

Ca²⁺-Na⁺ イオン交換を伴う粘土中の溶質移動機構と特性

取出 伸 夫*・中 野 政 詩*

Transport of exchanging Ca²⁺ and Na⁺ in clay systems

Nobuo TORIDE and Masashi NAKANO

Faculty of Agriculture, The University of Tokyo

1. はじめに

近年、土中を移動する化学物質の挙動を、正確に予測する必要が増してきている。それは、地球規模の環境問題である地下水汚染、また土中から流れ出す化学物質も要因となる河川や湖沼の富栄養化などの問題の解決に深くかかわっているからである。土中水に溶解している溶質は、土粒子との吸着、またその逆の土粒子からの脱着といった反応を繰り返しながら水の流れとともに移動する。特に粘土を多く含む土中を溶質が移動する場合は、土中溶液のイオンと粘土粒子表面に吸着している交換性イオンとのあいだで生じるイオン交換が、その移動形態に大きな影響を及ぼす。さらにこのイオン交換により粘土粒子の物理化学的性質が変化するために、土の透水性や保水性が変化し、土中水の流れも影響を受ける¹⁾。そのため、イオン交換を伴う土中の溶質移動は、種々の因子の連鎖的变化を伴う現象として取り扱う必要がある²⁾。

イオン交換特性の溶質移動に及ぼす影響は、乾燥地の塩類土壌の改良目的を中心に、これまでも多くの研究がなされてきた³⁾。乾燥地で見られるCa²⁺-Na⁺イオン交換を伴う溶質移動には、Na⁺を多く吸着した難透水性のNa土壌のCa²⁺による改良、また塩類が土壌表面に集積する過程のNa土壌の生成などがある。しかし、そうした吸脱着を伴う溶質挙動を実測して解析した例は極めて少ない。特に、種々の因子の連鎖的变化を含めた溶質挙動の体系的な予測を行なうためには、多くのデータを蓄積する必要がある。そこで、Ca²⁺-Na⁺イオン交換を伴う溶質移動として、NaペントナイトへのCaCl₂溶液の浸透過程(リーチング)^{4,5)}と、NaCl溶液を地下水に持つCaペントナイトの水分蒸発過程を、実験室内で再現した。ここでは、まず観察された溶質挙動から

Ca²⁺-Na⁺イオン交換の溶質移動に及ぼす影響を調べる。そして、Ca²⁺-Na⁺イオン交換に伴う粘土の性質の変化と溶質挙動について、透水性と水分特性の変化に焦点をあてて整理する。

2. 実 験

2.1 供試試料

ここで用いた試料は、モンモリロナイトを65重量%程度含み、真比重が2.6のペントナイト(国峰鉱工業製、クミネV1)である。その陽イオン交換容量(CEC)は、交換性陽イオンの総和として求めると、約100 meq/100 g 乾土である。

この試料のバッチ法により求めたCa²⁺-Na⁺交換線をFig.1に示す。横軸は、溶液中のCa²⁺当量分率、縦軸は、Ca²⁺吸着当量分率である。溶液のトータル濃度は、0.05 N, 0.1 N および 0.4 N である。なお、Ca²⁺-Na⁺交換平衡式には、後述する(4)式のガボン式がよく用いられる⁷⁾。図にはガボン式による交換線も併記してある。ここでガボン定数は、[濃度]^{-0.5}の次元を持つ。慣習に従い濃度単位をmolで示すと、ここで用いたペントナイト試料のガボン定数は、0.1 N以下の溶液濃度の場合、0.32 (cm^{1.5}/mmol^{0.5})程度で一定となることがわかる。

実験に用いた2つの状態のペントナイト試料は、Naペントナイト(交換性Na⁺, Ca²⁺, Mg²⁺量がそれぞれ41.5, 45.9, 12.5 meq/100 g 乾土)と交換性陽イオンの大半をCa²⁺が占めるCaペントナイト(交換性Na⁺, Ca²⁺, Mg²⁺量がそれぞれ1.2, 94.6, 5.1 meq/100 g 乾土)である。以後、これをCa飽和ペントナイトと記す。このCa飽和ペントナイトは、試料を濃度1NのCaCl₂溶液と十分に混合し、そして純水で洗浄して作製した。なお、洗浄を繰り返すにつれ、試料が分散状態となり固液分離が不可能になるので、純水にメーターノールを段階的に加え、上澄み液の電気伝導度が10 μS/cm以下

*東京大学農学部 〒113 文京区弥生1-1-1

土壌の物理性 第62号 p.3~11 (1991)

受理月日 1990年10月1日

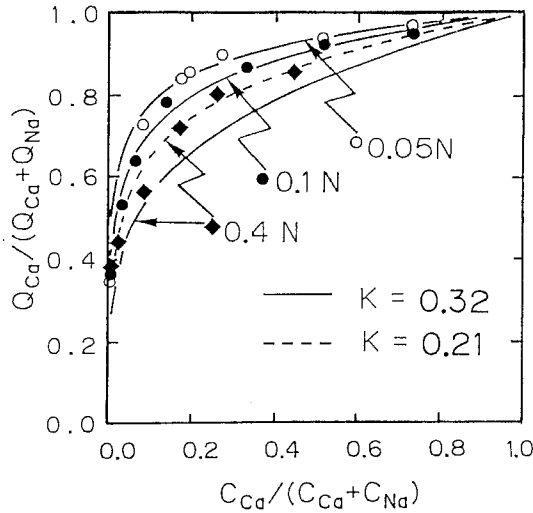


Fig. 1 Normalized Ca²⁺-Na⁺ exchange isotherm for bentonite clay

K: Gapon const. (cm^{1.5}/mmol^{0.5})

C_{Ca}: Ca²⁺ concentration in solution (meq/cm³)

C_{Na}: Na⁺ concentration in solution (meq/cm³)

Q_{Ca}: Exchangeable Ca²⁺ (meq/g·soil)

Q_{Na}: Exchangeable Na⁺ (meq/g·soil)

になるまで洗浄を繰り返した。この洗浄した試料を風乾し、0.156 mmの篩を通し、Ca飽和ベントナイト試料とした。

Fig. 2に含水比720%のNaベントナイト試料と、含水比150%のCa飽和ベントナイトの試料を用いて測定した排水過程の水分特性を示す。なお図には、次に示す浸透実験と同じ条件で、濃度0.4NのCaCl₂溶液を十分に浸透させた後のCaベントナイトの水分特性も併せて示す。

2.2 浸透実験

含水比720% (体積含水率約95%)のNaベントナイト試料を、下端に透水係数が10⁻⁴cm²/sec程度と十分に高いフィルターの敷いてある内径5 cm、高さ5 cmのコラムに一樣に充填した。その試料表面に濃度0.1NのCaCl₂溶液を、マリョット管を用いて7.5 cmの湛水として与えた。そして、排出水量より水分フラックスを求めた。また、適宜このコラムを5 mmずつに切断し、土中溶液濃度および粘土粒子に吸着している交換性陽イオン量を測定した。まず切断した試料の遠心上澄み液を土中溶液として採取し、そのCa²⁺と、Na⁺濃度を原子

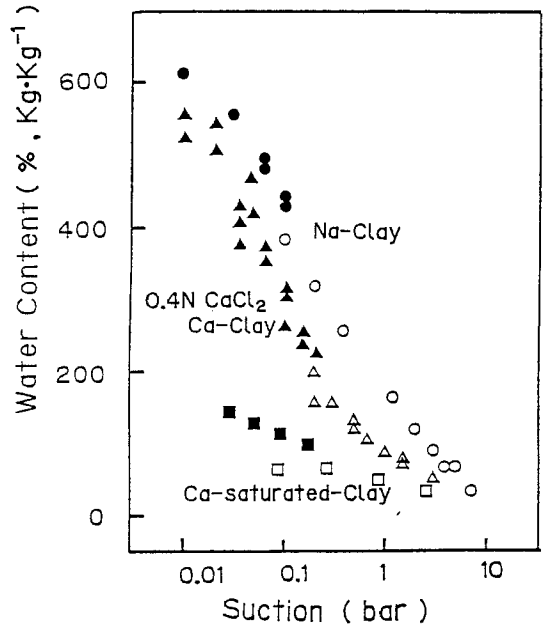


Fig. 2 Water retention curves for three different states of bentonite clay

●○-Na-Clay used in a leaching experiment

▲△-Ca-Clay leached with 0.4N CaCl₂ solution

■□-Ca-saturated-clay mixed with CaCl₂ solution

●▲■-suction method

○△□-pressure plate method

吸光法、Cl⁻濃度をイオンクロマトグラフィーにより測定した。そして、上澄み液を採取した試料について、1N酢酸アンモニウムを用いて繰り返し洗浄し、酢酸アンモニウム中の陽イオン濃度から交換性陽イオン量を求めた⁶⁾。この浸透実験は、293 K (20℃)の定温条件で行なった。

2.3 水分蒸発実験

含水比100% (体積含水率72%)のCa飽和ベントナイトを、浸透実験と同様に、下端にフィルターを敷いてある内径5 cm、高さ5 cmのコラムに一樣に充填した。そしてマリョット管を用いて試料下端に濃度0.1NのNaCl溶液を地下水として与えた。土中溶液濃度分布および交換性陽イオン分布は、浸透実験と同様に、コラムを5 mmずつに切断して測定した。この水分蒸発実験は、303 K (30℃)、相対湿度40%の定温定湿条件で行なった。

3. 結果と考察

3.1 Ca²⁺-Na⁺ イオン交換を伴う溶質移動

(1) 溶質移動式

土中を Ca²⁺ や Na⁺ が移動して溶液中のイオン濃度と組成が変化すると、新たな交換平衡に向けて土中溶液と、粘土粒子に吸着されている交換性陽イオンとのあいだでイオン交換が生じる。このような Ca²⁺ と Na⁺ の溶質移動には、水分フラックスが一定で体積変化がなく、分散係数がイオン種に依らない場合、それぞれのイオンに対し、次の分散移流式が適用できる。

$$\frac{\partial C_{Ca}}{\partial t} = D_s \frac{\partial^2 C_{Ca}}{\partial Z^2} - \frac{J^v}{\theta} \frac{\partial C_{Ca}}{\partial Z} - \frac{\rho}{\theta} \frac{\partial Q_{Ca}}{\partial t} \quad (1)$$

C_{Ca} : 土中溶液中の Ca²⁺ 濃度 (meq/cm³)

D_s : 分散係数 (cm²/d)

J^v : 水分フラックス (cm/d)

θ : 体積含水率 (cm³/cm³)

Z : 位置 (cm)

t : 時間 (d)

ρ : 乾燥密度 (g/cm³)

Q_{Ca} : 乾土単位重量あたりの Ca²⁺ 吸着量 (meq/g)

$$\frac{\partial C_{Na}}{\partial t} = D_s \frac{\partial^2 C_{Na}}{\partial Z^2} - \frac{J^v}{\theta} \frac{\partial C_{Na}}{\partial Z} - \frac{\rho}{\theta} \frac{\partial Q_{Na}}{\partial t} \quad (2)$$

C_{Na} : 土中溶液中の Na⁺ 濃度 (meq/cm³)

Q_{Na} : 乾土単位重量あたりの Na⁺ 吸着量 (meq/g)

ここで (1), (2) 式の左辺は溶液中の濃度変化を示す。右辺第1項は、分散項である。この分散は、土中水の局所的な流れのばらつきによって生じる水理学的分散と分子拡散により生じ、濃度勾配を緩やかにする効果を持つ。水理学的分散係数は、通常水分フラックスに比例するため、水分フラックスが非常に小さいときのみ水理学的分散に比べ分子拡散が卓越する。その水分フラックスの境界値は、分子拡散係数のオーダーの 1 cm/d 程度である⁸⁾。そして右辺第2項は、平均的な水分の流れとともに移動する移流項である。

右辺第3項は、吸着項である。イオン交換現象の特徴は、粘土粒子の持つ負荷電により、反対の符号を持つ陽イオンが静電的吸着をしている点である。そのため、電気的中性条件が常に満たされる。吸着イオン種が Ca²⁺ と Na⁺ の2種のみときは、粘土粒子の荷電量である陽イオン交換容量 (CEC) とのあいだに次式が成立する。

$$Q_{Ca} + Q_{Na} = Q_T \quad (3)$$

Q_T : 陽イオン交換容量 (meq/g)

これは、イオン交換が生じてあるイオンが吸着すると、等しい量の他のイオンが脱着することを示している。ところで、吸着量の Q_{Ca} と Q_{Na} が、溶液濃度の C_{Ca} と C_{Na} の両者に依存するため、(1), (2) 式をそれぞれの溶質挙動に対し、独立に適用することはできない。そのため、イオン交換は、競合吸着として他の吸着現象と区別される。

Ca²⁺-Na⁺ イオン交換平衡式には、古くから経験的にガボン式が用いられている。

$$\frac{Q_{Na}}{Q_{Ca}} = K \times \frac{C_{Na}}{\sqrt{(C_{Ca}/2)}} \quad (4)$$

K : ガボン定数 (cm^{1.5}/mmol^{0.5})

(1) ~ (4) 式を連立させ、適当な初期条件と境界条件を与えると、Ca²⁺ と Na⁺ の濃度と吸着量を求めることができる⁹⁾。なお、イオン交換の生じない Cl⁻ などの陰イオンの場合は、(1), (2) 式の吸着項のない単純な分散移流式が適用できる。

ところで、Fig. 1 に示したように、Ca²⁺-Na⁺ イオン交換の Ca²⁺ の選択性は、非常に高い。そのため、Ca²⁺ の溶液分率が非常に低いときに存在する Na 粘土は、わずかな Ca²⁺ の溶液分率の増加によって、Ca²⁺ の吸着が進む。一方、Na⁺ の Ca²⁺ に対する選択性は低い。そのため、Ca²⁺ の吸着分率の高い Ca 粘土では、Ca²⁺ の溶液分率が低下、すなわち Na⁺ の溶液分率が増加しても Na⁺ の吸着はあまり進行しない。この Ca²⁺ の選択性は、トータル濃度の増加と共にやや低下する傾向がある。このようなイオン交換特性を持つ場合は、(1), (2) 式の第3項が、第1項の分散項と並んで土中を移動する溶質の濃度分布の形状に大きな影響を及ぼす^{3, 10)}。そこで次に、浸透実験と水分蒸発実験について、このような観点から見てみる。

(2) Ca²⁺ の交換吸着する浸透過程

浸透実験では、実験期間中を通じ、試料の体積変化は非常に小さかった。そして水分フラックスは、実験開始から13日程度までは、0.05 cm/d と極めて小さく、その後急増して15日以降には 0.5 cm/d 程度となった (Fig. 3)。そのため、特に浸透初期では、移流による溶質移動量は小さい。また、水理学的分散に比べて分子拡散が卓越すると考えられる。そのため、表面に灌水された CaCl₂ 溶液は、主に拡散によって下方へと浸透する。

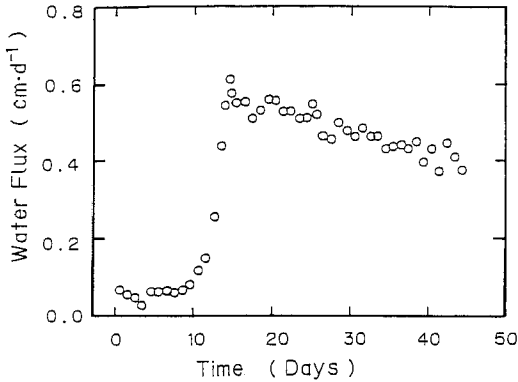


Fig. 3 Changes in water flux for a leaching experiment

ここで、陰イオンCl⁻と陽イオンのCa²⁺では、浸透の形態が異なる。陰イオンのCl⁻は、土粒子への吸着が生じない。そして5日には最下層に到達する (Fig. 4)。一方、陽イオンのCa²⁺は、Na⁺と交換して土粒子へと吸着しながら下方へと浸透する (Fig. 5)。そのため、Ca²⁺はCl⁻に比べ下方への浸透が遅れ、最下層に濃度前線が到達するのは、13日以降である。このCl⁻とCa²⁺の溶液濃度の差は、土粒子へのCa²⁺の吸着量である。

このCa²⁺濃度分布は、13日までの濃度勾配が変化しないのが特徴である。Ca²⁺が交換吸着する場合、前節で述べたように、その選択性が高いため、Ca²⁺の溶液分率が低い状態でCa²⁺の吸着とNa⁺の脱着が進行する。そのため、Na粘土中を下方へと浸透するCa²⁺の濃度分布は、低濃度の濃度先端ほど吸着量が多く、吸着の効果は、拡散とは逆の溶質の広がりを抑える効果を持つ。そのため、濃度勾配を増加させる吸着の効果と、その逆に濃度勾配を減少させる拡散の効果がつり合い、濃度勾配が変化しなかったと考えられる。このような選択性の高いイオン交換吸着は、積極的交換 (favorable exchange) と呼ばれている。

Ca²⁺の浸透に伴い土粒子表面に吸着していたNa⁺は、Ca²⁺と交換して土中溶液へと脱着する (Fig. 6)。このNa⁺濃度とCa²⁺濃度の和は、陰イオンのCl⁻濃度とはほぼ等しく、溶液中のNa⁺の大半が、Ca²⁺と交換脱着したものであることが確認された。ところで、13日までのNa⁺濃度分布には、下方に向けて増加しながら移動するピークが観察された。このピーク位置は、イオン交換が盛んに生じてNa⁺の脱着量の多いことを示している。そしてこのNa⁺濃度のピーク位置は、Ca²⁺濃度

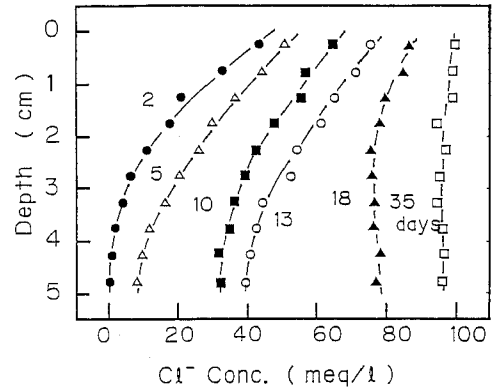


Fig. 4 Changes in Cl⁻ concentration profiles for a leaching experiment

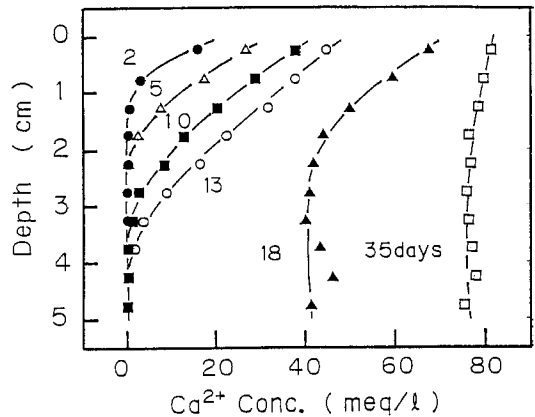


Fig. 5 Changes in Ca²⁺ concentration profiles for a leaching experiment

の前線位置とはほぼ一致する。Ca²⁺の浸透に伴いイオン交換領域が下方へ移動していくにつれ、そのピークの位置も下方に移動していく。そして、すでにCa粘土化の進行した上部より放出されたNa⁺が下方に移動してくるので、ピークは増加しながら下方に移動したと考えられる。

このような積極的交換によるCa粘土化の進行は、Fig. 7の交換性陽イオン分布で確認することができる。今、交換性Ca²⁺の割合が40~80%程度をイオン交換領域と考えると、イオン交換領域は、2日では深さ1 cm付近の位置である。これはCa²⁺濃度前線の位置及びNa⁺濃度分布のピーク位置とはほぼ一致する。そして、その交換性陽イオン分布の示す交換領域は、2日では、幅1 cm以下の非常に狭いものとなっている。これも、

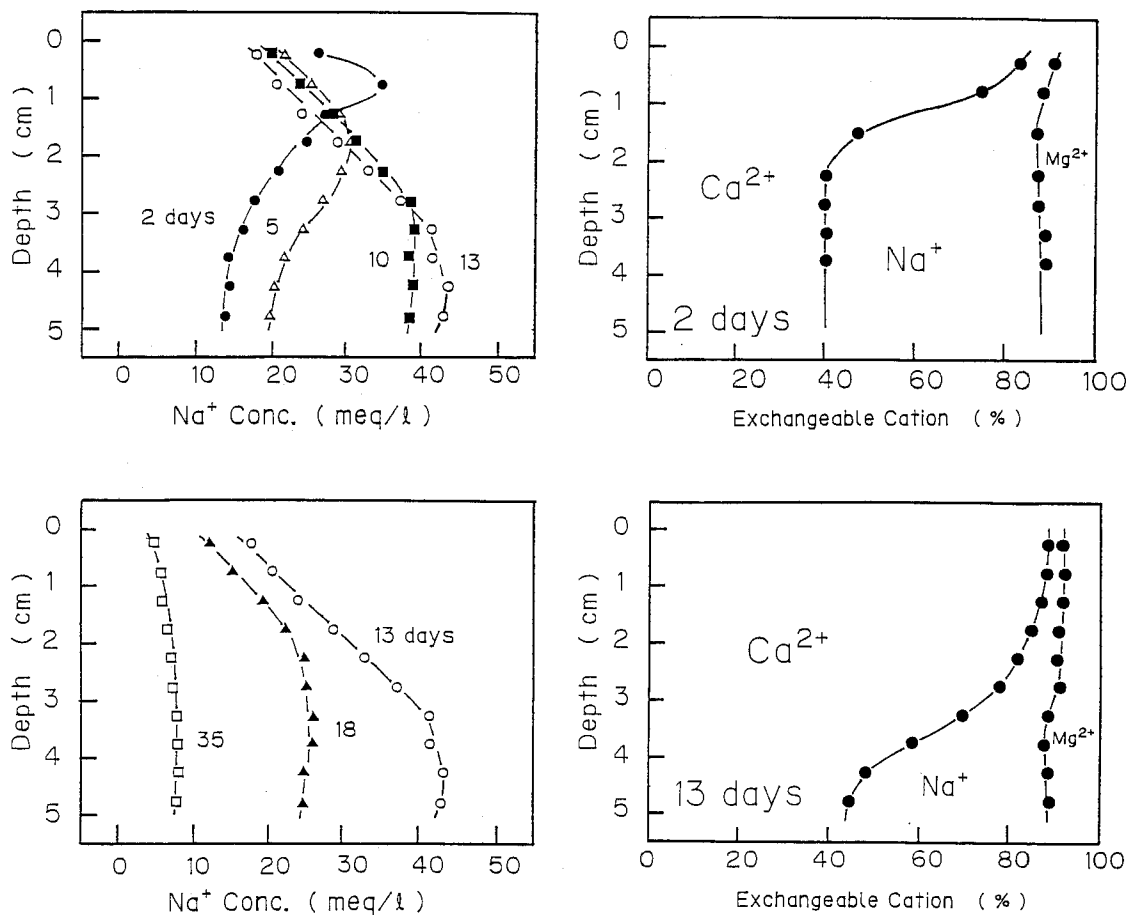


Fig. 6 Changes in Na^+ concentration profiles for a leaching experiment

Ca^{2+} の濃度前線付近でのみ Ca^{2+} の交換吸着が進行する積極的交換の特徴を示している。また、13日には、わずかに最下層のみが未交換の Na 粘土として存在したことがわかる。

(3) Na^+ が交換吸着する水分蒸発過程

一方、 NaCl 溶液を地下水に持つ Ca ベントナイトの水分蒸発過程では、地下水の NaCl が表面に集積する過程で、浸透過程とは逆の、 Na^+ の吸着、 Ca^{2+} の脱着が進行する。ところで、地下水供給水フラックスは、実験期間中を通じて 0.28 cm/d 程度で一定であり、しかも試料の体積変化および含水比分布に大きな変化はなかった。そのため、この水分蒸発実験では、試料位置に依らない上向き定常水分フラックスが生じたことが確認され

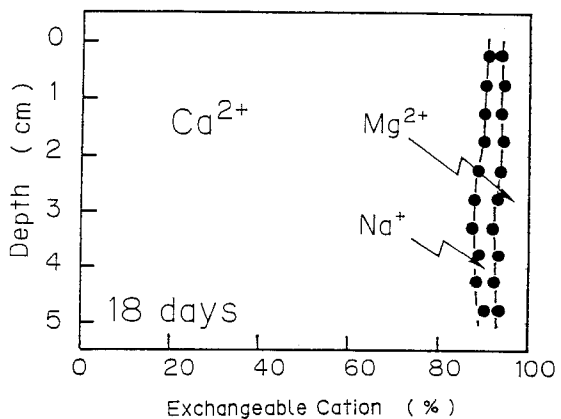


Fig. 7 Exchangeable cations as a percent of the equivalent ratio for a leaching experiment

た。

CaCl₂ 溶液の浸透過程と同様に、土粒子への吸着の生じない Cl⁻ 濃度分布と、土粒子表面に吸着する Na⁺ 濃度分布とを比較することにより、イオン交換の溶質移動に及ぼす影響がわかる (Fig. 8, 9)。蒸発過程の Cl⁻ 濃度は、5 日に表層の濃度が増加した。この 2 日と 5 日の Cl⁻ 濃度分布は、濃度が増加する方向は逆であるが、Fig. 4 の浸透過程の Cl⁻ 濃度分布と形状がほぼ類似なものとなっている。これは、蒸発過程の水分フラックスも 0.28 cm/d と小さいため、上方へと濃度が増加する実験初期の移動は、浸透過程と同様に、分子拡散が卓越したためである。その後 Cl⁻ は、水分蒸発にともない表層

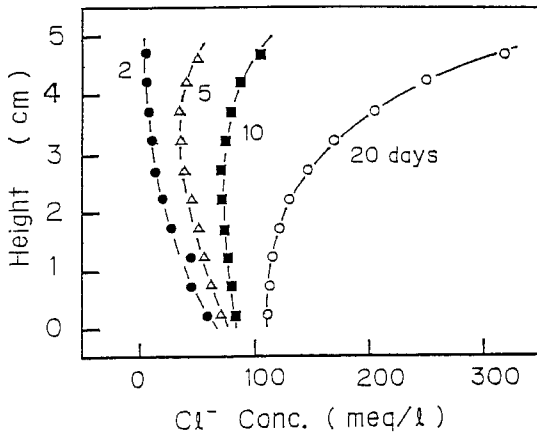


Fig. 8 Changes in Cl⁻ concentration profiles for an evaporation experiment

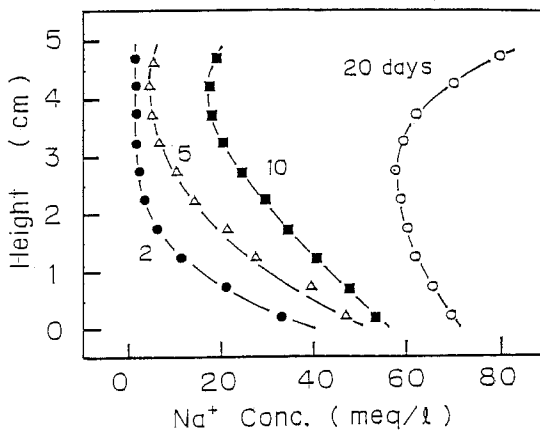


Fig. 9 Changes in Na⁺ concentration profiles for an evaporation experiment

での集積が進行した。

一方、土粒子表面に吸着する Na⁺ の溶液濃度は、Cl⁻ 濃度に比べて常に低くなる。この Cl⁻ と Na⁺ の溶液濃度の差は、浸透過程の場合と同様に、土粒子への Na⁺ の吸着量である。この水分蒸発過程は、浸透過程と比べて乾燥密度が大きいため単位体積当たりの陽イオン交換容量が大きく、しかも厳密には水分フラックスも異なる。しかしここで、実験初期の Cl⁻ 濃度分布の変化が浸透過程と相似であったことに注目し、溶質挙動の違いが主にイオン交換特性によるものであると考え、イオン交換特性の溶質移動に及ぼす影響を考えてみる。

水分蒸発過程の Na⁺ 濃度前線は、5 日に試料表面に達し、土粒子への吸着が生じない Cl⁻ 濃度前線に対する遅れが小さい。これは浸透過程の Ca²⁺ の濃度前線が、5 日では深さ 2 cm に存在したように、Cl⁻ 濃度前線の移動に比べて大きく遅れたことと対照的である。水分蒸発過程のように Ca 粘土中を Na⁺ が移動する場合、Na⁺ の Ca²⁺ に対する選択性が低いため、Na⁺ の溶液分率が増加しても Na⁺ の吸着、すなわち Ca²⁺ の脱着はあまり進行しない。そのため、低濃度の濃度先端ほど吸着量が小さく、吸着の効果は、時間の経過とともに濃度勾配を緩やかにする。そして、水分蒸発過程の Na⁺ 濃度分布では、吸着と拡散の効果の両者によってその濃度勾配が緩やかになり、吸着の生じない Cl⁻ 濃度と前線の移動速度に違いが生じなかったと解釈できる。このような選択性の低いイオン交換は、積極的交換に対し消極的交換 (non-favorable exchange もしくは unfavorable exchange) と呼ばれている。なお、表面に Cl⁻ と Na⁺ が到達した後、両イオンとも表面での集積が進行するが、

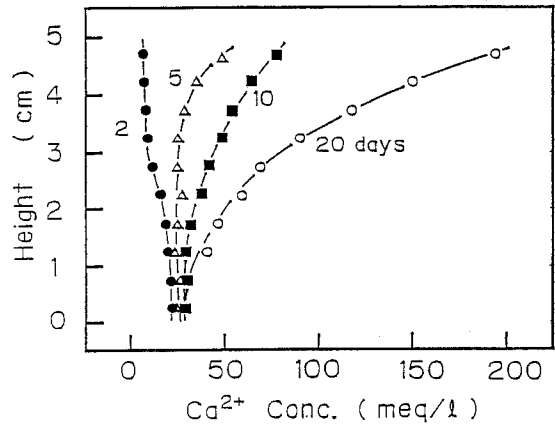


Fig. 10 Changes in Ca²⁺ concentration profiles for an evaporation experiment

Na⁺の吸着が継続的に進行するため、Cl⁻とNa⁺の濃度差は拡大した。

Na⁺の吸着に伴い、土粒子に吸着していたCa²⁺は土中溶液に放出される。Fig. 6の浸透過程のNa⁺濃度分布では、脱着量の大きい位置に濃度ピークが観察されたが、Fig. 10の水分蒸発過程のCa²⁺濃度分布にはそのようなピークはみられない。これは、Na⁺が交換吸着する場合には、脱着量が局所的に大きい部位の存在しなかったことを示している。また表層での塩類集積が進行する10日から20日の間に、交換性のNaの吸着割合は、全層にわたり一様に4%程度増加した(Fig. 11)。このように、消極的交換によるNa粘土化は、継続的に徐々に進行するのが特徴である。

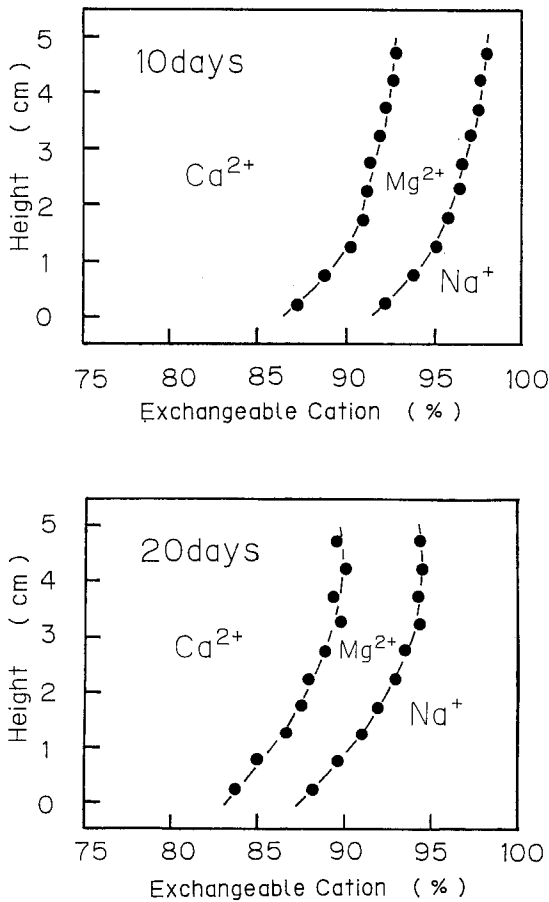


Fig. 11 Exchangeable cations as a percent of the equivalent ratio for an evaporation experiment

3.2 イオン交換と水分移動特性の変化

イオン交換を伴った溶質移動が生じると、当然のことながら粘土の諸性質も変化する。ここでは、イオン交換と粘土の水分移動特性の変化について、透水性、水分特性に焦点をあてて考える。

浸透過程では、積極的なイオン交換が生じて、Fig. 7の交換性陽イオン分布にみられたように、コラム内が上層のCa粘土と下層のNa粘土に成層化した。そして、全層がCa粘土となる13日から18日の間に水分フラックスは急増した(Fig. 3)。一般に、粘土の透水性は、Na⁺の吸着分率が高いほど、また溶液濃度が低いほど低下することが知られている^{1,2)}。そのため浸透初期には、下層部の透水性の低いNa粘土が透水を制限し、水分フラックスが小さかったと考えることができる(Fig. 7)。そして全層が透水性の高いCa粘土に変化したために、水分フラックスが増加したと理解できる。このようなCa粘土化による水分フラックスの増加は、下方への移流による溶質移動量を増加させる。そのため水分フラックスが増加した13日以降、Fig. 3のCl⁻濃度とFig. 4のCa²⁺濃度は大きく増加し、またFig. 5のNa⁺濃度は減少した。

ところで、吸着イオン種は、透水性のみならず、水分特性にも影響を及ぼす(Fig. 2)。浸透実験に用いたNaベントナイトは、0.01 barでは600%と低サクシジョンの含水比が高く、そしてサクシジョンの増加とともに大きく含水比が減少する。このNaベントナイトへCaCl₂溶液を浸透させて作製したCaベントナイトは、Naベントナイトに比べ同じサクシジョンに対する含水比は小さい。これは、体積変化が小さく、含水比が不変であった浸透実験においても、透水性の変化と共に、粘土の水分特性も変化したことを示している。

一方、水分蒸発実験に用いたCa飽和ベントナイトの含水比は、浸透により作成したCaベントナイトに比べ同じサクシジョンでの含水比は極端に低く、たとえば、0.1 barでは含水比100%程度となっている。浸透により作製したCaベントナイトは、Ca飽和ベントナイトに比べた場合、むしろNaベントナイトに近い水分特性である。同じCaベントナイトの水分特性がこのように大きく違うことは、その生成過程の履歴の違いから異なった粒子構造が形成されたためと考えられる。

このように、ベントナイトの水分特性は、試料の状態により著しく変化する。そしてここに示した以外の状態では、条件に応じて様々な水分特性を示し、それらは、NaベントナイトとCa飽和ベントナイトの間の水分特性曲線を与えると考えられる。今までに示した浸透過程

と水分蒸発過程は、一様な水分分布の土コラム中の定常水分フラックスの下での溶質移動であり、しかもイオン交換に伴う水分特性の変化は、浸透過程ではCa飽和ベントナイトとの水分特性の違いと比べると、あまり大きくなかった。しかし、より現実的に非定常な水分移動の生じている粘土中の溶質移動を考えると、水分フラックスを定量化する際に、水分特性の把握は透水係数と並んで重要となる。その際、土中溶液の状態や、試料の履歴等を十分考慮する必要があることをFig. 2は示している。

4. まとめ

ここまで、Ca²⁺-Na⁺イオン交換を伴う粘土中の溶質移動として、Na粘土に交換吸着するCaCl₂溶液のNaベントナイトへの浸透過程、またCa粘土にNa⁺が交換吸着するNaCl溶液を地下水に持つCaベントナイトからの水分蒸発過程について溶質挙動を中心に示した。特にこれらを、積極的交換と消極的交換のイオン挙動の2つのタイプに分類し、浸透過程と水分蒸発過程の溶質挙動について、それぞれ対比することを行なった。浸透過程では、Ca²⁺の選択性が高いため、積極的交換が生じて、Ca²⁺の濃度前線付近でCa²⁺の吸着とNa⁺の脱着が進行し、Ca粘土化が進行した。それに対し、水分蒸発過程では、Na⁺の選択性が低いため、消極的交換が生じて、試料全体に継続的にNa⁺の吸着とCa²⁺の脱着が進行した。

また、Ca²⁺-Na⁺イオン交換に伴う粘土の性質の変化として、浸透過程では、Ca粘土化に伴い透水性が増加し、それにより水分フラックスが増加して溶質移動量が増加した。またCa²⁺の浸透によりCa粘土化すると、同じサクションでの含水比が低下することを水分特性曲線から示した。さらに同じCa粘土であっても、試料の生成履歴によって水分特性が著しく異なることを示した。土中の溶質移動の定量的な予測を行なうためには、水分フラックスの予測が最も重要な要因である。特に、イオン交換が透水性や水分特性に大きな影響を及ぼす粘土中の溶質移動現象では、今回述べたような溶質移動に伴う一連の連鎖的相互作用について、さらに詳細なデー

タを蓄積する必要があると考える。

謝辞 東京大学農学部大学院生加藤邦彦氏とは、水分蒸発実験を共同に進めさせて頂いた。また東京大学農学部井本博美技官には実験全般にわたり御協力を頂いた。ここに厚く謝意を表する。

引用文献

- 1) Russo, D., E. Bresler: Effect of mixed Na-Ca solutions on the hydraulic properties of unsaturated soils, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 41, 713-717 (1977)
- 2) Nielsen, D. R., M. Th. van Genuchten, J. W. Bigger: Water flow and solute transport in unsaturated zone, *Water Resour. Res.*, 22, 89S-108S (1986)
- 3) Bolt, G. H., M. G. M. Bruggenwert: 土壌の化学, 岩田進午ら訳, 学会出版センター, 136-156 (1978)
- 4) 取出伸夫, 中野政詩: CaCl₂溶液によるNaベントナイトの脱ソーダ質化過程, *農土論集*, 136, 39-45 (1988)
- 5) 取出伸夫, 塩沢昌, 中野政詩: CaCl₂溶液の浸潤下におけるNaベントナイト中の溶質移動の解析, *農土論集*, 136, 47-52 (1988)
- 6) 日本粘土学会編: 粘土ハンドブック第二版, 技報堂出版, 681-684 (1987)
- 7) US Salinity Laboratory Staff: Diagnosis and improvement of saline and alkali soils, *US Dept. Agri. Handbook* 60, 25-28 (1954)
- 8) Rubin, J., R. V. James: Dispersion-affected transport of reacting solutes in saturated porous media: Galerkin method applied to equilibrium-controlled exchange in unidirectional flow, *Water Resour. Res.*, 9, 1332-1356 (1973)
- 9) Nielsen, D. R., R. D. Jackson, J. W. Cary and D. D. Evans (eds): "Soil Water", 121-154, *Am. Soc. Agro., Maison, Wisconsin*. (1972)
- 10) 石黒宗秀, 岩田進午: 土の中の物質移動—土中におけるイオンの交換吸着現象—, *農土誌*, Vol. 56, No. 10, 87-94, 1988

Summary

Solute transport in clay systems is strongly governed by ion exchange phenomena. We carried out two kinds of experiments in order to investigate the effect of $\text{Ca}^+ - \text{Na}^{2+}$ ion exchange on the transport of solutes. One was a leaching experiment of Na-bentonite with CaCl_2 solutions. The other was an evaporation experiment of Ca-bentonite having groundwater consisting of NaCl solution. Since $\text{Ca}^{2+} - \text{Na}^+$ exchange is nonlinear, two types of ion exchange can take place: favorable exchange due to a high affinity for Ca^{2+} and non-favorable exchange due to a low affinity for Na^+ .

Favorable exchange could be observed in the leaching experiment. Penetrating Ca^{2+} exchanged with almost all adsorbed Na^+ at the moving front of the Ca^{2+} concentration profile. Then, the Ca^{2+} front became steep. On the other hand, non-favorable exchange could be observed in the evaporation experiment. The penetrating front of Na^+ concentration profile became flat.

$\text{Ca}^{2+} - \text{Na}^+$ ion exchange affects the hydraulic properties of soils. In the leaching experiment, the water flux was suddenly increased when the whole clay from the surface to the bottom was transformed into a Ca-clay system having higher hydraulic conductivity. Water retention also varies significantly depending on the clay systems. For a given water suction, the water content of Ca-bentonite leached with CaCl_2 solution is less than that of Na-bentonite, whereas it is much greater than that of Ca-saturated-bentonite mixed with CaCl_2 solution. Predicting the changes in the hydraulic properties caused by ion exchange is important to quantify the transport of exchanging solutes in soils.

(Soil Phys. Cond. Plant Growth, Jpn., **62**, 3 -11, 1991)



中海干拓地土の収縮挙動について

石川 重雄*・河野 英一*・足立 忠司**

On Shrinkage Behavior of Soil in Nakaumi Reclaimed Land

Shigeo ISHIKAWA*, Eiichi KOHNO* and Tadashi ADACHI**

*College of Agriculture and Veterinary Medicine, Nihon University

**Faculty of Agriculture, Okayama University

I. はじめに

中海は鳥取、島根の両県にまたがる水面面積97.7 km²、最大水深17.1 m（平均水深5.4 m）の潟湖¹⁾である。地形的には、宍道湖地溝帯にできた水道がこれに流入する諸河川による三角洲の形成や夜見ヶ浜砂嘴の発達で埋め残された部分であり、全体的に平坦な湖底をなしている。この水域内の比較的水深い浅い部分に5地区が選定されて、島根県側の本庄、揖屋および安来の3地区は干し上げ工法により、島根県側の彦名および弓浜の2地区は埋め立て工法により畑地を造成する中海干拓事業が1974年に開始された。

各地区の位置と干陸面積は、図-1に示す通りである。

5地区のうち、揖屋地区は1974年10月、安来地区は1975年5月に干陸作業が開始され、揖屋地区は1975年6月、安来地区は1976年3月に全面の干陸が完了した。両地区の平均標高は-2.3 m~-2.4 mで、両地区の間には標高に大きな差はなく、ほぼ平坦な地形が形成されている。粘土層厚は揖屋地区で平均11.0 mである。

両地区とも、全面の干陸が完了した翌年から軟弱地盤の乾燥促進、農地整備工事等が進められ、1988年度からは畑地の売り渡しが行われて、その一部では1989年度から営農が開始した。なお、本庄地区では未干陸で今日に至っている。

彦名地区では埋め立てが1977年から行われ、一部を残して1986年に終了した。弓浜地区でも埋め立てが1977年

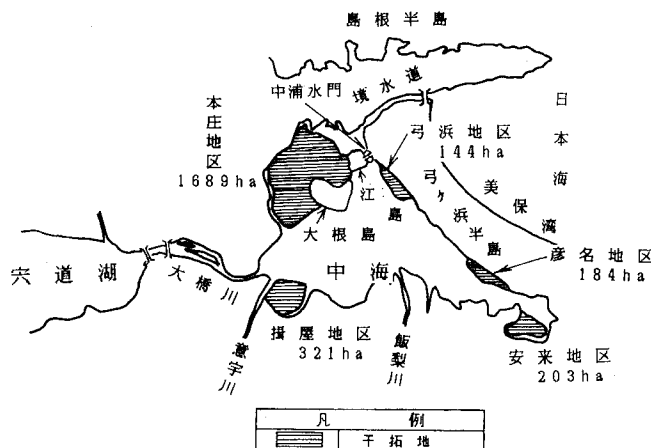


図-1 中海干拓地各地区の位置と面積

Fig. 1 The location and arer of every district of the Nakaumi reclaimed land

* 日本大学農獣医学部 〒252 藤沢市亀井野1866

** 岡山大学農学部 〒700 岡山市津島中1-1-1

土壌の物理性 第62号 p.13~22 (1991)

受理月日 1990年10月18日

から行われて、1983年に終了した。

ところで、中海の湖底土の多くは、中海に流入する大橋川、意宇川、飯梨川等の河川によって運ばれて来た粘土が堆積したヘドロと呼ばれるものである。また、中海の水は島根半島と弓ヶ浜との間にある境水道を通じて日本海へ流れるが、満潮時には逆にこの水道から海水が流入するために、その影響で、半鹹湖的性格がもたらされている。したがって、湖底に堆積した土も、その影響を強く受けて、陸成の既耕地土とは異なる特性を有する。

この干拓地土は干陸当初には軟弱で、しばらくは人の歩行も困難であった。しかし、土層表面から土壌水分の蒸発が進み、土層にキレツが発達すると、キレツを通じてさらに土層の乾燥が進行し、土壌構造の生成とその種類の変化がもたらされて、農地の土壌構造に近いものが形成されていった。この土壌構造の生成過程については筆者らが²⁾現地調査に基づいて既に報告した。しかしながら、中海干拓地土の土壌構造の生成過程を支配する主要因である土の収縮挙動については、未だ報告されていない。

そこで、本報文では中海干拓地土の収縮挙動とそれが土壌構造の生成に果たす役割について論述する。

II. 採土地の概要

施工過程で生ずる諸問題に応じた処理土の選択が可能な埋め立て工法の場合と異なり、干し上げ工法の場合には、現地土状態のまま乾燥処理がなされることとなる。したがって、この場合には、施工前はもちろん、施工中あるいは施工後でも現地土の特性とその変化の方向とを十分に把握し、それを基にして常に乾燥処理技術の向上に努めつつ、乾燥処理施工がなされなければならない。

そこで、本研究では、干し上げ工法が採られ、掲屋地区よりも粘質な土で構成されるために、乾燥処理上の問題が今後とも多数出現すると思われる安来地区を採土地とした。

安来地区の土の基本的特性に関しては、5 m 間隔で上幅1.0 m、底幅0.2 m および深さ0.7 m の小排水溝が施工された干陸後6年目のNo. 30圃場の深さ0~100 cmの土の特性について報告されている。²⁾ それによれば、主な特性としては、上、下層土を通じて粘土分が30.9~44.4%、シルト分が35.2~49.9%で、土性がLicないしSic (国際土壌学会法) となって、土層全体が強粘質土で構成されていること、深さ100 cm 以下のヘドロ層はアルカリ性を呈するが、深さ50 cm 以上の土層は強酸性となって酸性硫酸塩土壌が生成され、かつ塩類の溶脱が

進行していることが挙げられる。

本地区の土の含有粘土鉱物は、イライト (I)、カオリン鉱物 (k)、パーミキュライト (Vt)、およびクロライト (Chl) を主要なものとする。主要粘土鉱物の割合は、 $l \geq k > Vt > Chl$ の傾向にあり、この中でも特にI, kの割合が多い。³⁾ 参考のために述べると、八郎潟干拓地⁴⁾ および笠岡湾干拓地^{5,6)} ではモンモリロナイト、児島湾干拓地⁷⁾ ではハロイサイトとイライトが主体であると言われている。

III. 試験方法

1. 収縮挙動

1) 供試体の作成

不攪乱の供試土としては、既に土の基本的性質が明らかにされている前述の安来地区No. 30圃場の深さ1.0 mのヘドロ土層(C層：ヘドロ層)と柱状構造の発達した深さ約50 cmの土層(BC層下)とから干陸後6年目の1982年7月に直径50 mm、高さ51 mm、容積100 cm³のサンプラーで採土したものをを用いた。これをさらに直径50 mm、高さ14 mmの円板状に成型して供試体とした。また同時に、深さ1.0 m土層から攪乱土も採取し、それを攪乱の供試土とした。この供試土を生土のまま液性限界測定器を用いて液性限界以上で、ペースト状態となるように含水比調整したものを攪乱供試体として用いた。また、この供試体は自重により流動するため容器に充填した。その際に供試体の厚さが問題となるが、均一な乾燥収縮が起るとされる佐藤、⁸⁾ 河野⁹⁾の方法に準じて、供試体を直径約45 mm、深さ約13 mmの収縮皿に気泡の封入が無いように充填し、測定に供した。

さらに、含有粘土鉱物の配向状態が収縮におよぼす影響をも検討するために、圧密を受けた供試土の収縮測定も行った。この場合の供試体の作成には、圧密試験機を用いた。供試土としては、前述の攪乱供試体の作成におけるものと同一のものをを用い、液性限界以上の含水比に調整したペースト状態のものを圧密用リングに充填した。これに載荷荷重以外はJISで定める圧密方法に準拠して、0.05 kg/cm²、0.25 kg/cm²、0.35 kg/cm²の各荷量を載荷して圧密試料を作成した。これらをさらに不攪乱供試体と同一寸法に成型して供試体とした。

2) 測定方法

収縮挙動は各供試体の乾燥特性に伴う垂直方向と水平方向との線収縮量を同時に測定し、それらの測定値から垂直方向と水平方向との線収縮率および体積収縮比を算出して把握した。水平方向の収縮量としては、水平面の

直径方向に円の中心が間隔の中央となるように3 cmの間隔でステンレス細線を深さが供試体厚さの半分まで入るように真っ直ぐに2本立てて、この2本のニクロム線間の乾燥に伴う間隔の減少を測定した。垂直方向の収縮量としては、ステンレス細線の一端を丸めて、その部分をステンレス細線が垂直に立つように供試体のほぼ中央に乗せ、丸めない他端と別に設けた基線との間の間隔の減少を測定した。ただし、圧密供試体と不攪乱供試体等の乾燥方法は、両試料とも自重により流動しなため、ロウを塗った金網上に設置する方法を取った。¹⁰⁾ 収縮量の測定は各供試体ともカセットメータ (1/100 mm 読取り) を用いて行なった。また、各方向の線収縮率および体積収縮比の変化と含水比の変化とを対応させて、収縮挙動を検討することから、各方向の線収縮量の測定と同時に、その時の含水比を求めるために供試体の重量も測定した。

乾燥方法としては、急激な乾燥をさけるために恒温・恒湿槽中 (温度: 20℃, 湿度: 60%) に、風が直接当たらないようにアクリルケースに入れて設置し、徐々に乾燥する方法を採った。

測定時間は、実験開始後48時間は1時間間隔、その後は4時間間隔に測定し、含水量に変化が見られなくなった段階で乾燥炉に入れて、絶乾試料の各収縮量と水銀置換法によって最終体積を測定した。

2. 強度特性

本試験は、垂直方向と水平方向との間で異なる収縮挙動が出現したために、採土地の土粒子の配向状態を確認する目的で行なったものである。

1) 供試体の作成

安来地区のNo. 30圃場において、土被り圧により正規圧密を受けたと思われる深さ1.3 mの土層から干陸後13年目の1989年3月に直径50 mm, 高さ51 mm, 容積100 cm³のサンプラーで、堆積面に対して垂直方向と水平方向から採土した不攪乱土を用いた。この土層は青灰色の羊糞状を呈していて、土被り圧により正規圧密を受けたと思われる以外は、乾燥履歴を持たない湖底土状態のものであった。

両供試土を直径35 mm, 高さ41.4 mmに成型して、次項で述べる一軸圧縮試験の供試体とした。なお、本試験は土粒子配列の方向性の確認を主眼としたものであることから、とくに供試体の寸法はJISには従わなかった。

2) 測定方法

強度特性は各供試体を一軸圧縮試験機で測定して把握した。測定にはTENSILON UTM-4-100試験機を用い、圧縮速度はJIS規格通り1%/minとした。

IV. 試験結果および考察

1. 土の収縮挙動

各供試体の収縮特性は図-3および図-4に示す通りである。なお、垂直・水平方向の収縮率および体積比は次式により求めた。⁹⁾

垂直収縮率 (H_s) は、

$$H_s = (H - H_t) / H_0 \times 100 (\%)$$

ここに、 H: 試験開始時の垂直高さ

H_t : 任意の水分状態の垂直高さ、

H_0 : 試験開始時の供試体の厚さ、

また、水平収縮率 (L_s) は、

$$L_s = (L - L_t) / L \times 100 (\%)$$

ここに、 L: 試験開始時の水平距離、

L_t : 任意の水分状態の水平距離

さらに、体積比は上述で求めた垂直、水平収縮率を用い次式、

$$V_t / V = (1 - L_s / 100)^2 (1 - H_s / 100)$$

ここに、 V: 試験開始時の体積、

V_t : 任意の水分状態の体積

より求めた。ただし、攪乱供試体の場合には、水平収縮は含水比が高い段階では横方向への流動によってステンレス細線間の距離の増大がもたらされ負の収縮を示す。したがって、正の水平方向収縮が開始された場合の体積比の算出にあたっては基準長の変化を考慮して計算⁹⁾を行なった。

図-2は、深さ1.0 m土層から採取したものを供試土として、生土のままをペースト状態となるように液性限界以上の含水比に調整して容器に充填した下攪乱供試体および圧密試験機により作成した圧密供試体の収縮挙動である。

図-2に見られるように、攪乱供試体では、垂直方向の収縮量は、含水比約40%以上においてその変化が大きい。(図中の正規収縮直線に沿って収縮する段階: 水分量と体積減少量が等しい段階⁹⁾) それより低含水比では、収縮量の変化は含水比の低下とともに小さくなる。(図中の正規収縮直線からカイ離する残留収縮の段階: 脱水量に比べて体積の減少量が小さい段階⁹⁾)

水平方向の収縮では、含水比約98%以上においてマイナスの収縮、すなわちステンレス細線間の間隔が広がるという水平方向への流動が生じている。それが生じて以降の含水比の低下に対する水平方向の収縮は、垂直方向

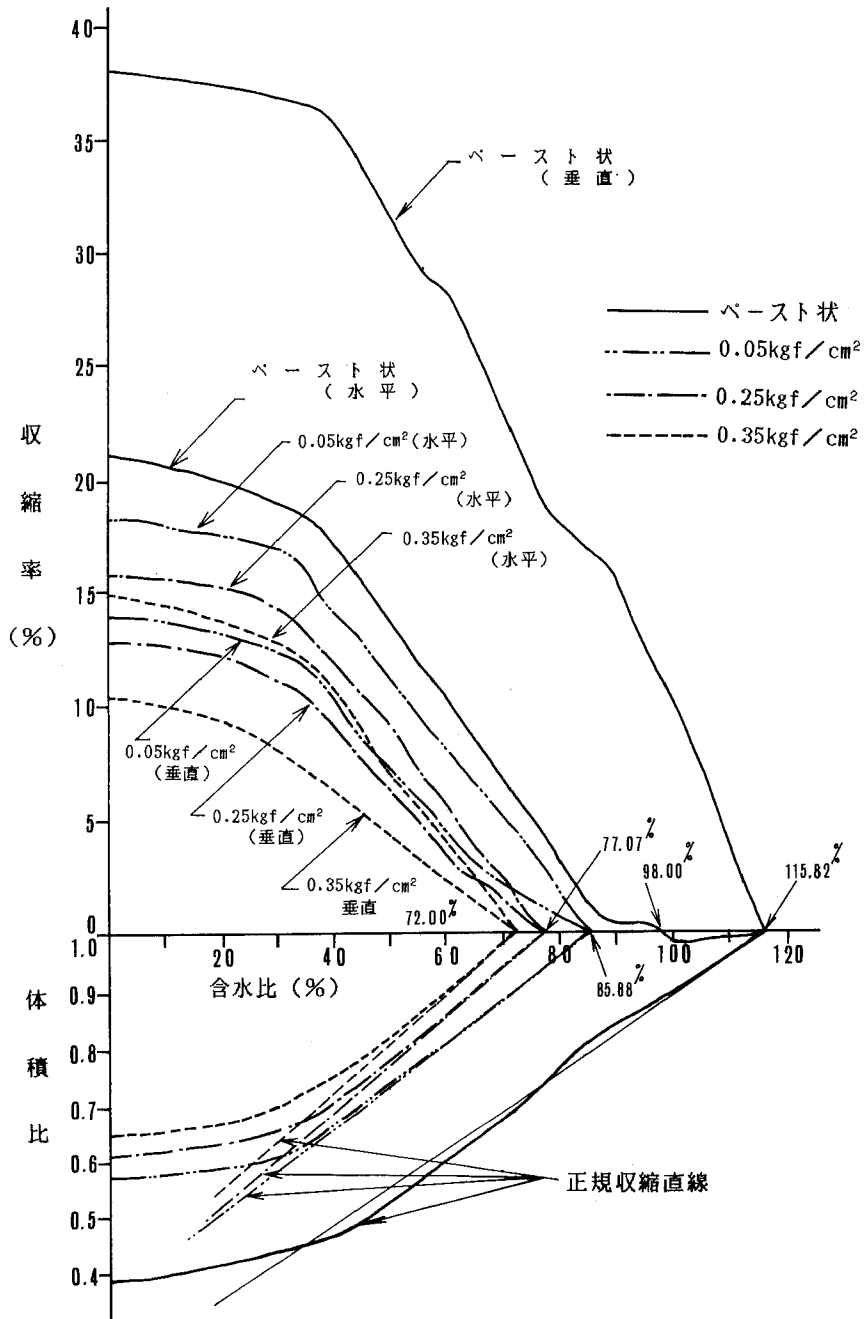


図-2 攪乱（ペースト状）および圧密供試体の収縮曲線
 (安来地区No.30圃場, 1982年7月採土)

Fig. 2 The shrinkage curve of the disturbed and consolidated test sample
 (No.30 lot in the Yasugi district; Sampling in July of the year 1982)

の収縮挙動と同様である。なお、水平方向の流動が生じている段階の垂直方向の収縮は、収縮というよりはむしろ、脱水に伴う流動沈下と呼ぶべきものである。⁹⁾

図-2に見られるように、攪乱供試体では、流動沈下が生じたために、水平方向の全収縮量よりも垂直方向のものが大きい。いま、図-2で流動沈下が停止した以後の含水比の低下に伴う水平方向と垂直方向との収縮曲線の様相を比べると、水平方向のものと垂直方向のものはほぼ同型となり、流動沈下の停止以後に等方的な収縮（垂直収縮率=水平収縮率）が生じていることが認められる。このことは、ヤングら¹¹⁾の「ランダム配列土および練り返された試料等の収縮は等方的である」という指摘や河野⁹⁾の「シロカキ状態のペースト土では流動沈下終了後に等方的な収縮となる」という指摘とも一致

する。

次に、不攪乱の供試体の収縮挙動は図-3に示す通りである。この供試体は図-2に見られるような流動沈下が起らず、垂直方向および水平方向の収縮とも測定開始と同時に発現し、かつ、水平方向の収縮量が垂直方向のものに比して大きい。同様のことは図-2中に示した圧密供試体の場合にも見られ、中海干拓地が土被り圧により正規圧密を受けていることが明らかといえる。また、圧密供試体では、載荷荷量が大きくなるほど、水平方向および垂直方向の全収縮量は小さくなる。

以上の諸結果から見て、中海干拓地の土粒子の配向条件と収縮挙動との関係には、図-4に示すようなモデルが考えられる。

つまり、図-2の攪乱供試体のような収縮挙動は、図

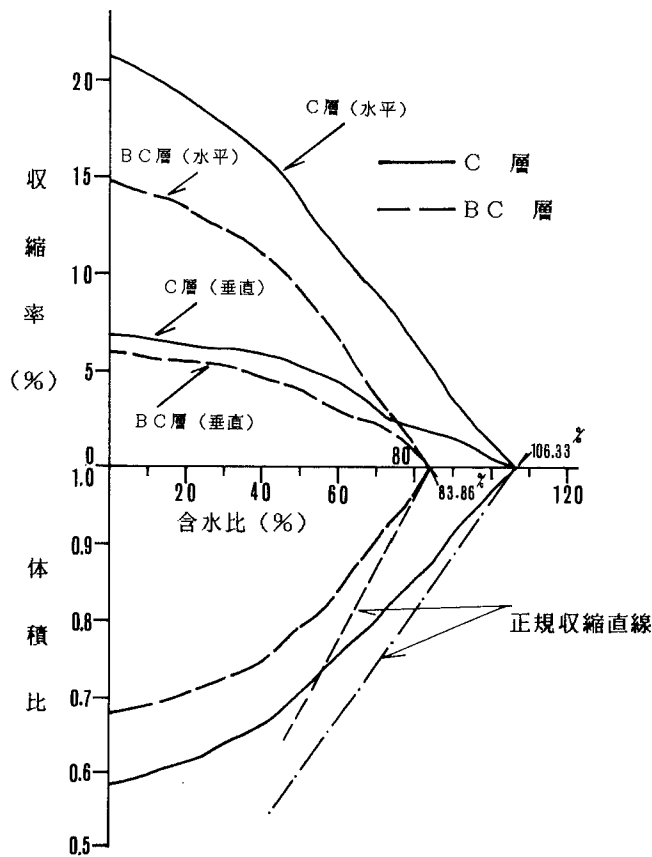


図-3 不攪乱供試体の収縮曲線

(安来地区No.30圃場, 1982年7月採土)

Fig. 3 The shrinkage curve of the undisturbed test sample (No.30 lot in the Yasugi district: Sampling in July of the year 1982)

— 4 の I 型あるいは II 型の配向条件を持つものに見られ、また、図-3 の不攪乱供試体の収縮挙動は III 型の配向条件を持つものに見られると考えられる。すなわち、干陸前の水面下の土では、土粒子は遊離状態にあって、I 型のように任意の配列をなし、また干陸初期でペースト状態にある土では、多量の水が土粒子間の空隙に保持されつつ、土粒子が、II 型のように不完全な配列（土粒子間の距離が垂直方向の距離 $a \geq b$ 水平方向の距離の関係にある状態）をなしているものと推察される。したがって、II 型の配列条件を持つ土では、垂直方向の収縮量

が水平方向のものに比して大きいか、あるいは等方的な収縮が生じるかのいずれかの収縮挙動がみられる。さらに、II 型の土は土被り圧密あるいは人為的な密圧を受けると土粒子間の空隙水が脱水されて、各土粒子が相互に接近する。この場合、特に圧力を受ける方向、すなわち垂直方向の土粒子間の距離が縮まって、III 型のような垂直方向の土粒子間の距離よりも水平方向のものが大きい平行な配列を持つ土が生じる。したがって、III 型の土では、水平方向の収縮量が垂直方向のものよりも大きくなる。

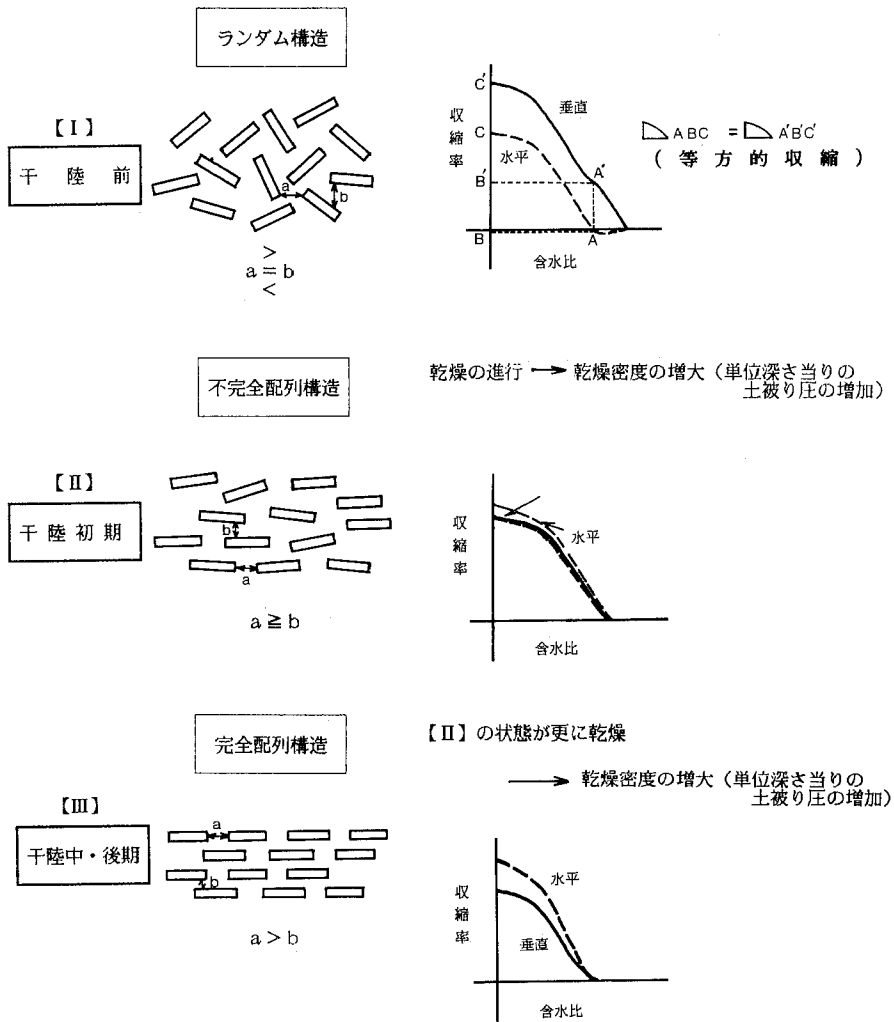


図-4 板状土粒子の配向条件と収縮挙動（模式図）
 Fig. 4 The schematic relation between the orienting condition of the platy soil particles and the shrinkage behavior of soil

2. 土の強度特性からみた配向性

中海干拓地土, 特に下層土であるヘドロ層では, 上述のように, 収縮挙動から見て, 土被り圧などによる圧密で土粒子間の距離が縮まり, 垂直方向の土粒子間の距離よりも水平方向のものが大きいという土粒子の平行配列モデル (図-4のⅢ型) が想定された。

もし, そうであるならば, 中海干拓地土では, 垂直方向と水平方向とで土の強度特性は異なる。すなわち, 垂直方向の圧力に対しては, 板状の土粒子が面を垂直方向にむけて密に重なりあって抗するので, 強い応力が示され, 水平方向の圧力に対しては, それに抗するのが主に板状の土粒子の面と面との摩擦力のみであり, しかも面方向には流動し易いから, 強い応力が示されないはずである。これらの強度特性が確認できれば, 上述の土粒子

の配向条件と収縮挙動との関係は明白となる。したがって, それらを確認するために中海干拓地土を堆積面に対して垂直な方向と水平な方向とから採取した不攪乱の供試土を用いて前述の一軸圧縮試験を行った。これにより次のような結果が得られた。

中海干拓地土の深さ1.3 m 土層の垂直方向と水平方向とからそれぞれ3個ずつ採取して成型した供試体についての一軸圧縮試験の結果は図-5の圧縮応力と圧縮歪との関係に示す通りである。図-5に示されるように, 各方向の各供試体とも, 圧縮歪の増大に伴う圧縮応力の変化には, 測定開始時の含水比の影響と考えられる若干の差異が見られるが, 採土方向が同一のものはほぼ類似した圧縮応力-圧縮歪曲線となる。しかし, 採土方向が異なると, この曲線の変化の様相も大きく異なる。すなわ

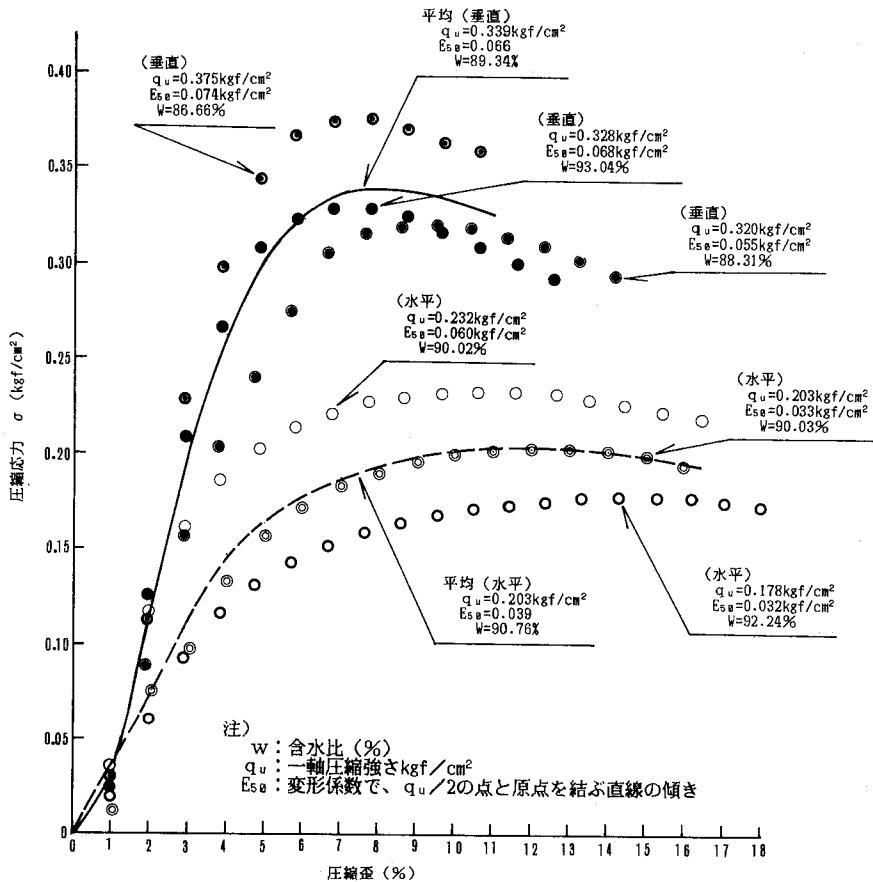


図-5 圧縮応力-歪曲線
(安来地区No.30圃場, 1989年3月)

Fig. 5 The compression stress-strain curve
(No.30 lot in the Yasugi district: Sampling in March of the year 1989)

ち、堆積面に対して垂直方向に採土した供試土の場合は、測定が開始されると、圧縮歪の増大に伴って圧縮応力は明瞭なピークを示す。一方、堆積面に対して水平方向のものは、圧縮歪の増大に伴って圧縮応力は明瞭とは言い難いピークを示し、それ以後は極めて緩やかに低下する。垂直方向の強度は水平方向のものよりも明瞭に大きい。これらのことは、正に膨潤性の低い板状の土粒子が配向構造を取っていることを反映する結果である。

したがって、中海干拓地土、特に下層土のヘドロ土層では、収縮開始時点から含水比の低下とともに、水平方向の収縮量が垂直方向のものに比して大きいという異方性がみられることが当然といえる。

3. 収縮挙動から見た土壌構造の生成特性

土壌構造の生成を促す主要因は土のクレツの発達であり、土のクレツの発達は土の乾燥に伴う収縮によってもたらされる。そこで、中海干拓地土の持つ収縮挙動がこの土の土壌構造の生成にどう影響しているかをここでは論議する。

中海干拓地土の土壌構造の生成は次のようであることが、既に論述されている。²⁾ 干陸間もないペースト状態のヘドロ層の表面に、まず、乾燥に伴う土の収縮によって垂直方向のクレツ、すなわち一次クレツが発達する。次いで、このクレツを通して下層への乾燥の進行とそれに伴う土の収縮による一次クレツの下層への発達ともたらされ、柱状構造が生成される。さらに乾燥が進行して土が収縮し、柱状構造内に水平方向のクレツ、すなわち二次クレツが発達して、角塊状構造が生成される。この角塊状構造がより一層の乾燥と湿潤との繰り返しを受け、土の収縮とスレーキングの発生などに伴う二次クレツがその構造内に強度に発達して、亜角塊状構造が生成される。さらに強度の乾燥との湿潤との繰り返しに伴う土の収縮とスレーキングの発生などが粒状構造や屑粒状構造の生成をもたらす。

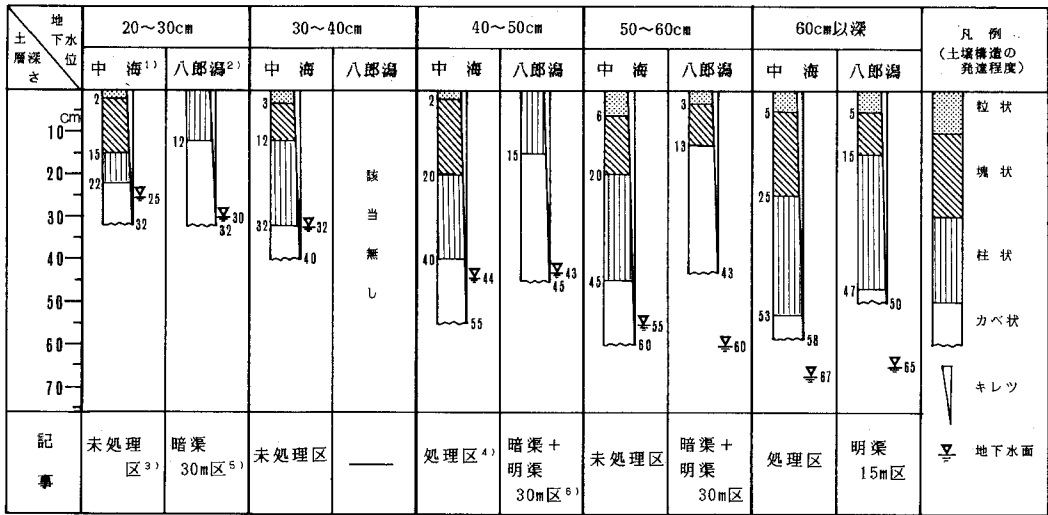
さて、このような土壌構造の生成過程においては、中海干拓地土のように異方性の高い収縮挙動を持つ土であると、各土壌構造の生成がきわめて円滑に進行するといえる。すなわち、垂直方向の収縮量が小さく、水平方向のものが大きいということは、乾燥の進行に伴って土層に水平方向の引っ張りが強く生じ、多数の一次クレツをもたらして、柱状構造の生成を円滑にする。また、乾燥がさらに進行すると、板状の土粒子間の垂直方向の面と面との距離が小さいために、収縮後間もなく柱状構造内の土粒子同士が接触し、垂直方向の収縮が制限されて水平方向に破断が生じ易く、しかも板状の土粒子が面を水

平方向に向けて配向しているために、面を境にして水平方向に割れ易いので、柱状構造内に二次クレツが強く発達して、角塊状構造も円滑に生成される。これらの土壌構造の生成を円滑にする特性は、さらに強い乾燥の進行と湿潤との繰り返しでもたらされる亜角塊状、粒状および屑粒状の構造の生成も円滑にする。

これらのことは2:1型の板状の粘土鉱物で、しかも粘土鉱物間の空隙だけでなく、粘土鉱物内部の層間にも多量の水を保持して、面に垂直な方向に極めて大きな膨潤を示すモンモリロナイトを主体とする八郎潟干拓地土の場合と比較するとさらに判然とする。なお、モンモリロナイトは、層間にナトリウムイオンを多く含むものでは、原体積の8~10倍にも自由膨潤する¹²⁾といわれているが、八郎潟が海跡湖であったことからみて、八郎潟干拓地土には、ナトリウムイオンが多く含まれていて、そのような膨潤性の大きなモンモリロナイトが多く存在していると考えられる。実際、干陸後9年を経た八郎潟干拓地土の深さ100 cmおよび深さ40~50 cmより採取した不攪乱土供試体についての江崎ら¹³⁾の収縮測定の結果によれば、両供試体とも干陸後9年を経てもいまだに垂直方向および水平方向の収縮量がともに大きく、しかも垂直方向の収縮量が水平のものよりも大きい。したがって、八郎潟干拓地土では、土被り圧密を受けてモンモリロナイトが堆積面に対して水平方向に面を向けて配向していても、面に垂直な方向、すなわち土層の垂直方向への大きな膨潤のために、中海干拓地土よりも、乾燥に伴う土の収縮による一次および二次クレツの下層方向への発達が遅く、そのために各種の土壌構造の生成も遅れることになる。

そこで、中海干拓地土および八郎潟干拓地土の深さ方向の土壌構造の生成特性を地下水位との関係で取りまとめてみたのが図-6である。干陸年数を経るに従って土の乾燥が進行するが、それを支配する要因は年々の気象状況と地下水位状況である。特に、地下水位低下が土の乾燥の進行に果たす役割は大きい。これがために、各種の排水促進工法が試みられるのである。したがって、図-6の地下水位は土の乾燥状況の指標という意味を持つ。なお、図-6の中海干拓地土の深さ方向の土壌構造の生成特性は筆者ら²⁾の4年間の、八郎潟干拓地土のものは金子¹⁴⁾の3年間の詳細な土壌断面調査結果から作成した。

図-6に示される通り、地下水位の低下とともに、各干拓地土とも下層へ向かってクレツが発達し、クレツ発達深よりも浅いところでは、上層に向かって土壌構造の生成とその種類の変化がもたらされている。しかし、地



1): 中海干拓地のものは文献2)より、八郎潟干拓地のものは文献14)より作成。
 2): 八郎潟干拓地の地下水位30~40cmは該当するものなし。
 3): 乾燥処理を施していない区。
 4): 水切り溝(断面: 上幅1.0m、底幅0.2m、深さ0.7)を5m間隔に施工した区。
 5): 暗渠を深さ0.60~0.75mに埋設した区。
 6): 暗渠と明渠(半円断面: 上幅1.28m、深さ0.70m)を15m間隔に交互に施工した区。明渠15mは6)の明渠と同様。

図-6 中海および八郎潟干拓地土の地下水位と深さ方向の土壌構造の生成状態との関係
 Fig. 6 The relation between the groundwater level and the forming condition of soil structure in the soil profile of the Nakami and the Hachirogata reclaimed land

下水位がほぼ同一という場合には、中海干拓地土のキレツ発達深および土壌構造の生成深は八郎潟干拓土のものよりも明らかに深い。特に、地下水位が深さ20~40cmの時に見られるように、中海干拓地土では塊状(角塊状、亜角塊状)構造の生成が速い。これらのことは上述した両干拓地土の収縮挙動の差異に基づくものであるといえる。

V. おわりに

本研究においては、土性がLiCないしSiCで、強粘質の中海干拓土の収縮挙動とそれが土壌構造の生成に果たす役割とについて検討した。得られた主要な結論は次の通りである。

1. 中海干拓地土、特にその下層土であるヘドロ土層は、乾燥の進行に伴う収縮挙動において、この土の堆積面に垂直な方向の収縮量が小さくて、それに水平な方向のものが垂直なものよりも、かなり大きく推移するという異方性を示した。
2. この土の収縮挙動における異方性は、土被り圧による正規圧密によって、膨潤性の低い板状の土粒子が面を水平に向けて配向させられ、しかも土粒子間の垂直方向の距離、すなわち土粒子の面と面との間の距離が

狭められて、土粒子間の水平方向の距離、すなわち土粒子の端部と端部との間の距離が土粒子間の垂直距離のものよりも相当に大きくなっていることに起因していると推察された。

3. この土の配向構造は、この土の堆積面に垂直な方向の圧縮応力が大きく、それに水平な方向のものが小さいという一軸圧縮(セン断強度)試験の結果によっても明瞭であった。
4. この土では、土の収縮挙動における異方性に起因して、膨潤性の極めて高い板状のモンモリロナイトを主に含有する八郎潟干拓地土よりも、一次キレツの発生が多く、二次キレツの発達が容易で、そのことによって柱状構造および角塊状構造の生成が円滑であると推察された。

最後に本研究を進めるに当たり、中海干拓地区内農地整備研究委員会(委員長 岡山大学農学部 長堀金造教授)の各位には貴重な教示を賜り、また、中海干拓事務所の関係各位には現地調査に多大なご援助とご協力とを戴いた。記して深謝の意を表します。

引用文献

- 1) 理科年表: 天文台編, 丸善(株), pp.666 (1990)

- 2) 石川重雄・竹中 肇・足立忠司・江崎 要・堤聰・河野英一：干陸後のヘドロ地盤の乾燥過程について—中海干拓地の農地整備に関する研究（I）—，農土論集・110，pp.109～123（1984）
- 3) 高田秀夫：中海底土および干拓地土壌の理化学的性質について，環境科学研究報告B16-R12-14，pp.84～103（1978）
- 4) 金子淳一：八郎瀉干拓地ヘドロにおける機械化適応性の向上と耕地化過程に関する研究，秋田県農業試験場報告，pp.70～78（1977）
- 5) 米田茂男*本邦干拓地土壌の生成論的ならびに立地学的研究，岡山大学農学部土壌肥料学教室報告・8，pp.36～38（1964）
- 6) 長堀金造・佐藤晃一・萩野芳彦：笠岡湾干拓子定地ヘドロ（海底粘土）の基礎的な性質について，農土誌・42（11），pp.31～36（1974）
- 7) 久保田収治：干拓地土壌の特性と干拓後における土壌型の変遷，岡山県農業試験場臨時報告・59，pp.188～217（1961）
- 8) 佐藤晃一：重粘土の物理特性に関する研究—粘土の収縮挙動について（I）—，農土論集・24，pp.31～36（1968）
- 9) 河野英一：水田作土の収縮挙動からみた工学的性質に関する研究，農土論集・81，pp.1～8（1979）
- 10) 河野英一：締固め土の収縮挙動とそれに伴うキ裂の発達について，農土論集・92，pp.8～15（1981）
- 11) R.N.ヤング・B.P.ワーケンチン著（山内豊聡・竹中肇・東山 勇・前田 隆）：新編 土質工学の基礎，鹿島出版会，pp.40～45（1978）
- 12) 土質工学会：粘土の不思議，入門シリーズ・12，pp.74～76（1986）
- 13) 江崎 要・竹中 肇・駒村正治：乾燥および湿潤過程におけるヒステリシス現象について—八郎瀉のホ場乾燥に関する研究（VI）—，農土論集・53，pp.39～47（1974）
- 14) 前掲3），pp.106～108

Summary

This study investigated the shrinkage behavior of strongly clayey soil with the soil texture of LiC on SiC and the part it played in the formation of soil structure in the Nakaumi reclamation.

The results obtained were as follows:

1. The strongly clayey soil in the Nakaumi reclamation, especially the muddy sediment forming the subsoil, showed the anisotropy that the shrinkage length of the vertical direction to the depositional surface of this soil changed little; the change in shrinkage length of the horizontal direction was always fairly larger than that of the vertical one in the shrinkage behavior of soil during the progress of drying.
2. It was supposed that the anisotropy in the shrinkage behavior of this soil was due to the flat faces of platelike soil particles with the low swelling being horizontally oriented and the vertical distance between the platelike soil particles, i.e., the distances between their flat faces, being shortened under the normal consolidation caused by the covering soil pressure; and consequently the horizontal ones between them, i.e., the ones between their edges, become rather larger than the vertical ones.
3. The orienting structure of this soil was also clarified by the result of an unconfined compression test. The compression stress of the vertical direction to the depositional surface of this soil was large and that of the horizontal one to it was small.
4. It was supposed that in this soil, because of the anisotropy in its shrinkage behavior, the occurrence of primary cracks was greater, the development of secondary cracks easier, and consequently the formation of the prismatic and angular blocky structure was smoother than that in the soil consisting mainly of platelike montmorillonites with a high swelling from the Hachirohgata reclamation.

(Soil Phys. Cond. Plant Growth, Jpn., 62, 13-22, 1991)