩類であるため、土壌溶液中の $\text{Na}^+$ 割合が高くなり、それと同時に土壌固相に $\text{Na}^+$ が吸着されやすくなる。灌漑水中の塩類濃度・SARが高ければ高いほど、その傾向は著しく、ソーダ質化が比較的早く進行しやすいが、膨潤・収縮に関わる土壌物理性の悪化は懸念されない。むしろ、これらが引き起こす問題は、土壌中や灌漑水中に多量の炭酸塩を含むことによって生じる化学性悪化である。すなわち、砂質農地では、灌漑によって塩類組成が変化しやすい環境下にあるため、炭酸種陰イオンが二価陽イオンに対して過剰にあると、塩類が洗脱される過程で、 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 、 $\text{NaHCO}_3$ が容易に解離されると同時に、二価陽イオンが除去される。その結果、土壌溶液中では $\text{Na}^+$ 、 $\text{HCO}_3^-$ が支配的となり、土壌溶液のSARとともにpHが上昇すると考えられた。

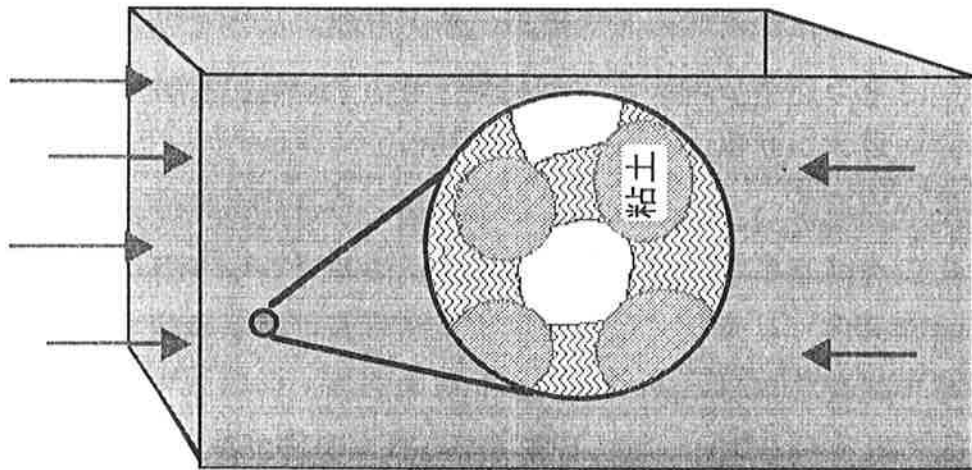
このような農地のアルカリ化は作物への養分の不可給化を引き起こすことになるので、アルカリ化を矯正しなければならない。アルカリ土壌の改良には、周知の事実として、 $\text{CaSO}_4$ の施与が有効である（松本ら、1995）。灌漑により、 $\text{CaSO}_4$ の溶解に伴う $\text{Ca}^{2+}$ の生成が考えられる。しかし、 $\text{Na}^+$ 濃度の高い灌漑水を利用すると、土壌溶液中の $\text{Na}^+$ 割合が高くなり、 $\text{Ca}^{2+}$ の有効濃度は低下する。その結果、 $\text{Ca}^{2+}$ は洗脱され、土壌固相へは優先的に $\text{Na}^+$ が吸着される。このような土壌に対しては、硫酸の施与等によって直接pHを下げる改良が有効だと考えられた。このような改良は砂質土壌であることも幸いするが、土壌のアルカリを矯正後、液肥に硫酸等を混入させることによって、土壌のアルカリ化を抑えつつ作物栽培を行い、pHを低レベルに保ちつつ、作物への養分を可給化させることが重要であると考えられた。また、それと同時に、土壌塩類化を進行させないために、アルカリ化の進行を配慮して、過剰な灌漑水を与えないで塩類化の進行も抑えつつ、作物栽培を行わなければならない。

#### 5.4.2. 粘質農地の土壌管理への提言

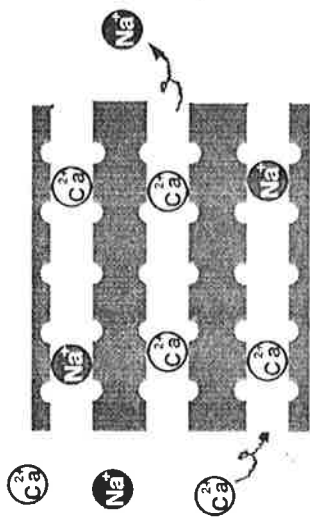
第5-5図に粘質農地における塩類動態および粘土（2：1型層状ケイ酸塩）内におけるイオン動態の概念図を示した。



灌漑, 降雨等



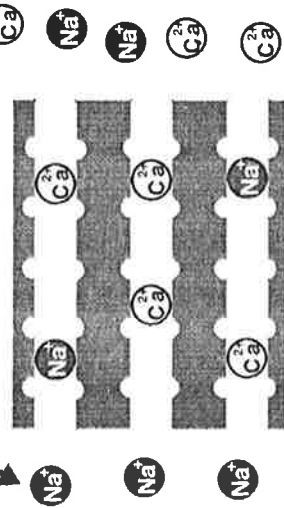
水と塩類は洗脱しにくい!



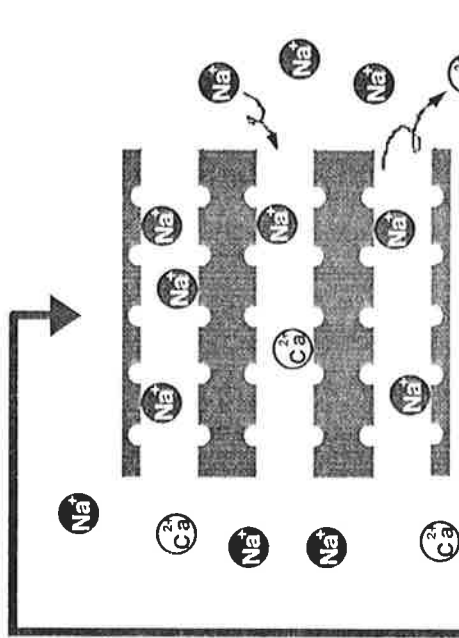
Na吸着/Ca放出は  
比較的抑制

解離イオンとして  
土壌溶液中に存在

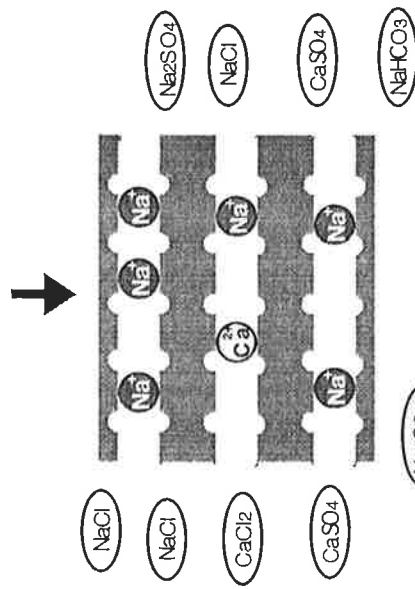
有効濃度低下



水とともに塩類が  
滞留しやすい  
→塩類土壌の生成



土壌塩類化に伴い  
Na吸着/Ca放出に進行



土壌のソーダ質化

+炭酸塩

土壌のアルカリ化

第5-5図 粘質農地の塩類動態

粘質農地では、灌漑によって可溶性塩類は下層に洗脱されにくく、排水をうまく機能させないと、激しい蒸発散により、灌漑水中、肥料中の塩類が土層内に集積されやすい環境下にある。土壌中および灌漑水中の炭酸種イオンが低濃度であれば、蒸発散による塩類の再沈殿の過程で、最終的には $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Cl}^-$ 等によって生成される各種塩類が主体となり、塩類土壌が生成されやすく、アルカリ土壌が生成される危険性は少ないと考えられる。しかし、塩類集積の過程で、灌漑水によるナトリウム塩の付加によって、土壌固相には $\text{Na}^+$ が卓越する。土壌溶液中の塩類濃度の上昇とともに、SARが増加するため、土壌塩類化と同時に土壌ソーダ質化も徐々に進行する。一方、土壌中および灌漑水中に炭酸種イオンが二価陽イオンに対して過剰にある場合は、土壌塩類化過程・ソーダ質化過程と同時に土壌のアルカリ化を引き起こすと考えられた。しかし、砂質土壌に比較してその進行は遅いと考えられた。つまり、砂質土壌に比較して、土壌コロイド物質が多いため、土壌塩類化の過程で土壌固相中の $\text{Na}^+$ が支配的になり、ソーダ質化、そしてアルカリ化が進行すると考えられた。そのことにより、ナトリウム集積/カルシウム溶脱の繰り返しによるナトリウム卓越型アルカリ土壌の生成や、土壌の膨潤・収縮に伴う物理性の悪化が生じ、高分散粘土によって緻密層が形成される等、土壌物理性悪化が進行すると考えられた。

このことは畑作だけではなく水稲作においても同様である。一般的に畑作によって塩類集積を引き起こした土壌は、水田に転換して活用することにより、農地の塩類を洗い流しながら、持続的な作付けを可能とし、優れた営農である。しかし、排水整備が不十分な地域では、塩類の洗脱効果は土壌の性質に大きく関与しており、粘質層が存在すると、灌漑水の透水性の悪化とともに、毛管水上昇によるウォーターロッキングの原因ともなり、土層内に大量の塩類が持ち込まれ、土壌の塩類化を助長させることにもなる。また、水稲作の栽培中、常に水路内に水が存在することによる地下水位の上昇が懸念されるので、このような土地の水稲作栽培は極力避けた方が望ましい。しかし、敢えて水稲作栽培を行うならば、地下水位の上昇を回避するためにも、水路を整備するとともに排水を漏水させないように管理する必要がある。

土壌中のイオン交換反応は、土壌固相に吸着されたイオンと土壌溶液が常に動的平衡に保たれながら推移するので、土壌中の可溶性ナトリウム塩の低下の検討が、ESP

の低下に先立って必要であるといえる。経済的な問題もあるが、農地の塩類化を抑え、除塩効果を高めるために、土層内の粘質な層を破壊するか、暗渠などの排水機能を整備するなどして、地下水位を下げる方策が有効な手段の一つとして考えられた。そのことにより、土壌中のナトリウム塩の洗脱が進行し、土壌塩類濃度を低下させ、ESPも表層土から順次低下させることが期待される。

### 5.5. 長期的視野に立った灌漑農業のあり方

乾燥地で適切な土壌管理、水管理を行う上で最も重要な因子である塩類動態は、土壌の理化学性、灌漑水の水質、量、灌漑方式、管理歴によって異なる。灌漑や蒸発散の繰り返しの影響下で作物生育期間中に土壌断面中の塩類は再分配し、その量および組成はそれぞれ変化している。そのことにより、土壌溶液中の塩類濃度、組成および土壌固相中の吸着塩基量、組成は絶えず変化している。

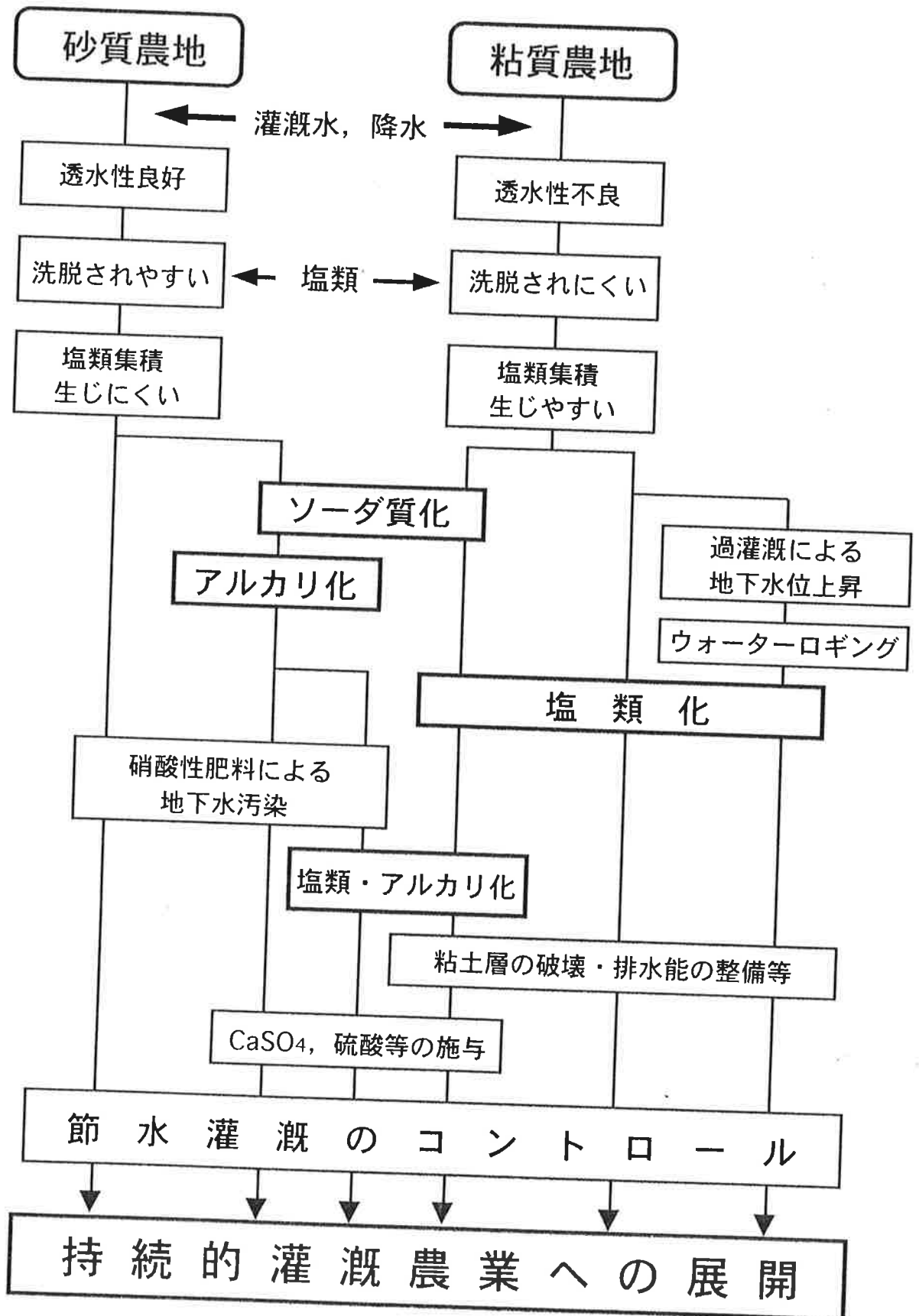
乾燥地における作物生産の安定性は有効な水利用と土壌管理が重要な因子になる。乾燥地の灌漑農業は、絶えず耕作地の塩類化、ソーダ質化、アルカリ化、ウォーターロギングを引き起こしやすい環境にあるため、適切に水・土壌管理を行うことが必要である。灌漑農業によって引き起こされる結果は、その土地条件および耕作条件によって異なっており、それぞれの環境にあわせて展開させていく努力をしなければならない。乾燥地農業に取り組んでいる地域は広く、自然条件は複雑で、土壌塩類の種類やその程度・特徴も異なっており、農業経済状況もまた一様ではない。しかし、いずれの地域においても、早かれ遅かれ、土壌塩類化・アルカリ化が進行しやすい環境下にあるため、作物の生育状況を見極めながら適切な土壌管理・水管理を心掛けなければならない。塩類土壌・アルカリ土壌を有効に改良し利用するためには、土壌資源と水資源を考慮した農業措置を採用する必要がある。土壌改良・肥培・増収の効果を収めなければならない。乾燥地において安定した作物生産を可能にするためには、それぞれの地形、気象などの自然環境との関わりを明確にし、各農地に適した対策を検討するとともに、これらの対策に対しての具体的な指針を提示する必要がある。そのためにも、土壌資源の分布、塩類の集積状況などを適切に把握し、その土地とその時に適した管理を行わなければならない。そして、それぞれの対策や評価について、灌漑農業を営む地域に共通して、地域を超えた比較・検討が必

要である。土壌塩類化・アルカリ化対策を行う上で、各地域の現状や対策に関する知見を統合し、乾燥地で農業生産を長期的視野に立って維持向上させるため、地域に合った有効な対策を見出すことが重要である。

いづれにしても限られた水を有効に利用していく必要がある。灌漑水量が限られており地下水位が低く抑えられている地域で、水質の悪い灌漑水でも十年以上に渡って安定した耕作を営んでいるという事実から、灌漑を節水型のより効率的な方法に変えれば、乾燥地で長期にわたる作物栽培を継続可能であることが示唆される。乾燥地における作物生産の安定性は適切な土壌管理と水管理が重要な因子になるが、これらの地域で営農を長期的に行うためには、これらの灌漑に伴う塩類動態の要因をあらかじめ熟知した上で、作物の生育に必要最低限の灌水を心掛けて農業を展開しなければならない。乾燥地の灌漑農業は、現地で取水可能な水資源を利用せざるを得ない環境下で、いかにその水資源を有効利用するか、そして土壌荒廃に結び付けないかに持続的農業への道は開けている（第5-6図）。

乾燥地、半乾燥地では様々な問題土壌が分布しているが、それらは水と土壌の適切な管理をすることによって、人口爆発と共に今世紀の人類最大課題となる食糧不足を解決する可能性を持っていると考えられる。現地の農民に適切な管理技術を普及させて、現地の生態環境に適応した技術と農業を自主的に展開できる条件を整えることが重要である。

乾燥地で持続的な灌漑農業を展開する。この需要はこれからますます重要であり、積極的に取り組まなければならない課題になっていくであろう。そのためには、農学の分野だけではなく、工学、人文学、社会学、経済学など様々な分野の専門家が共同して取り組んでいかなければならない。



第5-6図 乾燥地における持続的灌漑農業への展開

## 第6章 要約

乾燥地の灌漑農地では、土壌の性質、集積している塩類の量・組成が多様であるため、土壌と水の管理法もそれらによって適応させなければならない。本研究では、乾燥地灌漑農業における水と土壌の適切な管理法確立の一助とするため、水資源の分布・利用様式の大きく異なる二つの乾燥地域を対象として、塩類の溶解平衡論・交換平衡論を理論的手法として用い、灌漑に伴う土壌中の塩類動態と塩類化・アルカリ化のメカニズム解明へアプローチした。

### 1) メキシコ・カリフォルニア半島中央部の灌漑農地

この地域の年降水量は100mm以下であり、灌漑は地下水に依存している。地下水はナトリウム塩（塩化ナトリウム、ナトリウム炭酸塩）を主体としていた。灌漑に伴う土壌中の塩類の動態は、土性によって大きく異なっていた。砂質な農地では、土壌中の塩類は洗脱傾向にあったが、粘質な農地では、Na塩を主体とする塩類が顕著に集積する傾向が認められた。

砂質農地では、塩類は洗脱傾向にあったが、土壌中の塩類組成が大きく変化し、土壌pHが著しく上昇した。わずか1年間の灌漑によってpHが10近くに上昇した農地もあった。これは $\text{Na}^+$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 濃度が高い灌漑水の性質に起因するものであり、Ca塩が洗脱され、土壌溶液中にナトリウム炭酸塩を主体とするNa塩の占める割合が増加した結果であり、SARも上昇した。砂質土壌の分布する管理歴の長い農業地帯の地下水には、高濃度の硝酸が含まれていた。

粘質農地の塩類集積は、主に灌漑水中の塩類、肥料成分によるものであった。利用できる水資源が限られているため、ウォーターロギングが生じるほどの過剰灌漑にはなっていないが、恒常的に地表面が存在しない環境では、洗脱のための水を確保することが困難であるため、土壌に付加された塩類が確実に集積していた。しかし、良質とはいえぬ灌漑水にも関わらず、10年以上農地として利用していることは、節水型のより効率的な灌漑が、長期的な農地利用にいかに重要であるかを示唆していた。

### 2) カザフスタン・シルダリア川下流域の灌漑農地

この地域の年降水量は約120mmで、調査農地は、旧ソ連邦政権下、1960年代から開発された大規模灌漑農地の一つである。大量の灌漑水を河川から利用できるという点で、カリフォルニア半島とは水環境において大きな違いがある。灌

漑に利用する河川水は、ナトリウム塩を多く含むが、カリフォルニア半島の地下水と異なり、硫酸ナトリウムに富むことが特徴的であった。排水不良となりやすい極めて平坦な地形、そして、大量の水を農地に灌漑することになる水稲作を含む輪作体系が、この地域の土壌の塩類化と密接に関係していた。調査農地は深刻な塩類化の状況にあり、30%以上が耕作放棄されていたが、放棄地は点在ではなく、各灌漑ブロック内にまとまって出現していた。表層への塩類集積の量は、下層土の土性と密接に関連していることが明らかであった。下層土が粘質な農地は、表層に極めて多量の塩が集積しており、放棄地の分布は下層土が粘質な土壌の分布とほぼ対応していた。このように、この地域では典型的なウォーターロギングによって、土壌下層から表層へ多量の塩類が移動集積していることが明らかになった。

### 3) 乾燥地土壌中の塩類の溶解特性

土壌中の水分条件によって、塩類の溶解特性が大きく異なっていた。これは、灌漑に伴う塩類の動態および塩類の集積量と組成に大きく影響していた。

一定量の土壌に添加する水の量を変えて、塩類の溶解特性と溶液中のイオンの状態を検討した結果、水添加量が多くなるほど、溶液中のイオン濃度は減少したが、それらは単純な反比例関係ではなかった。これは、難溶性塩類（主にカルシウム塩、マグネシウム塩）の溶解特性に起因していた。

繰り返し計算法によって、土壌水抽出溶液中での各イオンの存在形態について解析を行った結果、溶液中のEC値は、解離イオンの量に反映しており、易溶性塩類を多量に含む土壌ほど、この傾向が著しかった。 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Cl}^-$ 等の一価イオンは水分条件に関わらずほぼ解離イオンとして存在していた。つまり、これらのイオンは、溶液の濃度に関わらず、解離していた。一方、比較的難溶性塩類を形成している $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 等の二価イオンは、水分量が少なくなるほど、イオン対として多く存在していた。つまり、溶液の濃度が高くなると、解離イオンの割合が低下した。そのことにより、作物への吸収阻害が懸念された。

### 4) 土壌固相/溶液相間の化学平衡

灌漑によって溶出される可溶性イオン濃度は、土壌固相の塩基組成に大きく影響を及ぼすことが明らかになった。土壌溶液濃度が低く、SARが大きいほど、拡散二重層の厚さが増加し、分散が引き起こされやすかった。また、粘土含量の増加に伴い、交換性ナトリウムの量は増加したが、ESPは減少した。つまり、粘土含量が高い土壌で

は、土壌固相へ $\text{Ca}^{2+}$ が優先的に吸着されることが明らかになった。

乾燥地土壌中には可溶性塩類が多量に存在しているために、交換性塩基、CECの測定には様々な問題が生じていた。そのため、これまで報告されている $K_c$ の算出には誤差が生じており、低く算出されていた。 $K_c$ は土壌中の粘土含量および土壌溶液の濃度、組成によって大きく異なることが明らかになった。粘土含量が低い土壌ほど $K_c$ は高く、粘土含量が高い土壌ほど $K_c$ は低かった。また、土壌溶液濃度が高いほど $K_c$ が高く、土壌溶液濃度が低いほど $K_c$ が低かった。つまり、陽イオン交換反応は、粘土含量の低い土壌では、 $\text{Na}^+$ 吸着/ $\text{Ca}^{2+}$ 放出に進行しやすく、粘土含量の高い土壌では、 $\text{Na}^+$ 吸着/ $\text{Ca}^{2+}$ 放出は比較的抑えられていた。塩類化の進行した土壌では、土壌溶液のSARの増加が認められたことから、塩類化過程と同時にソーダ質化も急速に進行することが示唆された。

#### 5) 農地における灌漑に伴う塩類動態

砂質農地では、灌漑によって、塩類は洗脱傾向にあった。土壌の陽イオン交換反応は、 $\text{Na}^+$ 吸着/ $\text{Ca}^{2+}$ 放出に進行しやすい環境下であり、ESPが急速に上昇し、ソーダ質土壌を生成しやすいことが明らかになった。さらに、ナトリウム塩（塩化ナトリウム、ナトリウム炭酸塩）を多量に含む灌漑水を利用すると、塩類の洗脱過程で $\text{Na}^+$ が $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ に比較して優勢となり、土壌溶液中のSARおよびpHの上昇が示唆された。このような農地に対しては、液肥に硫酸等を混入させることによって、直接pHを下げる改良が有効である。土壌のアルカリ化・塩類化を抑えつつ作物栽培を行い、作物へ養分を可給化させることが重要である。

粘質農地では、灌漑による塩類の洗脱はされにくく、土層内に塩類集積を引き起こしていた。土壌の陽イオン交換反応は、比較的、 $\text{Ca}^{2+}$ 吸着/ $\text{Na}^+$ 放出に進行しやすい環境であるが、土壌の塩類化とともにESPは増加することが明らかになった。塩類化過程で、 $\text{Na}^+$ 吸着が促進されることによって、ソーダ質土壌が不可逆的に形成されることが示唆された。土壌改良には可溶性ナトリウム塩の低下の検討が、ESPの低下に先立って必要である。したがって、農地に暗渠を入れる等の方策をし、除塩効果を高め、塩類化を抑える事が重要である。

以上の研究により、乾燥地の灌漑農業における土壌塩類化・アルカリ化を誘因する塩類動態は、土壌の性質、土壌中の集積塩類の量、組成および灌漑水質、量、灌漑方式等の要因が複合的に絡み合ったものであり、地域によって異なっていた。



乾燥地で灌漑農業を営む地域では、土壌の塩類化・アルカリ化の解決は共通課題である。農業生産を長期的視野に立って継続するためには、取水可能な水資源の有効利用に最大限の努力を配慮しながら、適切な土壌管理、水管理が必須な条件となる。本論文は、塩類の溶解平衡論・交換平衡論を理論的手法として用い、灌漑に伴う土壌中の塩類動態と塩類化・アルカリ化の機構を明らかにすることが出来た。今後の乾燥地の灌漑農業における適切な改良資材・灌漑水の施与量および時期など、きめ細やかな土壌管理に、この知見が活かされることを期待する。

## 引用文献

- Adams, F. 1971, Ionic Concentrations and Activities in Soil Solutions, *Soil Sci.Soc.Amer.Proc.*, 35, 420~426
- Amrhein, C. and Suarez, D.L.. 1990, Procedure for Determining Sodium-Calcium Selectivity in Calcareous and Gypsiferous Soils. *Soil Sci.Soc.Am,J.* 54, 999~1007
- 浅見輝男 1971, 土壌成分のサンプリング, pp.37~38, 講談社, 東京
- Babcock, K.L., Schulz, R.M. and Overstreet, R. 1959, A Study of the effect of irrigation water composition on soil properties. *Hillgardia*, 29, p.1~57
- Black, C. A. 1965, Method of Soil Analysis Part2, Chemical and Microbiological Properties, No9 Agron., Ame.Soc. of Agron., pp.1387~1388
- Blesler, E., McNeal, B. L. and Carter, D. L. 1982, Saline and Sodic Soils, p.14~22, p.71~72, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York
- Bohn, H., McNeal, B. and O'Connor, G. 1985, Soil Chemistry 2nd Edition, A Wiley-Interscience Publication. p.153~183, 243~244
- Bower, C.A., and Truog, E. 1940, Base exchange capacity determination as influenced by nature of the cation employed and formation of basic exchange salts. *Soil Sci.Soc.Am,J.4*,
- Bower, C.A, Reiteimeier, R.F. and fireman, M. 1952, Exchangeable cation analysis of saline and alkali soils. *Soil Sci.*, 73, 251~261
- Bower, C.A., Wilcox, L.V., Aiken, G.W. and Keyes, M.G. 1965a, An index of the tendency of  $\text{CaCO}_3$  to precipitate from irrigation waters. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 29, 91~92
- Bower, C.A., and Wilcox, L.V. 1965b, Precipitation and solution of calcium carbonate in irrigation operations. *ibid*, 29, 93-94
- Burd, J.S. and Martin, J.C. 1923, Water displacement of soils and soil solution. *J.Agric. Res.*, 13, 265~295
- Cameron, F.K. 1911, The Soil Solution The Chemical Pub.Co., London., p1~136
- Cho, C.M. 1985, Ionic transport in soil with ion-exchange reaction. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49, 1379-1386

- Coleman, N.T. 1953, Thermochemical Study of Ion Exchange. *Soil Sci.* 68, 74~79
- CONAZA. 1993, Caracterization de las zonas aridas y desertificadas de MEXICO (メキシコ国内乾燥地委員会資料)
- Curtin, D., Selles, F. and Steppuhn, H. 1995, Sodium-Calcium Exchange Selectivity as influenced by Soil Properties and Method of Determination. *Soil Sci.* 159, 176~184
- Davis, L.E. 1950, Ionic Exchange and statical Thermodynamics. *J. Coll. Soc.* 5
- 土壤標準分析・測定法委員会編 1986, 土壤標準分析・測定法, pp.14~22, 博友社, 東京
- 土壤養分分析測定法委員会 1986, 土壤養分分析法, p.45~52, 養賢堂, 東京
- Eaton, F.M. and Sokoloff, V.P. 1935, Adsorbed sodium in soils as affected by the soil-water ratio. *Soil Sci.*, 40, 237~274
- FAO 1986, Irrigation and drainage paper 29 Rev. 1, Water quality for agriculture, pp.6~11, 59~64
- FAO, ISRIC and ISSS 1998, World Reference Base for Soil Resources, World Soil Resources Reports 84, FAO Rome
- FAO, UNESCO and WMO 1977, World Map of Desertification at a Scale of 1:25,000,000 with Explanatory Note, p.13, FAO Rome
- Feigenbaum, S., Bartal, A., Portnoy, R. and Sparks, D.L. 1989, Binary and ternary exchange of potassium on calcareous monmorillonitic soils. *Soil Sci. Soc. Am., J.*, 55, 49~56
- 藤井将弘 1992メキシコの農業改革-I, II, 国際農林業協力情報, 14, pp.30~33
- Flenkel, H., and N. Alperovitch. 1984, The effect of mineral weathering and soil solution concentration on ESR-SAR relationship of arid and semi-arid zone soils of Israel. *J. Soil Sci.* 35, 367~372
- Gapon, E.N. 1984, On the Theory of Exchange Adsorption in Soils. pp.147~156, In Levy, R. (ed.) Chemistry of Irrigated Soils. Van Nostland Reinhold Co. Inc.
- Harron, W.R.A., G.R. Webster, and R.R. Cairns, 1983, Relationship between exchangeable sodium and sodium adsorption ratio in a Solonchic soil

- asociation. *Can.J.Soil Sci.*,63,461~467
- Hibbard, P.L. 1923, Composition of the soil solution by displacement method and the water extract of alkali soils. *Soil Sci.*,16,465~471
- Hoagland, D.R.,Martin, J.C. and Stewart, G.R. 1920, Relation of the soil solution to the soil extract. *J.Agric. Res.*,20,381~395
- 本名俊正・山本定博・遠藤常嘉・井上光弘・飯村康二・邸 醒民 1996, 黄河流域・寧夏回族自治区・五星村の灌漑土壌の特徴, 日砂丘誌, 43, 1~8 (1996)
- 市川正己 1988, 世界における砂漠化とその研究の現状, 地理学評論, 61, pp.89~103
- 飯村康二・本名俊正・山本定博・岡崎宏樹・沖田 智 1995, 鳥取県の砂丘における土壌生成, ペドロジスト, 39, 73~83
- 岩田進午, 善田大三 1997, 土の環境圏, p77~81, フジテクノサービス, 東京
- Jackson, M. L. 1958, Soil Chemical Analysis, pp.88~89, Prentice-Hall, Inc.
- Jurinak, J.J., C.Amrhein and Wagenet, R.J. 1984, Sodic hazard: The effect of SAR and salinity in soils and overburden materials. *Soil Sci.* 137, 152-159
- 科学技術庁研究開発局 1989, 砂漠化の機構解明等に関する調査成果報告書, p.94, 昭和63年度科学技術振興調整費
- 亀和田國彦 1991, 土壌溶液イオン組成からのECの推定とアニオン種の違いがECおよび浸透圧に及ぼす影響, 土肥誌, 62, 634~640
- 茅 陽一編 1991, 地球環境工学ハンドブック, p772, オーム社, 東京
- Kelly, W.P. 1939, Effect of dilution on the water soluble and exchangeable bases of alkali soils and its bearing on the salt tolerance of plants. *Soil Sci.*,47,367~375
- Khakimov, F.I. 1989, Soil Melioration conditions of desertification of deltas. , p.218
- レオニード・ドミトリエフ, デルダベク・ナイマノフ, 清水克之 1996, シルダリア川下流域デルタの灌漑農地の実態と使用水量の節減, 農土論, 64, 1023-1028
- レスター・R・ブラウン編・浜中裕徳監訳 2000, 地球白書2000-01, p.66, ダイヤモンド社, 東京
- Levy, R., and D. Hillel. 1976, Thermodynamics equilibrium constants of sodium-calcium exchange in some Israel soils. *Soil Sci.* 106, 393~398

- 前垣内正記・清水優 1990, 砂漠開発の可能性, 土と基礎, 38, 21~26
- Mario, P. and Rhoades, J. D. 1977, Determining Cation Exchange Capacity : A New Procedure for Calcareous and Gypsiferous Soils, *Soil Sci.Soc.Am.J.*, 41, 524~528
- 松本 聰・青木正則 1995, 脱硫石膏を利用した不良土壌の改良と食糧増産, 日エネ, 74, 1023~1029
- 松本 聰 1999, 砂漠化防止対策をめぐる最近の国際的動向 (その2), 土肥誌, 70, 816~823
- 松尾新一郎 1974, 岩石の風化, p.66, 丸善, 東京
- Mcneal, B.L., Oster, J.D. and Hatcher, J.T. 1970, Calculation of electrical conductivity from solution composition data as an aid to IN-SITO estimation of soil salinity. *Soil Sci.* 110, 405~414
- Mehlich. 1939, Use of triethanolamine acetate-barium hydroxide buffer for the determination of some base-exchange properties and lime requirements of soil. *Soil Sci.Soc.Am.Proc.*, 3, 162~166
- Mehra, O. P. and Jackson, M.L. 1960, Iron oxide removal from soils and clays by a ditionite citrate system buffered with sodium bicarbonate. *Clays and Clay Miner.*, 7, 317~327
- Miller, W.P., Flenkel H., and Newman, K.D. 1990, Flocculation concentration and sodium/Calcium exchange of kaolinitic soil clays. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54, 346~351
- 三宅泰雄・北野泰 1991, 新水質化学分析法, p.85~87, 地人書館, 東京
- 水野直治 1984, 水溶液の電気伝導率に対する各種イオン濃度の影響, 土肥誌, 55, 103~108
- Moss, P. 1963, Some Aspects of the Cation Status of Soil Moisture. Pt I. The Ratio law and Soil Moisture Content. *Plant Soil*, 18, 99~113
- Nick, M. and David, T. 1997, World Atlas of Desertification Second Edition, UNEP, London, p. 157
- 日本学術会議 2000, 乾燥地の水田—フィールド科学の展開—, 農業土木学研究連絡委員会シンポジウム資料
- 日本化学会編 1984, 化学便覧・基礎編Ⅱ, p.406~472, 丸善, 東京

- 日本粘土学会編 1987, 粘土ハンドブック 第二版, p115~116, 技報堂, 東京
- 日本砂丘学会 1999, 乾燥地・メキシコ・カルフォルニア半島の自然と農業, p.1,  
市民公開講座資料
- 日本砂丘学会編 2000, 世紀を拓く砂丘研究, p227, 農林統計協会, 東京
- 小田原孝治・和田信一郎 1992, 土壌溶液希釈過程におけるARKの不変性の理論的解析, 土肥誌, 63, 64~71 (1992)
- 荻野芳彦, 筒井 暉 1996, アラル海流域における灌漑農業の展開と環境問題, 農土論, 64, 977-982
- 岡島秀夫・今井弘樹 1976, 土壌の養分供給能に関する研究(第4報), 畑苗代土壌溶液の無機イオン組成と濃度, 土肥誌, 47, 256~262
- 大槻恭一・舩井和朗・矢野友久・河野 洋 1994, メキシコの乾燥地と農業とその開発, 農土誌, 62 (12), 1147~1153
- 長 智男 1973, 乾燥地域の水管理の実際と研究, 砂丘研究, 19, 1~6
- Paliwal, R.V. and Gandhi, A.P. 1976, Effect of salinity, SAR, Ca:Mg ratio in irrigation water, and soil texture on the predictability of exchangeable sodium percentage. *Soil Sci.* 122, 85~90
- Parker, F.W. 1921, Method of studying the concentration and composition of the soils and soil solution. *ibid*,12,209~233
- Paul, J.L.,Tanji, K.K. and Anderson, W.D. 1966, Soil and Saturation Extract Composition by a Computer Method. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 30, 15~17
- Reeve, R.C. and Bower, C.A. 1960, Use of high salt waters as a flocculant and source of divalent cations for reclaiming sodic soils. *Soil Sci.* 90, 139-144
- Reitmeier, R.F. 1946, Effect of Moisture Content on the Dissolved and Exchangeable Ions of Soils of Arid Reagions. *ibid*,61,195~214
- Rhoades, J.D., Nahid A.M., Shouse, P.J. and Alves, W.J. 1989a, Estimating Soil Salinity from Saturated Soil-Paste Electrical Conductivity. *Soil Sci.Soc.Am*,J.53,428~433
- Rhoades, J.D., Nahid A.M, P.J.Shouse, and Alves, W.J. 1989b, Soil Electrical Conductivity and Soil Salinity : New Formulations and Calibrations. *ibid*,53,433~439
- Rhoades, J.D. 1996, Methods of Soil Analysis.Part3 Chemical Methods. SSSA

- Book Series no5,pp.417~435
- Rieu, M., Vaz, R., Cabrera, F. and Moreno, F. 1998, Modelling the concentration or dilution of saline soil-water systems. *European Journal of Soil Science*,49,53~63
- Schofield, R.K. 1947, A ratio law governing the equilibrium of cations in the soil solution. *Proc. Intern. Congr. Pure Appl. Chem.*, 3, 257~261
- 佐々木清一, 長谷川寿喜訳 1979, シェフアー/シャハトシャーベル 土壌学, p110~111, 博友社, 東京
- 千 小乙 1999, 岐阜を考える, 岐阜県産業経済研究センター
- Shainberg, I. 1973, Rate and mechanism of Na-montmorillonite hydrolysis in suspensions. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 37, 689~694
- Shainberg, I., Oster, J.D. and Wood, J.D. 1980, Sodium/Calcium Exchange in Montmorillonite and Illite Suspensions. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44, 960~964
- Shainberg, I. and Letey, J. 1984, Response of soils to Sodic and Saline conditions. *Hilgardia* 52, p.1~57
- Sinanuwong, S. and El-Swaify, S.A.. 1974, Predicting exchangeable sodium ratios in irrigated tropical Vertisols. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 38, 732~737
- Snmner 1996, Methods of Soil Analysis.Part3 Chemical Methods,SSSA Book Series no5,pp.1201~1229
- Soil Survey Staff 1998, Keys to Soil taxonomy Eighth Edition, p.129~148, U.S.D.A. Soil Conservation Service, Washington, D.C.
- Sposito, G. and Holtzclaw, K.M. 1983, Sodium-Calcium and Sodium-Magnesium Exchange on Wyoming Bentonite in Perchlorate and chloride Background Ionic Media. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 47, 51~55
- Sposit, G. 1989, The chemistry of Soil, p.246~267, Oxford University Press, New York
- Suarez, D.L. and Zahow, M.F. 1989, Calcium-Magnesium Exchange Selectivity of Wyoming Montmorillonite in chloride, Sulfate and Perchlorate Solutions. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 53, 52~57
- Suarez, D.L. and Simunek, J. 1997, UNSATCHEM:Unsaturated Water and Solute Transport Model with Equilibrium and Kinetic Chemistry. *ibid*,61,1633

～1646

- 須藤 俊男 1974, 粘土鉱物学, pp.236～239, 岩波書店, 東京
- 大成建設株式会社計画技術部環境計画室 1996, 中央アジア塩類集積土壌の回復技術に関する予備的研究 平成7年度報告書, pp.7-15
- 筒井 暉 1996, アラール海大規模水利開発のもたらしたものの, 農土論, 64, 983-990
- 上田誠也, 杉村 新 1973, 世界の変動帯, p.132～143, 岩波書店, 東京
- UNEP and GCSS 1991, Status of desertification and implementation of the United Nations plan of action to combat desertification, p.88
- Universidad Nacional Autonoma de Mexico. 1992, Carta Geologica de la Republica Mexicana 1:2,000,000
- US Salinity Laboratory Staff 1954, Diagnosis and improvement of saline and alkali soils ; in Agriculture Handbook, No.60, pp.83～100, p.160, United States Department of Agriculture, Washington, D.C.
- Wada, K. and Okamura, Y. 1977, Proceedings of the International Seminar on Soil Environment and Fertility Management in Intensive Agriculture, Tokyo, p.811
- Wada, S.-I. and Seki, H. 1994, A compact computer code for ion speciation in aqueous solutions based on a robust algorithm. *Soil Sci. Soc. Plant Nutr.*,40, 165～172
- Willard, B.L., Oster, J.D. and Hatcher, J.T. 1979, Chemical equilibria in soils. A Wiley-Interscience Publ., New York, 16～17
- ウィリアム・ウェーバー・ジョンソン 1980, 未踏の大自然/バハカリフォルニア, p.34, タイムライフブックス編



## 付表および付図

付表1 メキシコ・カリフォルニア半島中央部・自然土壌の理化学的性質

付表2 メキシコ・カリフォルニア半島中央部・灌漑土壌の理化学的性質

付表3 カザフスタン・シルダリア川下流域・耕作土壌の理化学的性質

付表4 カザフスタン・シルダリア川下流域・放棄土壌の理化学的性質

付表5 カザフスタン・シルダリア川下流域・調査地域の水質

付図 X線回折図

付表1-1 メキシコ・カリフォルニア半島中部・自然土壌の理化学的性質 (1)

調査地点 および深さ (cm)	水分含量 (%)		粒徑組成 (%)			土性	交換性塩基 (cmolc Kg <sup>-1</sup> )			CEC (%)	飽和度 (%)	TNV <sup>※</sup> (%)	pH (1:2.5)	EC (1:5)	水溶性イオン (土:液比=1:5) (mmol(+)L <sup>-1</sup> )					合計									
	湿	乾	粗砂	細砂	微砂		粘土	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>						K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	合計	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>		K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	合計	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>		
ゲレロネグロ・ラグーン近くの低地 (G3)																													
0~8	0.23	0.28	11.55	87.83	0.41	0.22	S	1.35	0.36	0.13	0.13	1.97	0.74	266.2	2.88	9.07	9.01	0.33	0.78	0.16	0.20	1.49	2.64	0.53	0.00	0.70	1.60	2.82	-2.10
8~25	0.27	0.30	9.55	88.56	1.70	0.18	S	2.32	0.34	0.12	0.07	2.85	0.79	360.8	2.70	9.42	9.02	0.11	0.32	0.10	0.11	0.29	0.82	0.09	0.00	0.64	0.26	0.99	-3.12
25~37	0.46	0.35	11.35	87.78	0.64	0.23	S	2.48	0.17	0.08	0.07	2.80	0.72	388.9	2.71	8.58	8.47	1.00	7.63	0.24	0.11	0.47	8.44	8.11	0.00	1.06	0.34	9.51	-0.38
37~45	1.90	1.13	11.05	88.01	0.35	0.60	S	2.56	0.19	0.08	0.06	2.89	1.12	258.0	2.56	8.36	8.21	2.29	13.24	0.39	0.16	1.58	15.38	13.34	0.00	0.00	1.88	15.22	-0.08
45~58	3.27	1.39	10.12	88.51	1.02	0.35	S	2.47	0.19	0.09	0.07	2.82	1.03	273.8	2.65	8.32	8.14	2.58	13.35	0.68	0.26	4.22	18.52	14.81	0.00	0.00	4.38	19.19	-0.06
58~74	5.17	1.54	11.35	85.66	1.48	1.50	S	3.93	0.21	0.12	0.06	4.32	1.99	217.1	2.87	8.46	8.20	3.30	13.56	1.00	0.48	8.65	23.70	11.97	0.55	2.48	11.05	26.05	-0.06
74~90	8.17	1.84	13.33	79.25	3.24	4.17	S	5.14	0.20	0.15	0.08	5.57	3.90	142.8	2.19	8.44	8.16	3.83	14.84	1.53	0.79	16.99	34.14	13.09	1.41	5.07	15.84	35.42	-0.09
90~100	10.50	1.93	18.27	73.03	2.93	5.76	LS	5.51	0.20	0.15	0.08	5.94	6.37	93.2	2.02	8.49	8.19	4.64	15.09	2.06	0.90	24.39	42.44	14.69	0.00	11.85	15.83	42.37	-0.12
100~120+	12.47	0.87	16.71	78.18	2.45	2.66	S	6.03	0.66	0.12	0.08	6.89	3.67	187.7	12.04	8.78	8.51	5.46	16.08	3.03	1.08	36.06	56.26	14.24	0.00	15.90	30.81	60.95	-0.16
ゲレロネグロ・丘陵地 (G4)																													
0~10	0.24	0.24	11.52	87.44	0.62	0.42	S	0.47	0.26	0.15	0.06	0.94	1.10	85.5	2.50	9.12	8.94	0.10	0.40	0.08	0.12	0.21	0.80	0.12	0.08	0.32	0.22	0.74	-2.86
10~20	0.29	0.27	9.24	89.69	0.92	0.15	S	1.06	0.25	0.14	0.05	1.50	1.06	141.5	2.59	9.42	8.97	0.10	0.14	0.06	0.11	0.21	0.52	0.03	0.02	0.26	0.14	0.45	-3.88
20~30	0.31	0.28	9.45	89.58	0.43	0.55	S	1.31	0.27	0.13	0.05	1.76	1.07	164.5	2.75	9.21	8.96	0.09	0.14	0.08	0.09	0.16	0.47	0.12	0.04	0.30	0.10	0.56	-3.29
30~40	0.31	0.24	9.64	89.31	0.88	0.17	S	1.55	0.25	0.11	0.07	1.98	1.04	190.4	2.62	9.02	8.96	0.10	0.20	0.07	0.06	0.34	0.68	0.18	0.04	0.34	0.14	0.70	-2.97
40~50	0.38	0.25	9.90	88.92	0.93	0.26	S	1.99	0.24	0.10	0.07	2.40	1.09	220.2	2.65	8.82	8.77	0.15	0.68	0.10	0.06	0.33	1.17	0.62	0.00	0.50	0.12	1.24	-2.05
50~60	0.26	0.28	8.56	88.46	2.57	0.42	S	2.50	0.26	0.12	0.06	2.94	0.86	341.9	2.77	8.87	8.79	0.14	0.75	0.13	0.08	0.31	1.27	0.72	0.00	0.56	0.14	1.42	-1.95
60~65	0.46	0.30	9.77	87.58	2.48	0.16	S	2.77	0.20	0.12	0.06	3.15	0.88	358.0	2.42	8.59	8.55	0.24	2.25	0.21	0.11	0.54	3.11	2.31	0.00	0.00	0.12	2.43	-1.15
65~85	1.68	1.38	11.43	85.75	2.06	0.76	S	2.69	0.09	0.10	0.06	2.94	1.02	288.2	2.58	8.30	7.90	2.09	13.16	0.26	0.12	0.37	13.92	14.50	0.00	1.81	0.49	16.80	-0.06
85~100+	2.78	1.67	10.77	81.25	4.94	3.04	S	2.81	0.08	0.16	0.06	3.11	3.72	83.6	1.81	8.09	7.69	2.19	13.48	0.29	0.19	0.86	14.81	14.06	0.00	1.12	0.18	15.36	-0.06
ヘスマリア・自然土壌 (J2)																													
0~10	7.86	5.91	0.27	12.31	44.26	43.15	LIC	22.46	9.08	3.13	1.17	35.84	36.80	97.4	4.03	8.76	7.50	0.26	0.29	0.15	0.49	1.26	2.19	0.24	0.00	0.55	1.15	1.93	-2.80
10~21	7.54	3.92	0.95	41.53	32.82	24.70	CL	14.91	6.20	1.89	1.68	24.68	21.24	116.2	2.59	9.32	7.60	0.13	0.07	0.02	0.16	1.40	1.65	0.04	0.00	0.48	1.08	1.59	-4.10
21~30	8.88	5.14	0.19	19.06	46.99	33.76	LIC	19.09	9.22	3.19	0.50	32.00	33.22	96.3	3.07	9.03	7.58	0.17	0.10	0.12	0.40	0.41	1.04	0.03	0.00	0.49	0.47	1.00	-4.05
30~41	9.29	5.07	0.57	25.08	41.81	32.54	LIC	18.08	8.92	2.99	0.09	30.08	31.44	95.7	2.62	8.75	7.53	0.18	0.19	0.19	0.48	0.04	0.91	0.23	0.00	0.57	0.08	0.87	-2.95
41~55	7.30	5.61	0.62	25.02	41.13	33.24	LIC	16.86	8.80	2.77	0.12	28.55	31.31	91.2	2.82	8.72	7.48	0.18	0.20	0.19	0.37	0.12	0.88	0.18	0.00	0.53	0.26	0.97	-2.99
55~82	6.18	4.91	0.69	34.77	37.08	27.46	CL	16.26	7.18	2.10	1.19	26.73	26.82	99.7	2.60	9.17	7.52	0.21	0.05	0.02	0.18	1.13	1.37	0.05	0.00	1.41	0.00	1.46	-6.44
82~100+	3.46	2.32	2.82	69.92	15.61	11.64	SL	9.77	3.48	1.15	0.95	15.35	12.79	120.0	2.60	9.43	7.76	0.17	0.06	0.02	0.14	1.23	1.45	0.05	0.00	0.82	0.35	1.22	-3.98

\*TNVは炭酸カルシウムの百分率として表示した。

付表1-2 メキシコ・カリフォルニア半島中央部・自然土壌の理化学的性質 (2)

調査地点 および深さ (cm)	pH	EC (dS m <sup>-1</sup> )	飽和抽出イオン (cmolc kg <sup>-1</sup> )										SAR
			Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	合計	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	合計	
ゲレロネグロ・ラグーン近くの低地 (G 3)													
0~8	8.31	4.50	0.42	0.17	0.06	0.77	1.42	0.28	0.00	0.23	0.81	1.32	8.24
8~25	8.62	1.20	0.25	0.04	0.04	0.15	0.48	0.22	0.00	0.07	0.15	0.44	2.31
25~37	8.26	3.60	0.99	0.15	0.02	0.24	1.40	1.06	0.00	0.34	0.19	1.59	1.81
37~45	8.18	6.50	1.18	0.30	0.03	0.70	2.21	1.08	0.00	0.49	1.04	2.61	4.73
45~58	8.25	11.40	1.24	0.51	0.06	2.06	3.87	1.32	0.00	0.53	2.41	4.26	12.77
58~74	8.06	18.30	1.32	0.79	0.09	4.38	6.58	1.78	0.00	0.52	4.56	6.86	24.80
74~90	7.61	40.00	1.61	1.27	0.18	7.76	10.82	2.18	0.00	0.45	8.31	10.94	38.37
90~100	7.60	55.00	1.78	1.68	0.23	11.40	15.09	2.44	0.00	0.50	12.38	15.32	50.52
100~120+	7.66	75.00	2.05	2.62	0.35	17.39	22.41	2.81	0.00	0.51	19.12	22.44	65.97
ゲレロネグロ・丘陵地 (G 4)													
0~10	8.58	1.03	0.17	0.08	0.02	0.10	0.37	0.13	0.00	0.14	0.10	0.37	1.71
10~20	8.82	0.63	0.05	0.02	0.02	0.09	0.18	0.03	0.00	0.03	0.07	0.13	2.50
20~30	8.67	0.71	0.12	0.04	0.01	0.07	0.24	0.11	0.00	0.07	0.05	0.23	1.39
30~40	8.54	0.96	0.12	0.04	0.01	0.17	0.34	0.16	0.00	0.10	0.06	0.32	3.51
40~50	8.36	1.69	0.43	0.10	0.01	0.17	0.71	0.57	0.00	0.19	0.04	0.80	1.95
50~60	8.29	2.60	0.71	0.12	0.01	0.15	0.99	0.89	0.00	0.23	0.06	1.18	1.31
60~65	8.30	3.00	0.82	0.15	0.02	0.26	1.25	1.13	0.00	0.17	0.09	1.39	2.20
65~85	8.25	2.70	0.76	0.13	0.01	0.19	1.09	0.97	0.00	0.23	0.07	1.27	1.64
85~100+	8.11	3.40	0.83	0.10	0.02	0.32	1.27	1.13	0.00	0.17	0.12	1.42	2.75
ヘスマリア・自然土壌 (J2)													
0~10	8.58	1.81	0.22	0.15	0.09	0.44	0.90	0.11	0.00	0.30	0.48	0.89	4.99
10~21	8.77	1.19	0.03	0.03	0.02	0.40	0.48	0.04	0.02	0.17	0.28	0.51	11.29
21~30	8.74	0.81	0.07	0.06	0.05	0.17	0.35	0.07	0.01	0.15	0.06	0.29	3.11
30~41	8.52	1.03	0.16	0.14	0.08	0.09	0.47	0.21	0.01	0.09	0.04	0.35	1.13
41~55	8.46	1.23	0.20	0.17	0.06	0.11	0.54	0.17	0.01	0.03	0.13	0.34	1.24
55~82	8.77	1.11	0.04	0.04	0.03	0.34	0.45	0.03	0.01	0.03	0.21	0.28	7.99
82~100+	8.84	1.02	0.02	0.02	0.02	0.36	0.42	0.10	0.01	0.02	0.18	0.31	11.12

付表2-1 メキシコ・カリフォルニア半島中央部・灌漑土壌の理化学的性質 (1)

調査地点 および深さ (cm)	水分含量 (%)		粒徑組成 (%)			土性	交換性陰基 (cmol(+) kg <sup>-1</sup> )				CEC	燻基 飽和度 (%)	TNV* (%)	pH (1:2.5) (H <sub>2</sub> O) (KCl) (dS m <sup>-1</sup> )	EC (1:5)	水溶性イオン (土:液比=1:5)					Si <sub>CaSO4</sub>								
	湿	乾	粗砂	細砂	粘土		Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>						合計	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>		合計	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>			
							(mmol(+) L <sup>-1</sup> )									(mmol(-) L <sup>-1</sup> )													
グレオネグロ・1年間の管理歴の耕作地 (G1)																													
0~10	0.48	0.28	13.93	82.25	2.03	1.79	S	2.14	0.46	0.25	0.11	2.96	1.90	155.8	3.31	8.72	8.55	0.25	0.67	0.17	0.36	0.61	1.80	0.57	0.38	0.70	0.70	2.34	-2.12
10~20	1.15	0.54	16.16	74.74	4.20	4.90	LS	3.58	0.74	0.29	0.13	4.74	3.74	126.7	2.34	9.42	8.35	0.10	0.14	0.07	0.13	0.52	0.85	0.14	0.02	0.32	0.18	0.66	-3.23
20~32	1.37	0.49	17.92	73.69	4.33	4.07	LS	3.13	0.62	0.24	0.09	4.08	3.34	122.2	2.15	9.15	8.29	0.09	0.27	0.06	0.10	0.26	0.69	0.18	0.02	0.26	0.20	0.66	-2.85
32~48	1.75	0.57	16.32	76.17	3.17	4.35	S	3.56	0.50	0.18	0.08	4.32	2.92	147.9	2.00	8.59	8.02	0.26	1.09	0.16	0.10	0.39	1.75	1.10	0.00	0.00	0.20	1.30	-1.65
48~65	4.31	1.04	16.96	79.43	2.49	1.12	S	6.36	0.07	0.08	0.06	6.57	1.81	363.0	13.78	8.10	7.81	2.14	13.53	0.18	0.10	0.34	14.15	12.91	1.23	2.00	0.08	16.22	0.00
65~80	3.55	0.69	15.74	81.83	1.68	0.74	S	5.41	0.12	0.07	0.06	5.66	1.32	428.8	15.04	8.18	7.95	2.07	13.57	0.22	0.09	0.34	14.22	12.55	1.33	1.79	0.06	15.73	-0.01
80~110+	3.52	0.65	19.16	78.12	2.27	0.45	S	3.33	0.15	0.07	0.07	3.62	1.14	317.5	14.16	8.31	8.14	1.61	11.03	0.31	0.14	0.54	12.02	10.61	0.00	1.91	0.18	12.70	-0.20
グレオネグロ・4年間の管理歴の耕作地 (G2)																													
0~12	0.37	0.45	21.83	75.19	1.08	1.91	S	2.30	0.57	0.24	0.08	3.19	1.67	191.0	3.99	8.66	8.55	0.23	0.52	0.18	0.16	0.78	1.64	0.15	0.26	0.34	1.11	1.86	-2.75
12~25	3.03	0.30	22.23	75.23	0.91	1.64	S	1.02	0.52	0.16	0.06	1.76	1.33	132.3	3.05	9.27	8.71	0.08	0.11	0.11	0.13	0.34	0.69	0.11	0.10	0.10	0.28	0.59	-3.44
25~40	3.43	0.31	22.46	76.04	0.68	0.82	S	2.03	0.51	0.19	0.06	2.79	1.32	211.4	2.93	9.36	8.70	0.08	0.05	0.10	0.19	0.23	0.56	0.05	0.04	0.12	0.26	0.47	-4.10
40~55	3.86	0.42	16.45	79.81	0.41	3.33	S	2.21	0.57	0.23	0.07	3.08	1.91	161.3	2.95	9.32	8.63	0.09	0.12	0.09	0.23	0.21	0.66	0.06	0.04	0.30	0.22	0.62	-3.66
55~70	4.84	0.46	17.25	77.53	1.80	3.42	S	3.09	0.71	0.27	0.09	4.16	2.47	168.4	2.52	9.23	8.44	0.10	0.10	0.08	0.22	0.30	0.70	0.13	0.02	0.20	0.20	0.55	-3.40
70~80	4.89	0.53	21.15	71.89	2.84	4.12	S	3.79	0.81	0.30	0.10	5.00	2.65	188.7	2.04	9.57	8.35	0.11	0.11	0.08	0.24	0.35	0.78	0.13	0.04	0.20	0.24	0.61	-3.37
80~93	4.91	0.49	21.86	70.82	3.06	4.26	S	3.74	0.93	0.29	0.08	5.04	2.50	201.6	1.89	9.57	8.33	0.11	0.13	0.08	0.20	0.31	0.72	0.14	0.06	0.28	0.26	0.74	-3.26
93~110+	5.03	0.46	17.74	76.65	2.33	3.28	S	1.01	0.77	0.24	0.07	2.09	2.20	95.0	4.70	9.04	8.38	0.16	0.39	0.15	0.23	0.27	1.04	0.40	0.04	0.26	0.22	0.92	-2.43
ピスカイノ・10年間の管理歴の耕作地																													
0~24	2.08	1.32	40.26	50.32	3.86	5.56	LS	3.48	2.44	1.01	1.28	8.21	7.96	103.1	4.74	8.90	7.58	2.53	0.38	0.12	0.37	1.48	2.36	0.30	1.40	0.67	1.22	3.59	-2.62
24~45	3.11	1.40	41.49	49.66	4.29	4.56	LS	3.51	2.82	0.55	0.93	7.81	7.67	101.8	4.79	9.20	7.53	1.69	0.15	0.14	0.14	1.03	1.45	0.30	0.08	0.04	0.73	1.14	-2.95
45~63/70	3.70	1.33	46.52	47.83	3.37	2.28	S	3.66	2.20	0.56	0.72	7.14	6.94	102.9	4.21	9.60	7.48	0.97	0.24	0.16	0.12	0.73	1.24	0.15	0.06	0.65	0.16	1.02	-3.05
63/70~77	3.38	1.11	63.13	32.38	2.82	1.66	S	2.62	1.65	0.44	0.67	5.38	5.58	96.4	3.52	9.70	7.52	1.01	0.21	0.13	0.12	0.81	1.27	0.14	0.02	0.51	0.16	0.83	-3.13
77~100+	2.85	0.69	76.89	21.28	0.86	0.97	S	2.07	1.00	0.33	0.53	3.93	3.74	105.1	3.70	9.70	7.76	0.79	0.08	0.08	0.08	0.52	0.75	0.13	0.08	0.06	0.12	0.39	-3.51
ヘスマリア・11年間の管理歴の耕作地 (J1)																													
0~10	6.48	4.99	0.69	29.76	35.37	34.19	LIC	18.33	9.54	4.43	2.22	34.52	31.18	110.7	4.74	8.34	7.82	1.55	1.43	1.31	2.45	9.13	14.32	0.28	0.61	12.18	3.11	16.18	-2.35
10~15	7.85	5.19	0.67	29.05	37.21	33.07	LIC	20.60	9.23	2.93	1.59	34.35	32.25	106.5	4.79	8.38	7.73	1.12	1.01	0.76	1.15	5.08	8.00	0.29	0.36	7.89	1.57	10.12	-2.40
15~28	8.73	4.39	0.48	37.08	36.14	26.30	LIC	16.27	7.62	2.97	1.42	28.28	26.62	106.2	4.21	8.42	7.68	0.72	0.55	0.43	0.92	3.84	5.74	0.11	0.11	5.12	0.90	6.24	-2.98
28~45	9.54	3.76	0.53	45.62	33.38	20.48	CL	13.46	6.28	2.97	1.32	24.03	23.78	101.1	3.52	8.53	7.74	0.71	0.44	0.34	1.29	3.46	5.53	0.09	0.00	4.77	0.65	5.51	-3.14
45~55	10.64	3.55	0.72	46.97	31.35	20.96	CL	13.28	6.55	2.96	1.75	24.54	23.67	103.7	3.70	8.57	7.74	0.71	0.35	0.27	1.29	3.82	5.72	0.10	0.02	5.88	1.04	7.04	-3.20
55~68	9.48	3.25	0.89	52.98	27.75	18.39	CL	11.99	5.65	2.94	1.54	22.12	20.85	106.1	3.42	8.82	7.77	0.62	0.28	0.20	1.06	3.53	5.07	0.06	0.00	4.78	0.89	5.73	-3.45
68~80	6.80	2.57	1.41	63.68	21.47	13.44	SL	9.97	4.19	2.72	1.53	18.41	16.00	115.1	3.18	8.91	7.84	0.50	0.14	0.17	0.75	3.00	4.06	0.03	0.00	3.51	1.19	4.73	-4.02
80~110+	5.38	2.02	3.15	72.59	14.75	9.51	SL	8.47	3.08	2.11	1.23	14.89	11.90	125.1	2.87	9.07	7.90	0.40	0.07	0.11	0.55	2.47	3.20	0.02	0.00	2.61	0.71	3.33	-4.46

\*TNVは炭酸カルシウムの百分率として表示した。

付表2-2 メキシコ・カリフォルニア半島中央部・灌漑土壌の理化学的性質 (2)

調査地点 および深さ (cm)	pH	EC (dS m <sup>-1</sup> )	飽和抽出イオン (cmolc kg <sup>-1</sup> )										SAR
			陽イオン					陰イオン					
			Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	合計	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	合計	
ゲレロネグロ・1年間の管理歴 (G1)													
0~10	8.25	3.10	0.44	0.17	0.07	0.30	0.98	0.50	0.00	0.22	0.36	1.08	3.15
10~20	8.78	0.82	0.03	0.02	0.01	0.18	0.24	0.04	0.00	0.09	0.10	0.23	7.38
20~32	8.54	0.78	0.07	0.03	0.01	0.12	0.23	0.08	0.01	0.09	0.10	0.28	3.13
32~48	8.03	2.80	0.70	0.13	0.02	0.20	1.05	0.91	0.00	0.23	0.10	1.24	1.79
48~65	7.83	2.90	0.81	0.07	0.01	0.18	1.07	1.02	0.03	0.23	0.06	1.34	1.61
65~80	7.80	3.00	0.81	0.12	0.01	0.18	1.12	1.07	0.02	0.22	0.06	1.37	1.55
80~110+	7.83	3.20	0.80	0.16	0.01	0.26	1.23	1.15	0.01	0.05	0.07	1.28	2.18
ゲレロネグロ・4年間の管理歴 (G2)													
0~12	8.21	3.20	0.29	0.17	0.03	0.35	0.84	0.11	0.09	0.11	0.51	0.82	4.22
12~25	8.78	0.82	0.05	0.03	0.01	0.13	0.22	0.04	0.03	0.07	0.09	0.23	3.80
25~40	8.70	0.70	0.03	0.02	0.02	0.12	0.19	0.02	0.02	0.07	0.09	0.20	4.45
40~55	8.74	0.75	0.02	0.02	0.02	0.13	0.19	0.02	0.02	0.07	0.09	0.20	5.53
55~70	8.96	0.88	0.02	0.01	0.02	0.18	0.23	0.03	0.02	0.07	0.10	0.22	8.60
70~80	8.65	0.88	0.02	0.01	0.02	0.18	0.23	0.03	0.02	0.10	0.10	0.25	8.76
80~93	8.69	0.88	0.02	0.01	0.01	0.18	0.22	0.03	0.02	0.10	0.10	0.25	8.59
93~110+	8.25	1.79	0.15	0.11	0.03	0.24	0.53	0.38	0.02	0.10	0.08	0.58	3.93
ビスカイノ・10年間以上の管理歴													
0~24	8.07	4.28	0.28	0.19	0.06	0.59	1.12	0.08	0.07	0.29	0.66	1.10	8.08
24~45	8.12	2.66	0.16	0.13	0.02	0.37	0.68	0.09	0.00	0.13	0.41	0.63	6.57
45~63/70	8.26	0.98	0.03	0.03	0.02	0.16	0.24	0.04	0.00	0.01	0.07	0.12	6.54
63/70~77	8.22	1.05	0.03	0.03	0.01	0.17	0.24	0.05	0.01	0.03	0.07	0.16	7.02
77~100+	8.00	0.59	0.02	0.02	0.01	0.15	0.20	0.03	0.01	0.10	0.05	0.19	6.55
ヘスマリア・11年間の管理歴 (J1)													
0~10	8.12	13.20	1.89	1.98	0.55	3.48	7.90	0.19	0.00	0.44	6.26	6.89	12.11
10~15	8.06	9.70	1.45	1.34	0.25	2.35	5.39	0.12	0.00	0.43	4.30	4.85	9.63
15~28	8.01	7.00	0.88	0.80	0.25	1.61	3.54	0.09	0.04	0.31	2.88	3.32	8.47
28~45	7.95	6.70	0.71	0.67	0.33	1.49	3.20	0.08	0.00	0.41	2.66	3.15	8.59
45~55	7.92	6.70	0.68	0.63	0.20	1.68	3.19	0.08	0.01	0.31	2.75	3.15	10.01
55~68	8.04	5.90	0.50	0.43	0.19	1.43	2.55	0.05	0.00	0.41	2.30	2.76	10.03
68~80	8.14	4.70	0.35	0.28	0.17	1.27	2.07	0.03	0.00	0.41	1.81	2.25	10.84
80~110+	8.31	3.40	0.18	0.14	0.13	1.09	1.54	0.03	0.00	0.34	1.17	1.54	12.90

付表3-1 カザフスタン・シルダリア川下流域・耕作土壌の理化学的性質 (1)

調査地点 および深さ (cm)	水分含量		粒径組成				土性 (I.S.S.S.)	交換性塩基					CEC
	湿 (%)	乾 (%)	粗砂 (%)	細砂 (%)	微砂 (%)	粘土 (%)		Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	TOTAL	
							(cmolc kg <sup>-1</sup> )						
メシット (M2)													
0~5/15	13.04	3.00	1.1	34.0	32.8	32.1	LiC	45.50	5.00	0.39	0.20	51.09	11.20
5/15~22	15.68	2.90	1.2	34.2	33.7	30.9	LiC	45.00	4.30	0.42	0.19	49.91	10.90
22~40	15.27	3.50	1.2	33.9	34.5	30.4	LiC	43.70	4.30	0.48	0.31	48.79	11.20
40~44	16.44	2.30	0.1	40.6	38.4	20.9	CL	41.40	2.90	0.29	0.20	44.79	5.90
44~51	14.52	2.30	0.1	56.0	28.4	15.5	CL	39.40	3.00	0.25	0.17	42.82	7.90
51~61	19.78	2.60	0.0	17.0	53.5	29.5	SiC	41.00	2.90	0.31	0.18	44.39	8.30
61~71	21.45	2.30	0.1	14.2	60.2	25.5	SiC	39.80	2.80	0.33	0.19	43.12	10.50
71~83	20.78	2.30	0.3	21.1	55.8	22.8	SiCL	38.20	1.80	0.25	0.17	40.42	6.50
83~90	20.27	1.40	0.1	66.6	22.6	10.7	SL	36.20	2.00	0.20	0.19	38.59	4.70
90~103	21.58	1.70	0.1	46.7	38.8	14.4	L	37.00	2.10	0.22	0.19	39.51	6.20
103~113	20.74	2.00	0.2	34.4	48.5	16.9	SiCL	38.00	1.90	0.24	0.17	40.31	7.80
113~120	20.44	1.70	0.3	49.0	36.0	14.7	L	38.70	1.80	0.22	0.15	40.87	6.40
120~156	20.53	1.10	0.1	77.0	15.1	7.8	SL	34.90	2.20	0.17	0.16	37.43	4.60
メシット (M4)													
0~6	2.13	4.30	3.5	63.6	15.3	17.6	SCL	18.80	3.00	0.46	0.20	22.46	9.30
6~17	5.75	2.20	3.9	63.3	14.8	18.0	SCL	34.50	7.60	0.45	0.20	42.75	11.90
17~28	7.23	2.20	3.8	64.7	14.3	17.2	SCL	34.20	3.60	0.42	0.20	38.42	11.40
28~40	6.12	1.40	1.0	45.6	34.1	19.3	CL	36.90	3.80	0.37	0.20	41.27	6.40
40~47/59	10.37	1.70	0.4	30.1	41.9	27.6	LiC	38.30	3.30	0.36	0.20	42.16	12.30
47/59~73	3.24	0.40	0.5	91.7	5.7	2.1	S	27.70	1.20	0.16	0.10	29.16	2.50
73~84	8.79	0.70	0.4	78.5	14.2	6.9	SL	32.30	1.30	0.18	0.10	33.88	3.60
84~100	6.26	0.50	0.2	89.2	7.1	3.5	LS	29.60	1.40	0.16	0.10	31.26	3.40
100~120	13.36	0.90	0.5	76.5	14.5	8.5	SL	32.60	1.40	0.19	0.10	34.29	5.40
120~140	15.16	1.30	1.1	86.6	8.3	4.0	LS	30.20	1.10	0.17	0.10	31.57	3.70
140~150+	19.39	0.80	0.0	89.0	6.9	4.1	LS	31.40	1.10	0.15	0.10	32.75	3.30

付表3-2 カザフスタン・シルダリア川下流域・耕作土壌の理化学的性質 (2)

深さ (cm)	pH	EC (dS m <sup>-1</sup> )	SP (%)	飽和抽出塩基含量 (cmolc kg <sup>-1</sup> )										SAR (mmol L <sup>-1</sup> ) <sup>-1/2</sup>
				陽イオン					陰イオン					
				Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	TOTAL	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	TOTAL	
メシット (M2)														
0~5/15	7.55	24.2	43.0	1.07	4.93	0.10	11.51	17.61	10.60	0.00	0.26	6.70	17.56	32.20
5/15~22	7.76	17.6	42.4	1.05	3.43	0.08	7.70	12.26	7.70	0.00	0.00	4.30	12.00	25.50
22~40	7.71	16.5	44.6	1.11	2.87	0.07	8.14	12.19	7.60	0.00	0.14	7.10	14.84	28.20
40~44	7.17	18.7	35.9	0.89	2.73	0.06	6.94	10.62	6.60	0.00	0.05	3.90	10.55	28.00
44~51	7.39	16.6	35.3	0.90	2.30	0.05	6.07	9.32	5.70	0.00	0.00	3.40	9.10	26.60
51~61	7.38	17.3	43.8	1.12	2.94	0.06	7.19	11.31	7.40	0.00	0.00	4.40	11.80	25.10
61~71	6.93	16.1	46.9	1.19	3.04	0.05	7.61	11.89	7.20	0.00	0.16	5.60	12.96	25.30
71~83	7.18	16.6	41.4	1.09	2.71	0.05	6.95	10.80	6.50	0.00	0.04	5.60	12.14	25.90
83~90	7.42	16.8	40.0	1.01	2.65	0.05	6.59	10.30	6.20	0.00	0.09	5.20	11.49	25.60
90~103	7.16	17.1	40.4	1.01	2.65	0.05	6.89	10.60	6.50	0.00	0.13	5.80	12.43	26.60
103~113	7.18	17.3	41.5	1.10	2.66	0.05	7.54	11.35	6.70	0.00	0.00	5.70	12.40	28.40
113~120	7.29	16.9	39.2	1.04	2.57	0.04	6.86	10.51	6.40	0.00	0.00	5.30	11.70	27.10
120~156	7.41	15.0	41.8	1.07	2.23	0.04	6.35	9.69	5.80	0.00	0.08	4.30	10.18	26.00
メシット (M4)														
0~6	7.94	50.1	38.6	1.21	13.40	0.22	20.68	35.51	16.80	0.00	0.08	16.40	33.28	37.40
6~17	7.95	8.8	40.2	1.07	1.89	0.05	2.31	5.32	3.70	0.00	0.20	1.80	5.70	10.20
17~28	8.27	9.3	39.5	1.08	1.99	0.05	2.44	5.56	3.70	0.00	0.22	2.00	5.92	10.60
28~40	8.13	7.7	41.8	1.07	1.51	0.05	1.88	4.51	3.30	0.00	0.11	1.70	5.11	8.90
40~47/59	7.52	9.1	49.9	1.32	2.03	0.04	2.87	6.26	4.10	0.00	0.13	2.70	6.93	10.80
47/59~73	7.62	3.3	34.4	0.43	0.44	0.01	0.71	1.59	1.10	0.00	0.08	0.40	1.58	6.60
73~84	7.57	6.3	34.5	0.97	0.83	0.02	1.16	2.98	2.00	0.00	0.07	1.30	3.37	7.60
84~100	7.64	3.4	36.5	0.45	0.39	0.01	1.96	2.81	1.00	0.00	0.08	0.40	1.48	18.40
100~120	7.53	6.6	43.1	1.20	1.06	0.02	2.91	5.19	2.60	0.00	0.07	1.40	4.07	15.10
120~140	7.53	7.4	37.3	1.08	0.99	0.01	1.52	3.60	2.20	0.00	0.06	2.00	4.26	8.80
140~150+	7.53	6.8	39.2	1.09	0.97	0.01	1.49	3.56	2.20	0.00	0.11	1.80	4.11	8.50

付表3-3 カザフスタン・シルダリア川下流域・耕作土壌の理化学的性質 (3)

調査地点 および深さ (cm)	水分含量		粒径組成				土性 (I.S.S.S.)
	湿	乾	粗砂	細砂	微砂	粘土	
イエルタイ (E2)							
0~13	13.67	4.16	0.85	12.35	38.74	48.06	HC
13~24	15.88	4.01	0.89	15.01	38.45	45.65	HC
24~37	14.56	3.66	0.11	18.31	37.21	44.37	LiC
37~48/54	14.44	3.36	1.81	33.87	22.91	41.41	LiC
48/54~56/63	19.18	3.99	0.45	2.94	36.50	60.11	HC
56/63~60/67	13.01	2.77	2.64	48.07	22.38	26.91	LiC
60/67~80	16.67	2.62	0.40	11.34	65.82	22.44	SiCL
80~98	17.57	2.19	1.17	35.79	29.99	33.05	LiC
98~116	17.95	2.06	0.25	27.58	32.60	39.57	LiC
116~150+	19.74	1.55	0.26	55.99	33.43	10.32	L
イエルタイ (E3)							
0~10	4.34	3.47	0.57	15.07	34.87	49.49	HC
10~22	9.38	3.46	0.67	14.06	35.47	49.80	HC
22~35	10.89	3.68	0.40	11.38	44.48	43.74	LiC
35~52	15.85	3.49	0.29	0.77	52.06	46.88	HC
52~66	19.20	3.66	0.02	1.14	42.95	55.89	HC
66~74/83	13.14	2.01	2.66	57.11	20.42	19.81	CL
74/83~95	17.66	1.62	0.52	29.78	53.35	16.35	SiCL
95~116	20.11	1.23	0.16	58.99	29.21	11.64	L
116~140	17.98	1.44	0.70	46.25	27.83	25.22	LiC
140~160+	21.44	2.74	0.12	7.53	69.66	22.69	SiCL

付表3-4 カザフスタン・シルダリア川下流域・耕作土壌の理化学的性質 (4)

調査地点 および深さ (cm)	pH	EC (dS m <sup>-1</sup> )	SP (%)	飽和抽出塩基含量 (cmolc kg <sup>-1</sup> )										SAR (mmol L <sup>-1</sup> ) <sup>-1/2</sup>
				陽イオン					陰イオン					
				Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	TOTAL	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	TOTAL	
イエルタイ (E2)														
0~13	7.62	11.44	70.6	0.96	1.98	0.08	7.40	10.42	3.80	0.24	0.15	5.35	9.54	22.49
13~24	7.58	8.96	66.9	0.86	1.57	0.06	5.03	7.52	3.38	0.00	0.15	3.27	6.80	17.29
24~37	7.64	9.27	72.8	0.92	1.74	0.06	5.84	8.56	3.74	0.00	0.11	3.84	7.69	18.42
37~48/54	7.51	8.94	66.0	0.81	1.39	0.05	5.22	7.47	3.33	0.00	0.26	3.18	6.77	19.04
48/54~56/63	7.49	8.27	95.9	1.16	2.05	0.09	8.22	11.52	4.56	0.00	0.35	4.08	8.99	20.53
56/63~60/67	7.21	10.69	46.7	0.56	1.12	0.06	4.79	6.53	2.63	0.00	0.18	2.61	5.42	23.85
60/67~80	7.22	11.37	66.4	0.82	1.43	0.05	7.37	9.67	3.77	0.00	0.12	4.26	8.15	26.61
80~98	7.32	12.02	55.1	0.67	1.23	0.04	6.52	8.46	3.15	0.00	0.07	3.84	7.06	28.18
98~116	7.37	12.35	55.7	0.66	1.27	0.04	6.89	8.86	3.21	0.00	0.07	4.03	7.31	29.41
116~150+	7.48	14.68	47.1	0.37	1.20	0.04	6.73	8.34	2.59	0.00	0.07	3.79	6.45	34.73
イエルタイ (E3)														
0~10	7.74	9.68	74.6	1.15	1.87	0.08	5.67	8.77	2.83	0.00	0.00	5.90	8.73	16.60
10~22	7.68	5.76	80.1	1.11	1.38	0.07	4.35	6.91	2.46	0.00	0.16	2.94	5.56	13.53
22~35	7.64	7.39	78.8	1.03	1.88	0.07	6.80	9.78	3.50	0.00	0.14	3.23	6.87	19.71
35~52	7.55	6.89	93.1	0.95	1.89	0.05	5.71	8.60	3.49	0.00	0.16	3.00	6.65	15.43
52~66	7.41	7.92	97.5	0.87	1.86	0.04	5.01	7.78	3.73	0.00	0.04	3.06	6.83	13.47
66~74/83	7.40	9.71	43.9	0.41	1.00	0.02	6.11	7.54	2.22	0.00	0.07	1.90	4.19	34.38
74/83~95	7.24	9.20	48.1	0.34	1.05	0.02	6.16	7.57	2.06	0.00	0.04	2.07	4.17	33.42
95~116	7.49	9.96	44.9	0.40	0.91	0.02	4.57	5.90	1.89	0.00	0.05	1.78	3.72	26.48
116~140	7.29	8.92	42.5	0.50	0.96	0.02	4.43	5.91	2.03	0.00	0.02	1.98	4.03	24.97
140~160+	7.59	8.96	58.5	0.81	1.40	0.03	5.55	7.79	3.14	0.00	0.00	2.89	6.03	21.53

付表4-1 カザフスタン・シルダリア川下流域・放棄土壌の理化学的性質 (1)

調査地点 および深さ (cm)	水分含量		粒径組成				土性 (I.S.S.S.)	交換性塩基					CEC
	湿	乾	粗砂	細砂	微砂	粘土		Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	TOTAL	
	(%)		(%)				(cmolc kg <sup>-1</sup> )						
メシット (M1)													
0~6	4.79	4.20	5.40	63.60	16.90	14.10	SL	42.90	7.90	0.50	0.62	51.92	4.60
6~18	8.18	3.50	5.60	68.00	13.60	12.80	SL	43.80	3.50	0.27	0.72	48.29	5.30
18~29	9.29	3.80	6.30	67.80	13.10	12.80	SL	43.30	5.50	0.29	0.47	49.56	5.70
29~34	10.27	3.50	2.30	57.10	22.10	18.50	CL	44.50	5.30	0.50	0.54	50.84	7.50
34~40/44	11.05	3.80	1.10	52.50	24.90	21.50	CL	44.10	5.90	0.57	0.46	51.03	7.80
40/44~50/60	14.10	5.70	1.60	37.00	28.10	33.30	LiC	43.60	7.90	0.75	0.53	52.78	13.50
50/60~75	17.92	8.00	0.30	7.40	56.00	36.30	SiC	44.90	6.80	0.51	0.47	52.68	12.90
75~95	20.30	8.90	0.10	1.10	60.10	38.70	SiC	27.00	9.00	0.40	0.43	36.83	12.10
95~113	20.58	9.90	0.00	0.80	51.80	47.40	HC	48.90	3.20	0.39	0.16	52.65	13.50
113~150+	19.71	7.80	0.00	7.70	56.20	36.10	SiC	43.00	3.30	0.32	0.24	46.86	11.10
メシット (M3)													
0~5	6.86	12.10	0.60	13.20	51.90	34.30	SiC	24.80	8.50	0.31	0.16	33.77	11.70
5~8	15.65	13.70	0.40	11.10	49.40	39.10	SiC	40.80	5.40	0.45	0.21	46.86	12.10
8~17	16.51	4.70	0.70	14.20	47.30	37.80	SiC	41.30	6.00	0.53	0.23	48.06	13.10
17~26	17.03	4.60	0.80	12.50	44.40	42.30	LiC	40.50	5.70	0.51	0.23	46.94	13.80
26~31/34	17.53	4.60	0.60	12.60	48.60	38.20	SiC	40.10	5.20	0.48	0.22	46.00	14.40
31/34~51	18.60	3.60	0.10	1.40	56.40	42.10	SiC	36.40	7.90	0.57	0.33	45.20	20.00
51~65	12.05	1.10	0.00	80.40	12.00	7.60	SL	31.90	3.30	0.22	0.22	35.64	4.30
65~74	20.69	3.30	0.20	5.70	67.00	27.10	SiC	36.60	2.80	0.35	0.19	39.94	10.70
74~96	17.96	1.20	0.20	79.40	14.40	6.00	SL	30.90	2.40	0.22	0.21	33.73	4.40
96~104	22.32	3.10	0.10	6.90	59.50	33.50	SiC	39.50	2.20	0.33	0.18	42.21	14.10
104~127	20.50	0.90	0.10	82.80	11.30	5.80	SL	33.70	2.70	0.20	0.21	36.81	5.00
127~134	22.55	2.90	0.10	15.30	54.90	29.70	SiC	39.00	3.00	0.35	0.20	42.55	12.20
134~147	22.34	1.40	0.00	62.00	28.70	9.30	L	32.80	3.10	0.24	0.23	36.37	6.80
147~170+	23.94	3.10	0.20	3.80	61.00	35.00	SiC	35.00	2.70	0.36	0.20	38.26	16.80

付表4-2 カザフスタン・シルダリア川下流域・放棄土壌の理化学的性質 (2)

調査地点 および深さ (cm)	pH	EC (dS m <sup>-1</sup> )	SP (%)	飽和抽出塩基含量 (cmolc kg <sup>-1</sup> )										SAR (mmol L <sup>-1</sup> ) <sup>-1/2</sup>
				陽イオン					陰イオン					
				Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	TOTAL	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	TOTAL	
メシット (M1)														
0~6	7.56	155.0	20.8	0.26	22.69	0.72	97.81	121.48	18.10	0.00	0.05	103.00	121.15	201.20
6~18	7.54	50.1	22.1	0.98	5.70	0.18	18.15	25.01	5.80	0.00	0.02	18.90	24.72	69.60
18~29	7.39	42.2	22.0	0.92	5.01	0.14	14.85	20.92	5.80	0.00	0.03	15.20	21.03	60.70
29~34	7.36	48.6	21.9	0.88	6.26	0.13	17.62	24.89	6.60	0.00	0.03	18.10	24.73	65.30
34~40/44	7.67	46.5	23.7	0.94	6.40	0.14	17.92	25.40	7.00	0.00	0.04	17.70	24.74	62.90
40/44~50/60	7.72	49.2	30.7	1.21	8.80	0.16	23.35	33.52	10.20	0.00	0.07	23.10	33.37	61.60
50/60~75	7.45	47.5	39.9	1.54	11.89	0.15	29.32	42.90	13.50	0.00	0.03	30.30	43.83	58.50
75~95	7.84	48.1	42.1	1.52	12.56	0.16	31.24	45.48	15.50	0.00	0.01	30.50	46.01	59.20
95~113	7.84	47.3	48.4	1.73	13.48	0.16	34.81	50.18	18.20	0.00	0.03	31.80	50.03	59.30
113~150+	7.59	51.5	41.3	1.43	11.78	0.13	30.34	43.68	16.50	0.00	0.06	27.10	43.66	59.90
メシット (M3)														
0~5	7.09	143.2	42.2	0.44	59.06	0.91	141.26	201.67	86.40	0.00	0.02	136.00	222.42	109.00
5~8	7.35	83.2	45.8	2.20	25.67	0.51	63.30	91.68	17.60	0.00	0.02	47.90	65.52	69.30
8~17	7.31	42.2	64.9	2.38	10.28	0.24	29.20	42.10	12.60	0.00	0.00	26.70	39.30	45.90
17~26	7.32	37.8	65.8	2.36	8.81	0.21	26.18	37.56	12.30	0.00	0.00	23.60	35.90	43.80
26~31/34	7.30	34.4	64.2	2.19	7.42	0.17	23.47	33.25	11.50	0.00	0.00	19.80	31.30	43.10
31/34~51	7.28	32.2	70.6	2.26	6.73	0.14	23.54	32.67	11.90	0.00	0.00	19.80	31.70	43.30
51~65	7.05	29.0	40.9	1.13	3.17	0.06	11.86	16.22	6.20	0.00	0.01	10.00	16.21	42.10
65~74	7.03	30.1	58.9	1.80	4.36	0.10	19.29	25.55	9.90	0.00	0.10	15.00	25.00	47.40
74~96	7.28	30.8	40.7	1.18	3.33	0.07	12.69	17.27	7.00	0.00	0.00	10.30	17.30	44.00
96~104	7.20	25.3	56.4	1.62	3.26	0.08	14.81	19.77	8.70	0.00	0.01	11.20	19.91	42.30
104~127	7.57	26.0	41.9	1.03	2.68	0.06	11.52	15.29	6.60	0.00	0.08	8.10	14.78	43.90
127~134	7.16	22.9	54.9	1.52	2.57	0.07	12.87	17.03	8.10	0.00	0.00	9.30	17.40	41.30
134~147	7.41	24.1	43.7	1.18	2.10	0.06	11.98	15.32	6.80	0.00	0.00	7.80	14.60	48.50
147~170+	7.42	20.8	58.5	1.53	2.61	0.07	12.43	16.64	8.70	0.00	0.05	8.20	16.95	38.30



付表4-3 カザフスタン・シルダリア川下流域・放棄土壌の理化学的性質 (3)

調査地点 および深さ (cm)	水分含量		粒径組成				土性 (I.S.S.S.)	交換性塩基					CEC
	湿	乾	粗砂	細砂	微砂	粘土		Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	TOTAL	
	(%)	(%)	(%)				(cmolc kg <sup>-1</sup> )						
サルタバーン (C1)													
0~8	6.20	5.50	1.10	26.80	38.80	33.30	LiC	97.80	10.50	0.12	0.60	109.02	11.20
8~14	14.80	13.70	0.90	18.10	43.90	37.10	LiC	91.20	7.70	0.15	0.30	99.35	11.40
14~20	15.88	6.70	1.50	6.70	46.40	45.40	HC	47.70	4.70	0.16	0.20	52.76	14.10
20~32	16.25	4.90	0.10	2.30	52.30	45.30	HC	43.10	4.70	0.18	0.20	48.18	13.30
32~49	17.12	4.60	0.40	2.10	53.40	44.10	SiC	41.40	3.70	0.17	0.20	45.47	13.80
49~70	18.94	5.00	0.10	0.90	47.10	51.90	HC	42.80	4.90	0.18	0.20	48.08	17.70
70~89	20.71	4.50	0.10	0.60	48.30	51.00	HC	42.00	3.70	0.17	0.20	46.07	17.10
89~99/104	22.46	4.10	0.00	0.50	43.60	55.90	HC	42.00	3.60	0.18	0.20	45.98	18.80
99/104~103/108	24.57	4.20	0.40	2.20	43.20	54.20	HC	43.30	3.20	0.17	0.20	46.87	18.00
103/108~114	21.37	2.00	0.10	18.60	63.60	17.70	SiCL	34.60	2.80	0.10	0.20	37.70	6.90
114~130	22.84	3.00	0.00	1.40	36.20	62.40	HC	39.30	3.00	0.15	0.20	42.65	11.40
130~150	21.40	2.20	0.00	7.70	70.20	22.10	SiCL	36.10	2.70	0.12	0.20	39.12	8.00
サルタバーン (C2)													
0~3	5.00	3.11	0.30	40.20	35.80	23.70	CL	54.80	9.60	0.35	0.70	65.45	7.00
3~7	12.68	11.30	0.30	43.60	34.70	21.40	CL	46.00	8.20	0.39	0.40	54.99	7.30
7~13	13.22	4.90	0.20	46.90	33.40	19.50	CL	36.90	6.00	0.45	0.40	43.75	7.50
13~21	13.57	3.30	0.10	29.50	45.60	24.80	SiCL	38.90	6.00	0.55	0.50	45.95	8.90
21~28/32	15.55	2.80	0.10	27.90	50.00	22.00	SiCL	36.30	5.10	0.48	0.40	42.28	7.70
28/32~50	16.03	1.80	0.00	59.90	29.60	10.50	L	31.70	4.20	0.34	0.30	36.54	7.50
50~65/71	16.12	1.60	0.00	68.00	24.30	7.70	SL	29.60	3.30	0.29	0.30	33.49	5.00
65/71~79	20.20	2.00	0.10	22.50	62.40	15.00	SiCL	34.40	4.90	0.36	0.30	39.96	6.70
79~92	20.90	2.40	0.10	17.90	62.30	19.70	SiCL	36.30	3.20	0.35	0.30	40.15	8.90
92~105	20.45	2.80	0.60	1.80	68.00	29.60	SiC	35.70	4.20	0.47	0.30	40.67	11.90
105~118	20.39	3.30	0.00	1.80	60.30	37.90	SiC	39.60	4.40	0.53	0.30	44.83	14.10
118~128/135	23.13	3.40	29.30	13.80	32.20	24.70	CL	37.70	5.90	0.56	0.30	44.46	15.70
128/135~150+	19.86	1.80	20.50	26.90	36.90	15.70	CL	35.80	3.00	0.30	0.30	39.40	6.60

付表4-4 カザフスタン・シルダリア川下流域・放棄土壌の理化学的性質 (4)

調査地点 および深さ (cm)	EC (dS m <sup>-1</sup> )	SP (%)	飽和抽出塩基含量 (cmolc kg <sup>-1</sup> )										SAR (mmol L <sup>-1</sup> ) <sup>1/2</sup>	
			pH	陽イオン					陰イオン					
				Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	TOTAL	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>		TOTAL
サルタバーン (C1)														
0~8	8.16	120.3	45.0	0.62	25.04	0.59	125.87	152.12	117.80	0.00	0.22	61.30	179.32	155.8
8~14	7.86	70.9	45.4	1.89	18.61	0.37	50.97	71.84	20.00	0.00	0.14	33.00	53.14	65.5
14~20	7.62	53.6	57.9	2.14	12.20	0.29	37.55	52.18	13.90	0.00	0.07	31.40	45.37	57.0
20~32	7.38	42.2	66.8	2.64	9.71	0.21	31.63	44.19	12.70	0.00	0.16	27.10	39.96	50.0
32~49	7.49	37.2	60.6	2.28	7.41	0.15	25.17	35.01	10.80	0.00	0.08	20.90	31.78	47.3
49~70	7.50	32.5	70.4	2.45	7.44	0.13	28.05	38.07	12.60	0.00	0.15	20.30	33.05	48.7
70~89	7.46	24.7	70.9	2.29	4.92	0.10	18.16	25.47	10.20	0.00	0.04	14.50	24.74	37.8
89~99/104	7.42	18.8	74.8	2.24	4.09	0.08	13.48	19.89	9.10	0.00	0.27	10.50	19.87	29.6
99/104~103/108	7.59	17.8	69.3	2.05	3.44	0.07	12.23	17.79	8.30	0.00	0.11	8.80	17.21	30.0
103/108~114	7.26	16.9	51.6	1.51	2.47	0.04	7.76	11.78	5.60	0.00	0.00	6.50	12.10	26.3
114~130	7.36	13.5	72.7	2.01	2.72	0.05	8.39	13.17	7.20	0.00	0.02	6.40	13.62	22.2
130~150	7.28	12.6	57.8	1.59	2.12	0.03	6.04	9.78	5.60	0.00	0.04	4.50	10.14	20.4
サルタバーン (C2)														
0~3	7.94	124.8	42.0	0.81	34.63	1.21	205.18	241.83	127.10	0.00	0.20	73.10	200.40	219.0
3~7	7.80	119.1	41.2	1.47	31.98	1.23	127.39	162.07	41.10	0.00	0.09	77.90	119.09	128.6
7~13	7.79	64.4	42.2	2.12	11.85	0.55	34.48	49.00	11.30	0.00	0.05	33.80	45.15	60.7
13~21	7.70	49.2	47.5	2.17	8.55	0.38	26.28	37.38	8.40	0.00	0.10	26.10	34.60	52.0
21~28/32	7.70	49.4	47.7	1.83	8.00	0.17	25.28	35.28	8.70	0.00	0.05	25.80	34.55	52.3
28/32~50	7.66	52.5	40.8	1.69	8.17	0.21	25.22	35.29	8.90	0.00	0.06	23.80	32.76	56.7
50~65/71	7.60	45.1	43.4	1.88	7.45	0.29	23.04	32.66	9.20	0.00	0.07	19.70	28.97	52.3
65/71~79	7.05	41.5	47.8	1.85	5.66	0.14	22.30	29.95	8.70	0.00	0.03	19.70	28.43	54.2
79~92	7.31	30.6	51.7	1.93	4.20	0.11	16.42	22.66	7.60	0.00	0.06	14.40	22.06	43.2
92~105	7.20	20.9	60.7	1.98	3.40	0.09	12.12	17.59	6.90	0.00	0.09	10.60	17.59	31.8
105~118	7.13	17.7	68.7	2.19	3.12	0.09	11.21	16.61	7.30	0.00	0.06	9.70	17.06	28.2
118~128/135	7.51	22.3	47.5	1.47	3.57	0.09	10.41	15.54	7.00	0.00	0.10	8.40	15.50	30.7
128/135~150+	7.37	19.0	46.3	1.44	2.60	0.07	8.10	12.21	5.20	0.00	0.05	7.00	12.25	28.3

付表4-5 カザフスタン・シルダリア川下流域・放棄土壌の理化学的性質 (5)

調査地点 および深さ (cm)	水分含量		粒径組成				土性 (I.S.S.S.)
	湿	乾	粗砂	細砂	微砂	粘土	
	(%)		(%)				
イエルタイ (E1)							
0~10	3.55	3.16	0.73	14.07	51.06	34.14	SiC
10~19	9.29	3.56	0.24	12.27	50.45	37.04	SiC
19~28	10.24	3.97	0.19	11.00	50.48	38.33	SiC
28~39	10.98	3.81	0.14	10.44	55.04	34.38	SiC
39~48	8.77	2.55	0.06	2.31	72.72	24.91	SiCL
48~65	12.30	3.24	0.06	1.92	64.64	33.38	SiC
65~80	18.61	3.81	0.04	0.15	41.24	58.57	HC
80~93	18.59	4.85	0.07	0.30	35.81	63.82	HC
93~112	20.92	5.42	0.19	0.69	38.19	60.93	HC
112~130+	12.86	2.43	9.31	57.51	12.64	20.54	SCL

付表4-6 カザフスタン・シルダリア川下流域・放棄土壌の理化学的性質 (6)

調査地点 および深さ (cm)	EC (dS m <sup>-1</sup> )	SP (%)	飽和抽出塩基含量 (cmolc kg <sup>-1</sup> )											SAR (mmol L <sup>-1</sup> ) <sup>-1/2</sup>
			陽イオン						陰イオン					
			Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	TOTAL	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	TOTAL		
イエルタイ (E1)														
0~10	7.33	17.93	68.3	0.97	2.45	0.11	12.99	16.52	4.69	0.02	0.08	8.69	13.48	37.40
10~19	7.66	10.85	57.9	0.72	1.54	0.06	6.76	9.08	3.44	0.07	0.06	3.19	6.76	25.95
19~28	7.57	10.43	57.5	0.73	1.40	0.05	5.74	7.92	3.23	0.08	0.06	2.86	6.23	22.73
28~39	7.60	8.65	56.6	0.73	1.08	0.05	4.76	6.62	2.84	0.06	0.14	2.68	5.72	20.63
39~48	7.48	8.39	68.0	0.82	1.16	0.06	5.67	7.71	3.10	0.00	0.04	2.70	5.84	21.57
48~65	7.42	9.76	57.5	0.71	1.13	0.05	5.31	7.20	3.16	0.05	0.08	2.73	6.02	22.71
65~80	7.23	8.94	81.6	1.04	1.51	0.07	7.05	9.67	4.26	0.07	0.23	3.55	8.11	21.44
80~93	7.39	9.79	76.5	0.94	1.53	0.08	7.31	9.86	5.06	0.08	0.02	4.29	9.45	23.20
93~112	7.42	10.03	75.5	0.94	1.55	0.08	7.46	10.03	4.40	0.07	0.02	4.07	8.56	23.66
112~130+	7.36	14.33	33.3	0.44	0.99	0.04	4.91	6.38	2.38	0.05	0.21	2.97	5.61	31.43

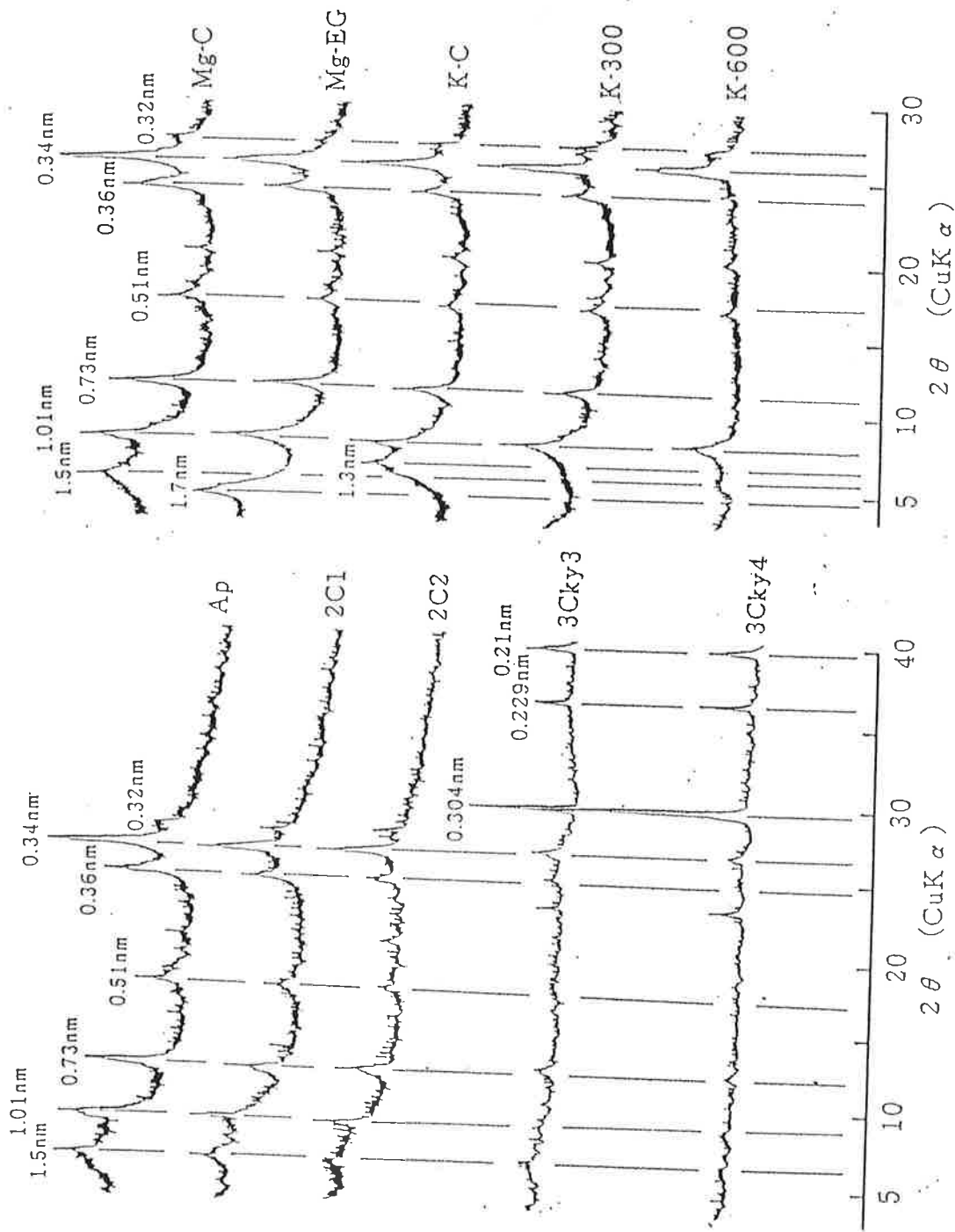
付表5 カザフスタン・シルダリア川下流域・調査地域の水質

採水地点	pH	EC (dS m <sup>-1</sup> )	陽イオン					陰イオン					SAR
			Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	TOTAL	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	TOTAL	
1998.AUGUST													
運河水 コミュニズム水路	8.0	1.6	5.4	6.4	0.1	7.6	19.5	12.6	0.0	0.0	7.2	19.8	3.1
河川水 シルダリア川	8.0	1.5	4.6	5.6	0.1	6.6	16.9	11.2	0.0	0.0	5.7	16.9	2.9
C U.G.W. 断面C-1地下水(150cm)	7.9	21.1	27.3	60.8	0.7	196.4	285.2	163.5	0.0	0.0	144.8	308.3	29.6
E D.W. 幹線排水路下流端近く	7.7	3.0	8.5	13.8	0.2	15.2	37.7	24.4	0.0	0.0	13.1	37.5	4.6
E F.W. 調査圃場 田面水	7.9	1.8	6.2	7.3	0.2	8.7	22.4	14.0	0.0	0.0	7.8	21.8	3.3
E D.W. 放棄農地横排水路	7.9	4.4	19.2	18.3	0.5	20.9	58.9	43.7	0.0	0.0	25.1	68.8	4.8
E U.G.W. ボーリング孔No.2	7.6	4.1	23.3	20.8	0.6	17.3	62.0	43.6	0.0	0.0	26.0	69.6	3.7
M U.G.W. 実証圃場 地下水	7.7	65.4	28.3	87.1	3.2	982.6	1101.2	620.9	0.0	0.0	608.1	1229.0	129.4
飲料水 ジャガラシ宿舍	8.3	2.2	0.5	0.3	0.1	23.2	24.1	10.7	0.0	4.7	8.6	24.0	36.7
1997.JUNE													
河川水 シルダリア川・カザリンスク	8.1	1.6	5.2	5.9	0.4	6.7	18.2	12.3	0.0	0.0	5.6	17.9	2.8
海水 アラル海	8.1	52.4	39.3	240.7	34.0	576.7	890.7	64.2	8.8	0.0	112.4	185.4	48.7
C U.G.W. サルタバーン-1	8.0	13.9	21.6	78.4	0.6	101.3	201.9	152.7	0.0	0.0	54.6	207.3	14.3
C U.G.W. サルタバーン-3	8.1	3.0	20.3	153.8	0.3	274.1	448.5	258.9	0.0	0.0	219.7	478.6	29.4
C U.G.W. 断面C-1湛水下地下30cm	8.2	3.7	21.2	14.2	0.7	12.4	48.5	35.9	0.0	0.0	15.9	51.8	2.9
E F.W. 断面E-2	8.1	6.2	22.9	27.1	0.4	31.0	81.4	58.6	0.0	0.0	38.1	96.7	6.2
E D.W. メイン排水路	8.1	3.0	8.4	11.8	0.8	13.1	34.1	24.6	0.1	0.0	14.0	38.7	4.1
E U.G.W. 断面E-1湛水下地下40cm	8.3	1.7	7.3	8.0	0.6	10.0	25.9	19.1	0.0	0.0	12.2	31.3	3.6
M I.W. メイン水路	8.1	2.2	6.8	9.8	1.0	17.0	34.6	19.5	0.2	0.0	6.5	26.2	5.9
M U.G.W. 放棄田(小用水路横)	8.1	8.3	26.6	33.8	0.6	50.7	111.7	76.0	0.0	0.0	33.7	109.7	9.2
M U.G.W. 乾地M-2(実証圃場)砂層	8.0	10.8	29.1	60.3	0.5	87.1	177.0	111.2	1.7	0.0	66.5	179.4	13.0
M U.G.W. 実証圃場 地下水	7.6	73.0	27.5	437.0	5.1	867.8	1337.4	633.5	0.0	0.0	795.9	1429.4	56.9
1997.AUGUST													
河川水 シルダリア川	7.6	1.7	5.6	5.9	0.2	5.9	17.6	13.9	0.0	0.0	4.5	18.4	2.5
運河水 コミュニズム運河	7.6	2.1	6.3	8.5	0.2	8.6	23.6	16.0	0.0	0.0	7.9	23.9	3.2
C D.W. 排水路	7.7	3.9	11.8	16.3	0.3	18.9	47.3	33.8	0.0	0.0	16.1	49.9	5.0
C F.W. 田面水①	7.8	2.2	7.1	9.2	0.2	7.7	24.2	17.4	0.0	0.0	6.5	23.9	2.7
C D.W. 排水湖への出口(排水路)	7.9	3.0	9.1	11.6	0.2	13.3	34.2	23.7	0.0	0.0	12.6	36.3	4.1
C E.P.W. 排水湖	7.9	3.0	8.8	12.3	0.2	13.5	34.8	24.5	0.0	0.0	12.5	37.0	4.2
C U.G.W. 排水湖(ホール)	7.7	18.6	26.8	75.6	1.4	154.3	258.1	156.9	0.0	0.0	112.2	269.1	21.6
C U.G.W. 排水湖ヨシ原(ホール)	7.6	14.1	24.2	75.4	1.6	103.8	205.0	156.5	0.0	0.0	55.4	211.9	14.7
C F.W. 田面水②	7.8	2.2	6.8	9.1	0.2	15.1	31.2	16.8	0.0	0.0	6.0	22.8	5.4
E D.W. 中央排水路(南端)	7.9	3.7	12.1	17.3	0.2	16.3	45.9	30.5	0.0	0.0	14.8	45.3	4.3
E I.W. 用水路	7.8	2.9	9.3	11.3	0.3	12.4	33.3	22.4	0.0	0.0	12.2	34.6	3.9
E F.W. 水田地帯北端放棄田田面水	7.6	3.8	13.7	14.1	0.4	18.5	46.7	31.7	0.0	0.0	19.9	51.6	5.0
E F.W. 放棄田隣接水田田面水	7.8	3.1	7.4	12.7	0.2	14.9	35.2	24.9	0.0	0.0	13.1	38.0	4.7
E F.W. 水田地帯中央水田田面水	7.8	2.9	9.0	10.9	0.3	12.7	32.9	21.8	0.0	0.0	12.6	34.4	4.0
E F.W. E-7.ホール横水田田面水	7.9	2.6	9.1	10.0	0.2	10.4	29.7	20.0	0.0	0.0	11.1	31.1	3.4
E U.G.W. 水田地下水採水用ホール	7.8	2.2	7.2	9.1	0.2	9.0	25.5	16.3	0.0	0.0	9.1	25.4	3.2
E D.W. 水田排水路	7.8	3.2	10.0	12.7	0.2	14.8	37.7	24.8	0.0	0.0	12.7	37.5	4.4
E C.W. Елтай運河	7.7	2.1	6.3	8.6	0.2	8.8	23.9	16.1	0.0	0.0	7.4	23.5	3.2
E U.G.W. 断面E-3.地下水(160cm)	7.7	16.1	25.4	87.6	0.6	125.2	238.8	161.4	0.0	0.0	76.8	238.2	16.7
M C.W. Мечет運河	7.9	2.4	6.9	9.9	0.2	10.8	27.8	18.3	0.0	0.0	9.6	27.9	3.7
M U.G.W. 放棄田地下水	7.4	8.6	26.9	38.5	0.7	65.5	131.6	77.7	0.0	0.0	47.6	125.3	11.5
M I.W. 実証圃場灌漑水	7.7	2.4	7.0	8.6	0.2	10.2	26.0	18.1	0.0	0.0	9.0	27.1	3.7
M E.P.W. 排水湖	7.8	5.2	15.3	23.9	0.5	26.7	66.4	47.5	0.0	0.0	24.3	71.8	6.0
飲料水 ジャガラシ, 水くみ場	7.3	2.2	0.5	1.3	0.1	18.9	20.8	9.9	0.0	0.0	7.6	17.5	19.9
飲料水 イリコリ村, 飲料水	8.1	3.2	0.7	0.5	0.1	27.6	28.9	11.2	0.0	0.0	15.6	26.8	35.6

M=メシット地区 E=イエルタイ地区 C=サルタバーン地区

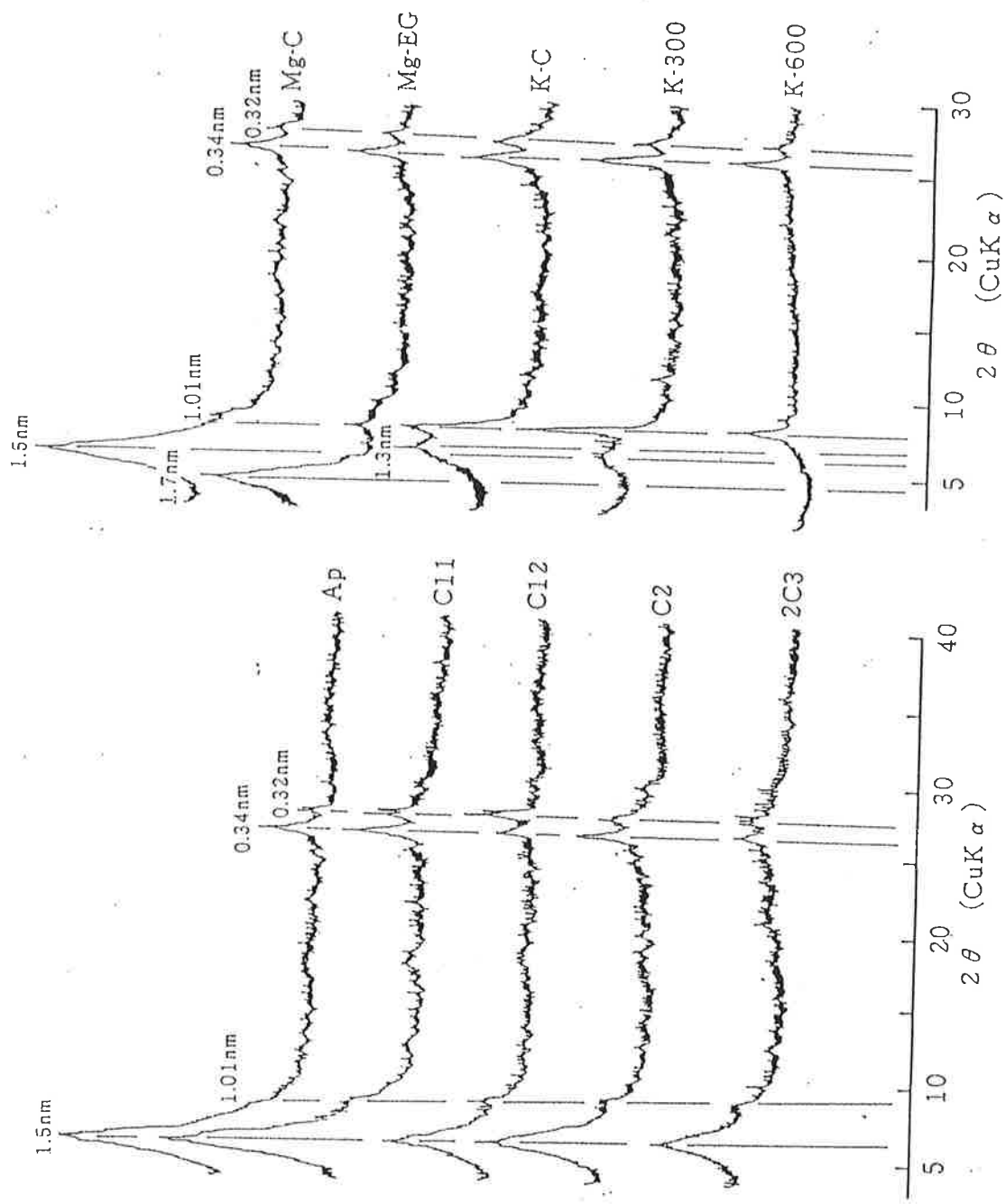
U.G.W.=the Under Ground Water (地下水) I.W.=the Irrigation Water (灌漑水) D.W.=the Drained Water (排水)

F.W.=the Flooded Water (田面水) C.W.=the Canal Water (運河水) E.P.W.=the Evaporation Pond Water (排水湖水)



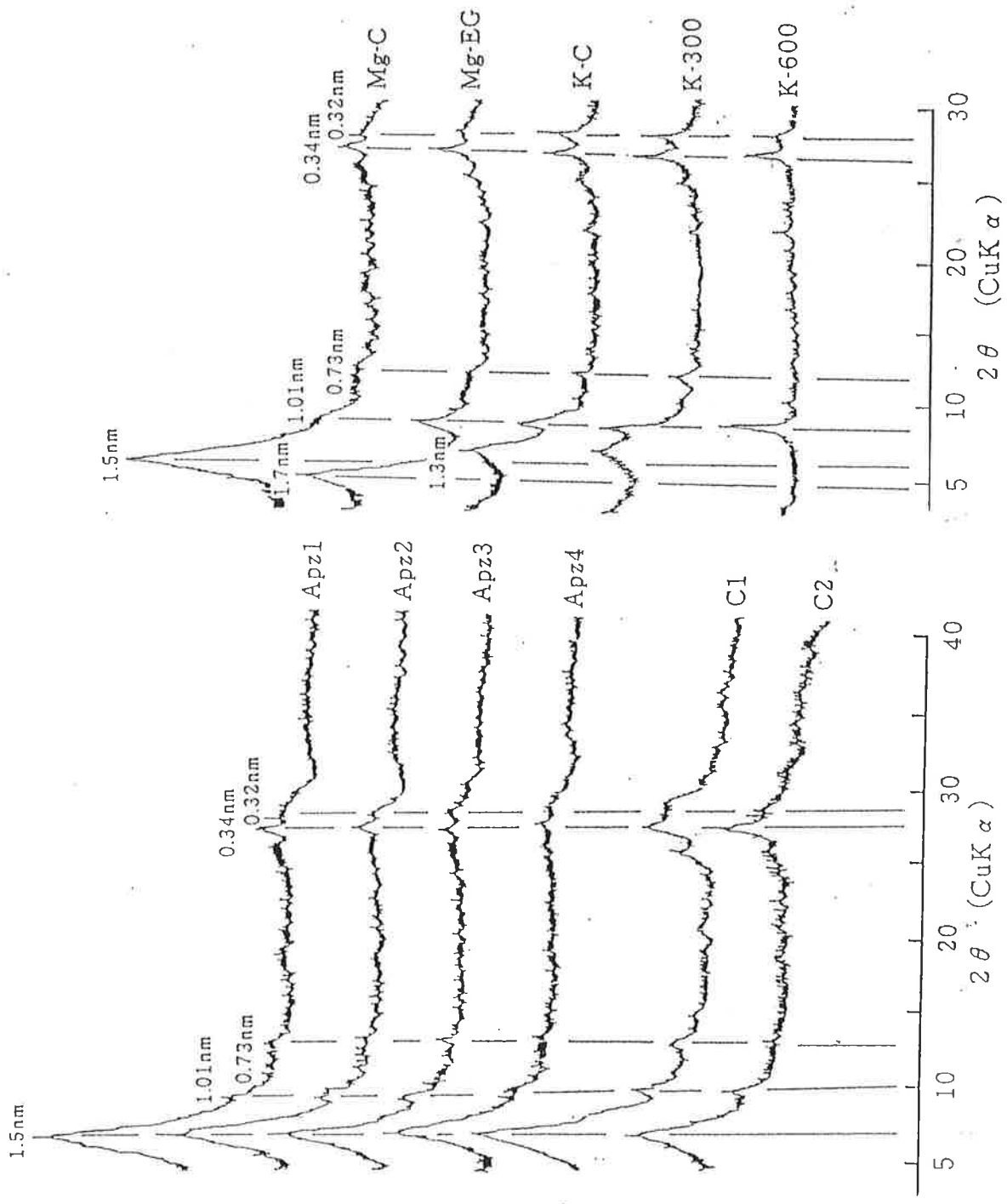
各層位の定方位X線回折図 (脱鉄Mg粘土) 各種処理による底面間隔の変化 (Ap層)

ゲレロネグロ土壌 (G1) のX線回折図



各層位の定方位X線回折図 (脱鉄Mg粘土) 各種処理による底面間隔の変化 (Ap層)

ビスカイノ土壤のX線回折図



各層位の定方位X線回折図 (脱鉄Mg粘土) 各種処理による底面間隔の変化 (Apz1層)

ヘススマリア土壤 (J1) のX線回折図

## Summary

### Studies on Behavior and Distribution of Salts under Irrigated Agriculture in Arid Regions

Tsuneyoshi ENDO

Desertification in arid regions is mainly caused by human activities. Attempts to bring arid areas into production have led to soil salinization and alkalization from irrigated agriculture. Since irrigated agriculture has not been established everywhere in the world, the areas degraded by the practices are still much less than those under grazing and rainfed agriculture. However, due to the significantly higher productivity of irrigated agriculture, the increase in food production driven by the increasing population might lead to the conversion of grazing and rainfed lands into irrigated agriculture, in addition to exploiting the virgin land. Furthermore, the reclamation of salt-affected land under irrigated agriculture has become increasingly important.

This study investigated behavior and distribution of salts under irrigated lands in arid regions and the mechanisms of soil salinization and alkalization from irrigated agriculture.

Preliminary studies of some soil properties in Baja California, Mexico and the surrounding areas of Syr-Darya river, Kazakstan provide some insights into the irrigation management requirement and research needs of different arid soils. The findings are reported as follows :

Mexico : This study was carried out in the middle of Baja California, where there

is little use of subterranean water for irrigation. Various properties of uncultivated and cultivated soils were investigated to clarify the behavior and distribution in the profile of salts under irrigation at three sites.

The first site (Guerrero Negro) was managed under trickle irrigation for either one or four years under the sandy farmland. Although some spots in this area contained  $3\text{dS m}^{-1}$  in ECe (electrical conductivity of saturated extract) that was caused by  $\text{CaSO}_4$ , the average ECe was  $1\text{dS m}^{-1}$ . No evidence of a tendency for accumulation of sodium in the profile was observed because of the sandy texture. But soil pH was remarkably high (above 8.5) due to changes in salt compositions with irrigation.

The second site (Vizcaino) was managed in furrow irrigation for a decade under the sandy farmland. The irrigated soil had some accumulations of sodium salt on the surface. This has been ascribed to the poor quality of irrigation water. Although irrigation water with high salt concentration was applied, there was a stable crop yield for a decade. This may have been possible because of the sandy soil texture through which salts were easily leached to lower layers.

Although some crops can be grown in the sandy farmlands of Guerrero Negro and Vizcaino, it is important that materials that could lower the pH of the soil and increase the availability of certain crop nutrients (e.g. Fe, Mn, Cu and Zn) are applied to suppress soil salinization and soil alkalization. The use of sulfuric acid could improve the productivity of the soil by lowering pH.

The third site (Jesus Maria) was managed in furrow irrigation for eleven years under a clay-like farmland. The soil had mainly sodium salt accumulation on the surface (above  $10\text{dS m}^{-1}$  in ECe value). It sustained stable crop production for eleven years. These findings in Mexico indicate that irrigation water quantities should be supplied in amounts and qualities just enough to meet crop requirement without exacerbating salt accumulation.



Kazakstan : The relationship between salts accumulation and the characteristics of salt affected soils were investigated in both old and new irrigation blocks within the kolkhoz near the Syr-Darya river in Kazakstan. The old sites were abandoned and out of cultivation due to salt accumulations, while the new site was being used for the cultivation of various grain and forage crops in rotation. Salt accumulation was dominated by sodium salts, notably sodium chloride and sodium sulfate. The amount of accumulated salt in the top soil of the new block was lowest in the irrigated blocks within the Kolhoz, and there was no remarkable salt accumulation on the surface. The values of  $E_{Ce}$  in the top soil of abandoned and cultivated fields were about 20 and  $10\text{dS m}^{-1}$  respectively. However, the  $E_{Ce}$  of cultivated fields largely exceeded the criterion for salt affected soils ( $E_{Ce} > 4\text{dS m}^{-1}$ ). Moreover, there was a tendency for higher underground water level due to rice cultivation in the block and the lower layer also contained a lot of salts. The accumulation of salt was affected by the texture of the lower soil horizon such that the accumulation was relatively less when the underlying horizon was sandy, and more when it was clay-like. The clay mineral composition of the soils was dominated by the 2:1 layer silicate clays, notably smectite. The nature of the composition was such that might impair the permeability of soluble salts within the soil. Sodium concentration in irrigation water was doubled by salt addition from water entering the irrigation system from the nearby river.

The salt accumulation and water logging in the study area is linked to the clay content of the soil. Crop rotation as is currently practiced could promote a rise in capillary water which may aggravate salt accumulation, especially where the texture of the lower soil horizon is clay-like. The rotation system needs to be reviewed in favor of monoculture. Irrigation water facilities and channels are already old and need be replaced or changed. A reservoir for collecting water used for washing salts from the soil should be created in a separate block. Finally, a detailed soil mapping of the study area is suggested in order to enhance proper

land use planning.

After salts which have been accumulated in the soil are dissolved by adding irrigation water, a new equilibrium is achieved among the soil solid phase, the soil solution and the precipitated salts. As the amounts and composition of salts which have accumulated in arid soils differ, the forms of salts in the soil solution depend on water content in each soil. The results of the simultaneous equations were that the monovalent ions exist in soil water extract in dissociated states regardless of the water content of each soil. On the other hand, the ion-activity coefficients of divalent ions were decreased much more rapidly with decreasing water content than it did for monovalent ions. The divalent ions existing in dissociated states decreased remarkably when salts were high and the water content was low. Under high moisture conditions, most of the dissociative ions exist in the soil solution. But when the soil moisture decreases by dryness, the salts in dissociated state with poor solubility are suppressed with increasing ion-pair and precipitation of the salts. Hence, salts in soil solution are relatively different from the amount of the accumulated salts and water contents. As salts are concentrated and redistributed during crop growth and irrigation, the concentrations of individual ions change accordingly. The change in the ratio of concentration of the ion in the soil solution by irrigation depends on the solubility of each salt.

Irrigation with waters that have high concentrations of sodium relative to divalent cations may cause an accumulation of exchangeable sodium on soil colloids.

The cation exchange selectivity differed from soil properties. The sandy textured soils have higher adsorption of sodium in the soil colloids than the clay textured soils. And adsorption of sodium in the soil colloids increases with an increase in salinity.

For the above mentioned reasons, salts are comparatively easily leached to

lower layers in sandy farmland. However,  $\text{Na}^+$  adsorption /  $\text{Ca}^{2+}$  release is encouraged. Because exchangeable sodium percentage in the soil increases rapidly, sodic soils are generated. On the other hand, in the clay-like farmland, salts are easily accumulated in the soil profile. Although there is a suppressed  $\text{Na}^+$  adsorption /  $\text{Ca}^{2+}$  release, exchangeable sodium percentage in the soil increases gradually with the increase in concentration of soil solution.

It can be said that sodic soils are formed during the process of soil salinization, whereas soil alkalization can be promoted by the sodicization.

The improper water and soil management of irrigated agriculture in arid regions are chiefly due to the amounts and the composition of salts in the soil and irrigation water and the method of irrigation.

These findings have a universal relevance to irrigated agriculture in arid regions of the world. For a more sustainable irrigated agriculture, it is necessary to compare and integrate findings of several case studies from all regions practicing irrigation. This will ensure a common and effective approach toward solving problems associated with irrigation and enhance greater productivity.

## 謝 辞

本論文は、鳥取大学農学部土壌学研究室において、筆者が行ってきた研究成果を取りまとめたものである。

本研究を遂行するにあたり、鳥取大学農学部本名俊正教授には、終始懇切丁寧な御指導と御援助を賜りました。ここに、深く感謝申し上げます。また、研究や実験における考え方や進め方等について種々御助言を賜った鳥取大学農学部山本定博助教授に謝意を表します。また、論文作成にあたり、御助言、御指導頂いた鳥取大学農学部藤山英保教授、同大学農学部山内益夫教授、島根大学農学部若月利之教授、山口大学農学部進藤晴夫教授に謝意を表します。また、元鳥取大学農学部飯村康二教授は、筆者を土壌学研究的道へと導いて下さり、懇切丁寧な御指導と御援助を賜りました。ここに、深く感謝申し上げます。

本論文の骨格となる乾燥地における現地調査においては、多くの方々の御支援によるものです。メキシコにおいては、メキシコ砂漠地域農業プロジェクトリーダー鳥取大学農学部河野洋名誉教授、同大学農学部藤井嘉儀教授を始めとし、同プロジェクト関係者の皆様には多大なる御支援を承りました。また、気象資料を鳥取大学乾燥地研究センター大槻恭一助教授（現九州大学農学部）より提供して頂きました。深く感謝申し上げます。同様に、カザフスタンにおいては、中央アジア塩類集積土壌の回復技術の確立に関する研究プロジェクト（環境庁地球環境研究総合推進費）関係者の皆様に深く感謝申し上げます。

工業技術院地質調査所佐藤岱生氏、鳥取大学教育地域科学部矢野孝雄助教授には地質学について、九州大学農学部和田信一郎助教授には繰り返し計算の数値計算ならびにイオン交換平衡について、鳥取環境大学安藤政和氏には繰り返し計算のプログラミング法について、鳥取大学教育地域科学部中野恵文教授には溶液中のイオンの存在形態について御教授頂きました。また、アメリカ合衆国農務省R.Almaraz博士には土壌分類について、アメリカ合衆国塩類研究所J.D. Rhoades博士には土壌溶液、イオン交換平衡における貴重な文献を頂きました。ここに、深く感謝申し上げます。

また、当時学生であった高島雅子氏（平成9年度修了）、白川優子氏（平成9年度修了）、山崎邦弘氏（平成10年度卒業）には、本研究を進めるにあたり多大なる御協力を頂きました。ならびに、筆者が在学中には鳥取大学農学部土壌学研究室の学生諸氏に、多大なる御協力と御支援を頂きました。ここに、深く感謝申し上げます。

## 学会誌公表論文リスト

### 1. メキシコ・バハカリフォルニア半島中央部に分布する 土壌の断面形態と理化学性

遠藤常嘉・山本定博・本名俊正・飯村康二・ラウル ロペス・マリオ ベンソン

日本土壌肥科学雑誌 第71巻 第1号 p. 9~17

本論文の第2章の一部に相当

### 2. メキシコ・バハカリフォルニア半島中央部に分布する灌漑農地の塩類動態

遠藤常嘉・山本定博・本名俊正・高島雅子・飯村康二・ラウル ロペス・

マリオ ベンソン

日本土壌肥科学雑誌 第71巻 第1号 p. 18~26 (2000)

本論文の第2章の一部に相当