

洪積粘土の圧密に伴う微視構造の変化

利藤房男¹・大向直樹²・田中洋行³・田中政典⁴

¹正会員 応用地質(株) 技術本部 (〒330-8632 埼玉県大宮市土呂町 2-61-5)

²正会員 応用地質(株) コアラボ (〒330-0038 埼玉県大宮市宮原町 1-66-2)

³正会員 工博 独立行政法人 港湾空港技術研究所 (239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1)

⁴正会員 独立行政法人 港湾空港技術研究所 (239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1)

大阪湾周辺の2種類の洪積粘土(大阪湾粘土Ma11層及び京都粘土Ma4層)を用いて、不攪乱状態及び圧密に伴って変化する微視構造特性を、水銀注入型ポロシメータによる間隙径分布の測定と電子顕微鏡による観察から明らかにした。実験に用いた洪積粘土は、含まれる粘土鉱物は同一であるが、京都粘土に比べて大阪湾粘土には多量の珪藻類が混入している。京都粘土は、圧密に伴い間隙が顕著に収縮し、全体的により小さな間隙径分布となっていく。一方、大阪湾粘土は、京都粘土に比較して、全体的な間隙径の収縮は生じにくい。最大圧密圧力($p=10\text{MPa}$)において比較すると、京都粘土の間隙径は、大阪湾粘土のものよりもかなり小さくなる。この違いは、珪藻類を含めたマクロ的な粘土構成物自体の相違によるものと考えられる。

Key Words: *pleistocene clay, microstructure, pore size distribution, scanning electron microscopic, consolidation*

1. はじめに

最近の建設事業においては、構造物の大型化が顕著であり、圧密沈下のような地盤問題が沖積粘土のみならず、洪積の硬質粘土に拡大してきている。従来、洪積粘土は硬質であり、沈下に対して安定であるという認識が一般的であった。ところが、大阪湾沿岸域で大規模な埋立造成工事が行われるとともに、洪積粘土自体の沈下が問題になることが増えてきた。このような背景のもと、現状では洪積粘土の圧密沈下現象の解明が急務となってきている。

洪積粘土を用いて圧密試験を実施すると、 $e\sim\log p$ 曲線が圧密降伏応力付近で右側に大きく突出し、その後急速に沈下する現象が確認されている¹⁾。これは、堆積後の長い時間に形成されたエージング効果によるものと解釈される。また、過圧密領域においても圧密降伏応力付近で長期載荷された場合には、顕著な沈下を生じる例が報告されている^{2),3)}。このような洪積粘土の沈下の特殊性は、その構造特性と深く関連しているものと考えられる。

最近では、このような粘土構造に起因する圧密特性を微視構造の面から把握しようとする研究が多く実施され始めている。海外では、自然粘土を対象とした研究として、Champlain clay の構造特性を電子顕微鏡とポロシメータを用いて評価した Delage and Lefebvre らの研究⁴⁾、Louisville clay を用いた Lapierre らの研究⁵⁾がある。これらの粘土は、ともに沖積の海成粘土である。

一方、国内においては、有明粘土に関して微視構造特性の研究が精力的に実施されている。不攪乱有明粘土と高温及び常温再圧密試料を対象として、圧密に伴う微視構造を検討した鬼塚・根上の研究⁶⁾、有明粘土と広島粘土を用いて、不攪乱試料と再構成試料の圧密に伴う間隙径分布の変化を評価した三浦らの研究⁷⁾等がある。また、珪藻土を対象としては、圧密に伴う珪藻土粒子の破碎を微視的な観点から示した立石の研究⁸⁾がある。これに対して、洪積粘土層、特に日本国内に多く分布する海成の洪積粘土の微視構造特性に関する研究は、現状多くは行われていない。上部大阪洪積粘土層について、その力学特性と電子顕微鏡による微視構造変化を検討した八嶋らの研究⁹⁾、大深度から採取した大阪湾洪積粘土の微視構造を電子顕微鏡と間隙径分布に関し検討した Tanaka and Locali の研究¹⁰⁾がある程度である。

本研究は、大阪湾周辺に分布する2種類の洪積粘土(大阪湾海底部から採取した洪積粘土及び京都丘陵地で採取した洪積粘土)を対象にして、その圧密挙動を微視的な観点から把握することを目的として実施した。

2. 実験に用いた試料の特徴

大阪湾及びその周辺部には、第四紀に形成された洪積粘土層が広く分布している。これらの粘土層は、間氷・氷河期の海進・海退と基盤の沈降・隆起によって形成さ

れたものであり、下位より Ma0, Ma1, Ma2...Ma10, Ma11, Ma12 層と称される 13 枚の内海ないし内湾性の海成粘土層から構成されている。これらの内、最上部の Ma12, Ma11 層は丘陵地で段丘を作っている地層に対応しており、上部洪積層と称し、Ma10 層よりも古い地層を大阪層群¹⁰としてこれと区分している。また、最も形成時期の新しい沖積粘土層は、Ma13 層と呼ばれている。

本実験には、大阪湾海底面下から採取した洪積粘土 (Ma11 層：以下、大阪湾粘土と称する) 及び京都丘陵地で採取した洪積粘土 (Ma4 層：以下、京都粘土と称する) を用いた。また、これら洪積粘土との比較のために、大阪湾で採取した沖積粘土 (Ma13 層：以下、沖積粘土と称する) も実験の対象に加えた。

実験に使用した各粘土の物理特性を表一に、粒径加積曲線を図一に示す。大阪湾粘土は、過圧密比が $OCR=1.4$ と洪積層としては比較的小さく、この過圧密分は過去に荷重を受けたのではなく、エージング効果による疑似過圧密であると指摘されている¹²。京都粘土は、大阪湾粘土に比較して、 $OCR=4.1$ と大きい。京都粘土は浸食場に形成されているとみられ、過去に現状土被り以上の荷重を受けた経歴を持つものと考えられる。また、大阪湾粘土に比較して地層の形成時代が古く、過去に六甲変動¹³と呼ばれる地殻変動を経験している。沖積粘土は、 $OCR=1.1$ と小さく、非常に軟質な粘土である。

物理的特性をみると、沖積粘土の自然含水比が 90% を超えているのに対し、大阪湾粘土及び京都粘土は 50~60% と低い値を示す。粒度分布、塑性指数は、大阪湾粘土と沖積粘土が比較的似かよっているのに対し、京都粘土は粒径が全体に細粒で、塑性指数も高い。

サンプリング方法は、沖積粘土は固定ピストン式シンウォールサンプラーで、大阪湾粘土及び京都粘土は水圧式サンプラー、デニソンサンプラーによる。

3. 不攪乱状態での微視構造特性

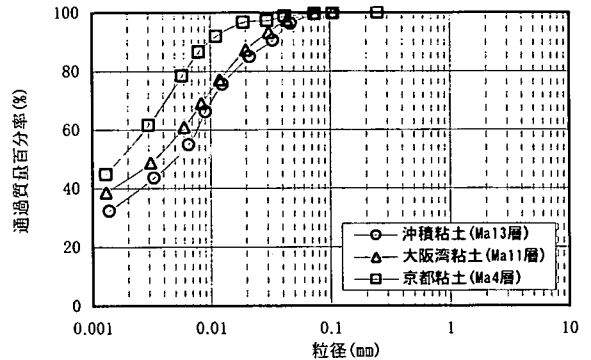
(1) 実験方法

実験では、採取した試料の X 線回折を実施して、その粘土鉱物の比較検討を行った後に、ポロシメータ試験及び電子顕微鏡観察により、その微視構造特性を明らかにした。ただし、X 線回折は、大阪湾粘土及び京都粘土を対象にして、試料を 3 状態 (自然状態、グリセロール処理、550℃に加熱) に調整したものをを用いて実施した。ポロシメータ試験及び電子顕微鏡観察の方法は以下のとおりである。

間隙径の測定及び電子顕微鏡観察を行うためには、試料の体積を変化させることなく間隙中の流体をすべて除去する必要がある。本実験では、真空凍結乾燥 (フリー

表一 実験に用いた試料の物理特性

地区名	大阪湾		京都
	沖積層 Ma13 層	洪積層 Ma11 層	洪積層 Ma4 層
土粒子密度 (g/cm ³)	2.68	2.72	2.73
湿潤密度 (g/cm ³)	1.44~ 1.47	1.67~ 1.68	1.64
自然含水比 (%)	91~93	51~54	60~62
液性限界 (%)	93	77	113
塑性限界 (%)	36	29	34
塑性指数	57	48	79
過圧密比 OCR	1.1	1.4	4.1
サンプリング方法	シンウォール	水圧式	デニソン



図一 粒径加積曲線

ズドライ) 法を用いた。フリーズドライ法は、種々の材料を氷点下の温度で凍結させ、その状態のまま昇華によって乾燥させる方法であり、乾燥過程で生じる体積変化は小さく、試料の物理的、化学的変化も少ないことが知られている^{14,15}。本実験では、凍結時に試料の骨格を壊さないように、試料を液体窒素 (-196℃) で瞬結させた後、-10℃の真空下で水を昇華させ乾燥させた。

調整した試料の間隙径の測定には、間隙に水銀を圧入することで間隙径を測定するポロシメータを用いた。ポロシメータによる間隙径の測定原理は、粘土の間隙がすべて連続した円筒状であると仮定した Washburn の提案式¹⁶に基づいている。実際の測定は、試料の入ったガラスセル内を真空脱気して段階的に水銀を注入し、注入圧力と注入量の関係から、試料の間隙径分布を算出した。なお、本実験に用いた装置は、最大 225MPa まで水銀を圧入可能であるので、間隙直径は、180~0.005 μm の範囲で測定可能である。

電子顕微鏡による観察は、試料を液体窒素により瞬結させた後、試料に曲げ衝撃を加えることで破綻面を形成し、それを観察面とした（観察面は鉛直断面とした）。 -10°C の真空下で水を昇華、乾燥させ、ステンレス製の台座に観察面が上になるように固定した後、観察面表面に金を吹き付け、電子顕微鏡観察を行った。

(2) 実験結果と考察

大阪湾粘土及び京都粘土で実施したX線回折結果を図-2に示す。図に示した回折角と回折強度のピーク値をみると、大阪湾粘土及び京都粘土ともにほぼ同じ傾向を示している。優勢な粘土鉱物は、スメクタイト(S)、クロライト(緑泥石:C)、カオリン(K)、イライト(I)及び複合した粘土鉱物(可能性としては、スメクタイトとパーミキュライト)である。これらの結果より、大阪湾粘土と京都粘土は、粘土自体を構成する粘土鉱物が同一であるので、地層形成時の土粒子の供給源がほぼ同一であると判断出来る。

次に、各粘土の不攪乱状態での間隙径の分布状況を図-3及び4にまとめるとともに、電子顕微鏡写真を写真-1~3に示した。なお、図中の d_p は間隙径(直径: μm)を、 V は乾燥土1gに占める間隙の体積(cm^3/g)を示す。したがって、図-3において、縦軸に $dV/d\log d_p$ を、横軸に $\log d_p$ をとっているため、図中の曲線内部を積分すると(曲線内部の面積)、乾燥土1gに占める全間隙体積を表わすことになる。

a) 間隙径分布

松尾と嘉門¹⁷⁾は、粘性土のマイクロ構造を構成する基本単位として、土粒子の集合体をベッド、間隙をポアと名称し、表-2に示すような分類を行っている。このような基本単位を定めると、ベッドは物理化学的な力の作用する上限の単位とみなすことが出来る。そして、ベッド内部では安定状態に至り、ベッド間においては単に機械的な力のみが作用すると仮定できる。なお、外力によるベッドの変形は許し、ベッド中のポアの変化は物理化学的な力の平衡に依存するものと考えることが出来る。図-4では測定結果をより分かりやすく表現するために、マイクロポア($0.01\sim 1\mu\text{m}$)を、さらに4段階に区分して表示した。

図-3の間隙径分布曲線が示すように、各粘土ともに曲線がある一つの間隙径でピークを示し、間隙径の分布範囲も、概ね1スパンのログスケール内におさまっている。つまり、大小さまざまな間隙径が入り混じっているのではなく、比較的単一の間隙径から構成されていることが分かる。

間隙径分布のピーク値は、沖積粘土で $1\sim 2\mu\text{m}$ 付近、大阪湾及び京都粘土で $0.3\sim 0.5\mu\text{m}$ 付近にある。ピークの立ち上がりは、大阪湾及び京都粘土に比べ、沖積粘土

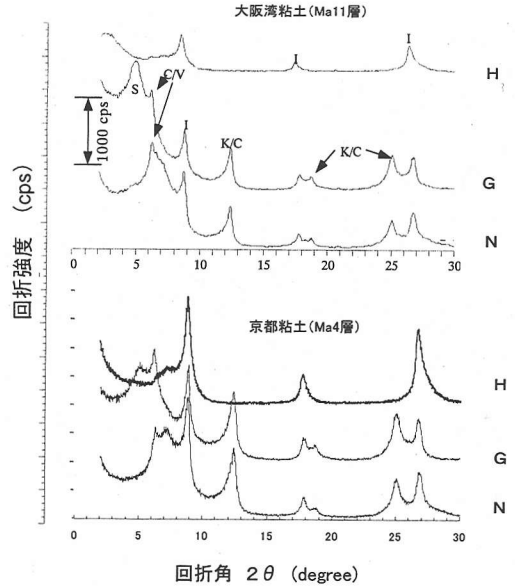


図-2 X線回折結果図(図中のNは自然状態試料、Gはグリセロール処理試料、Hは 550°C 加熱試料の結果)

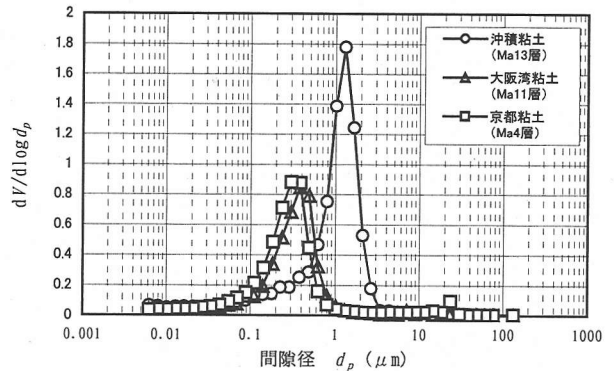


図-3 不攪乱状態の間隙径分布曲線の比較

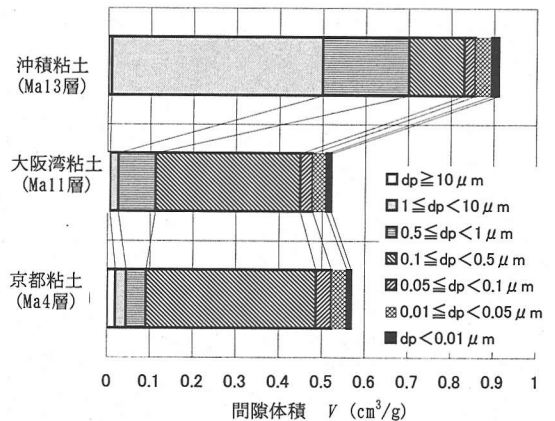


図-4 不攪乱試料の間隙径頻度の比較

表-2 ベッドとポアの区分表

ベッド (ped)	ポア (pore)
マイクロベッド (>50 μm)	マクロポア (>10 μm)
メソベッド (2~50 μm)	メソポア (1~10 μm)
マイクロベッド (0.1~2 μm)	マイクロポア (0.01~1 μm)
サブマイクロベッド (<0.1 μm)	サブマイクロポア (<0.01 μm)

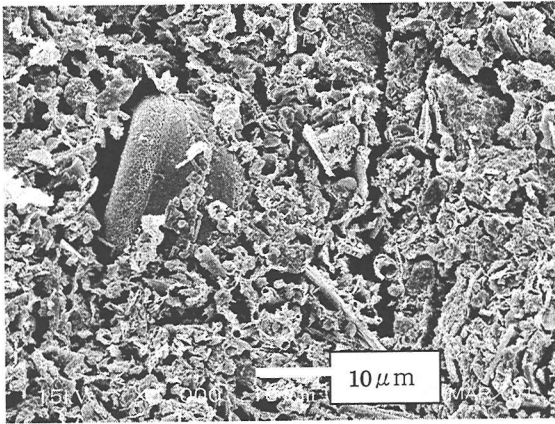


写真-1 沖積粘土 : Ma13 層

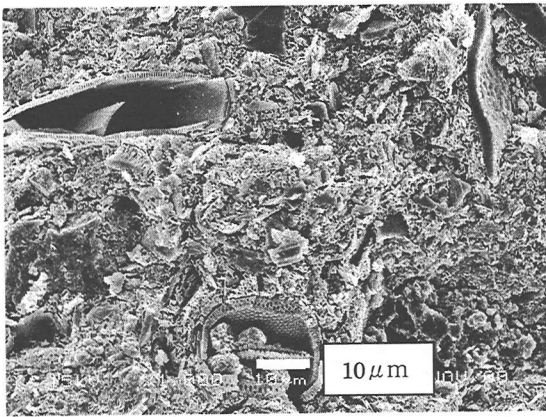


写真-2 大阪湾粘土 : Ma11 層

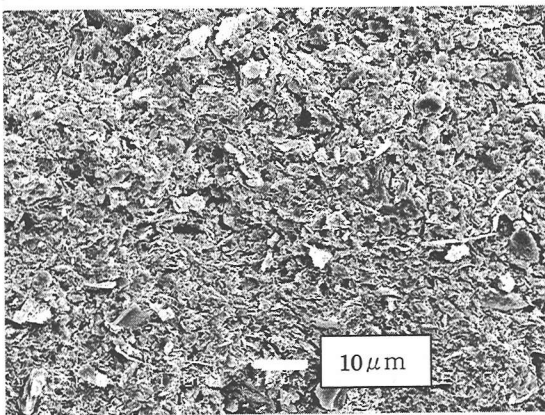


写真-3 京都粘土 : Ma4 層

がよりシャープで、間隙径がより均一であるといえる。大阪湾粘土と京都粘土の間隙径分布曲線の形状は似かよっているが、やや京都粘土の方の間隙が小さい。図-4から分かるように、どの粘土も10 μm 以上のマクロポアに区分される間隙径は存在しない。沖積粘土の間隙径は、1~3 μm のメソポアと、0.01~1 μm のマイクロポアがほぼ同程度の体積を占めている。これに対し、大阪湾及び京都粘土の間隙径は、ほとんどすべてが、1 μm 以下のマイクロポアで占められている。

b) 電子顕微鏡による観察

前述したように、大阪湾粘土と京都粘土は含んでいる粘土鉱物が同一であり、地層形成時の土粒子の供給源がほぼ同一であると考えられる。しかしながら、電子顕微鏡による観察結果から、大阪湾粘土には非常に多くの珪藻等微化石を含んでいることがわかった。これに対し、京都粘土は珪藻類は含むが、その混入量はわずかである。このことから、大阪湾粘土と京都粘土は土粒子の供給源は似ているが、地層が堆積した環境はかなり異なるものと考えられる。一方、沖積粘土は、大阪湾粘土と同一地点から採取されており、大阪湾粘土と同様に多量の珪藻類の混入が観察される。したがって、堆積時の環境は、大阪湾粘土と比較的似かよっていたものと考えられる。

今回実験に用いた沖積粘土は、有明粘土と広島粘土に関して行われた三浦らの研究⁷⁾と同じく、土粒子の集合体(ベッド)が相互に連結(リンク)している様子が明瞭に観察される。ベッドの大きさは数 μm ~5 μm 前後のものが多く、表-2の区分に従うと、マイクロベッドとメソベッドの境界付近の大きさである。また、ベッド間の間隙(ポア)も明瞭に観察される。間隙の大きさは、図-3に示されている1~2 μm 付近のものが主体になっている様子が観察される。また、沖積粘土は大阪湾粘土と同様に非常に多くの珪藻類の混入がみられる。

大阪湾粘土及び京都粘土は、沖積粘土にみられたようなベッドの存在は明瞭に確認できるが、ベッド間がかなり密着しており、リンク構造が判然としない。これらの粘土の間隙径は、0.2~0.3 μm が主体となっており、ベッド間の間隙はかなり小さい。これは、沖積粘土に比較して、既により大きな圧力で圧密されているためである(表-3の圧密降伏応力を参照)。

4. 圧密に伴う微視構造特性の変化

(1) 実験方法

圧密進行に伴う微視構造の変化を把握するために、所定の圧力まで圧密した試料を用いて、ポロシメータ試験及び電子顕微鏡による観察を行った。

実験に用いた試料は、採取深さ、圧密降伏応力等が異なるので、これを極力統一的に扱えるように、以下に示す4ケースの圧密圧力で圧密した試料を用いることにした(図-5参照)。

圧密圧力：A

不攪乱試料採取時の状態。

圧密圧力：B

圧密降伏応力の1.05~1.10倍の圧力。

圧密圧力：C

ログスケールで、B点と最大圧力であるD点との中間付近の圧力。

圧密圧力：D

今回使用した圧密試験機の最大荷重可能圧力で、10MPa。

なお、実験では、同一のサンプリングライナーから4個の供試体を取り出し、圧密試験機を用いて所定の圧密圧力まで圧密させた。供試体寸法は、通常の直径6cm、厚さ2cmとし、排水条件は両面排水とした。圧密圧力の荷重は40kPaから、荷重増加率を1.0として段階的に荷重し、1段階の荷重放置時間は24時間とした。所定の荷重(圧密圧力A~D)による圧密が終了した後、速やかに圧密リングから試料を取り出し、ポロシメータ試験及び電子顕微鏡用の供試体を作製した。この後の試験方法は、3章で示した方法と同一である。各試料毎の圧密圧力(図-5のA~Dの圧力)は、表-3にまとめる。

(2) 実験結果と考察

実験に用いた各試料の圧密に伴う間隙径変化を図-6~11に、電子顕微鏡写真を写真-4~6に示す。電子顕微鏡の観察面は、不攪乱試料の場合と同じ鉛直断面で、写真の上下方向が試料の鉛直方向に一致している。また、最終圧密圧力(D:10MPa)時の各粘土の間隙径分布を図-12, 13に一覧としてまとめた。以上の結果をもとに、圧密に伴う微視構造変化に対して以下に検討を加える。

a) 沖積粘土 (Ma13層)

圧密圧力A→B段階での間隙径分布を比較すると、1μmより大きいメゾポアに相当する間隙体積が主に減少している。ただし、これより小さい間隙の体積はほとんど

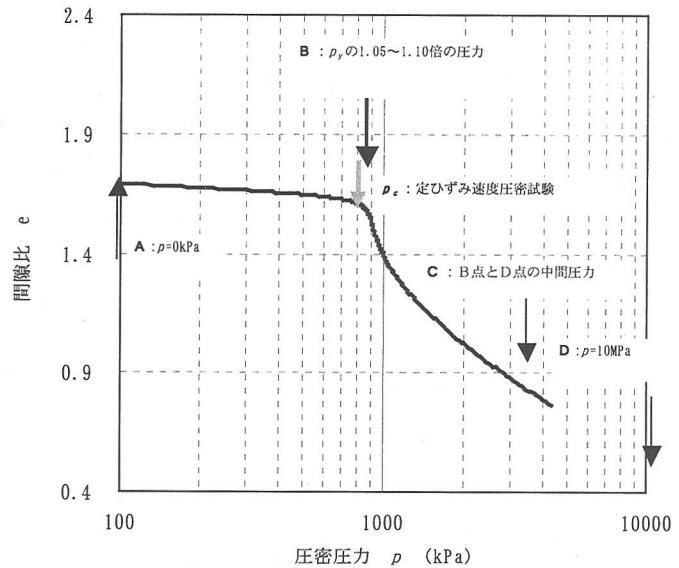


図-5 微視構造測定のための圧密圧力概念図

表-3 微視構造測定のための圧密圧力一覧表

試料名	圧密圧力 (MPa)				圧密降伏応力 p_c (MPa) [*]
	A	B	C	D	
沖積粘土 Ma13層	0	0.08	2.5	10	0.07
大阪湾粘土 Ma11層	0	0.94	3.1	10	0.89
京都粘土 Ma4層	0	0.94	3.5	10	0.85

^{*}定ひずみ速度圧密試験(ひずみ速度0.02%/min)による

変化していない。A段階の間隙径分布の測定は、現地から採取した試料をそのまま用いているため、A~B段階に至る過程の測定結果には応力解放等による乱れの影響が含まれている。

圧密圧力がB→C段階になると、間隙径分布曲線が、全体に間隙の小さい方へ移動するとともに、全間隙体積が顕著に減少する。これは、間隙全体が大きく圧縮され、逐次より小さい間隙に変化していることを示している。B→C段階まで圧密が進むと、全間隙体積は約半分まで減少する。電子顕微鏡観察によると、B段階ではベッドとそれを連結するリンクの様子が明瞭に見えていたが、C段階になると、ベッド間の間隔が確認しづらくなり、リンク構造も見えない程度まで間隙の圧縮が進行してい

る。また、ベッド自体の変形が大きくなっていく様子も観察される。

圧密圧力がC→D段階になると、間隙径分布曲線は、さらに間隙の小さい方へ移動する。電子顕微鏡観察からは、ベッドあるいは含まれる珪藻の変形がさらに進行する様子が伺われる。

圧密圧力Dの段階において、 $0.03\mu\text{m}$ 以下の小さな間隙に変化はみられなかった。有明粘土と広島粘土（ともに沖積粘土）を用いた三浦らの研究⁷においては、不攪乱試料を最大圧力 1.4MPa で圧密した場合、 $1\mu\text{m}$ 以下のミクロポアには変化がなかったことが報告されている。今回の実験では、三浦らの実験よりはるかに高い圧密圧力（ $\rho=10\text{MPa}$ ）まで載荷し、 $0.03\mu\text{m}$ までの小さな間隙まで圧密の影響が及ぶことが確認できた。

b) 大阪湾粘土 (Ma11層)

圧密圧力A→B段階での間隙径分布を比較すると、 $0.4\mu\text{m}$ より大きい間隙の体積が減少し、それより小さい間隙の体積はほとんど変化していない。前述の沖積粘土と同様に、この段階での結果にはサンプリングに伴う応力解放等に伴う乱れの影響が含まれている。

圧密圧力B段階では、 $0.2\sim 0.5\mu\text{m}$ の間隙がもっとも多く存在している。C段階まで圧密が進むと上記サイズの間隙体積が主に減少していく。また、それより小さい間隙（間隙径 $0.1\mu\text{m}$ 前後）の体積がわずかに増加する。

C段階における間隙径分布曲線は、大阪湾粘土と沖積粘土でほぼ同じ形状となる（全間隙体積もほぼ同じ）。これは、エージング効果により形成されていた粘土の構造が（大阪湾粘土の方が、沖積粘土よりも地層形成時期が古い）ため、構造がより発達していると考えられる。なお、ここでは粘土の構造を、物理特性が同一である場合に、同一の間隙体積により受け持つことが出来る圧密圧力の大きさと定義する。）、この圧力段階で、ほぼ同程度まで破壊されることを示している。電子顕微鏡観察でも、ベッド同士が密着していくとともに、ベッド自体の変形が認められる。

圧密圧力C→D段階では、間隙径の分布曲線自体が、全体に間隙の小さい方へ移動していき、間隙全体が次第に圧縮され、逐次より小さい間隙に変化していく様子が伺われる。電子顕微鏡の観察では、ベッド自体がさらに扁平になり、ベッド間の間隔も密着する。

圧密圧力D段階において、沖積粘土とほぼ同じ $0.03\mu\text{m}$ の間隙径まで圧密の影響が及んでいることが確認できた。

c) 京都粘土 (Ma4層)

圧密圧力A→B段階での間隙径分布の変化傾向は、大阪湾粘土とほぼ同じである。また、同様に応力解放等による乱れの影響も受けている。

B→C段階では、間隙径の分布曲線が全体に間隙の小

さい方へ移動し、既にこの段階で間隙全体が次第に圧縮され、逐次より小さな間隙に変化している。B段階では、 $0.2\mu\text{m}$ 前後の間隙の体積がもっとも多かったものが、C段階では $0.1\mu\text{m}$ 前後の間隙の体積がもっとも多くなる。電子顕微鏡観察によると、既にC段階でベッド自体の構造が破壊され、ベッドが扁平に積み重なる状況が観察される。京都粘土は、大阪湾粘土に比べて、より小さい圧力でベッド自体の構造が破壊されている。

C→D段階では、間隙径の分布曲線が更に間隙の小さい方へ移動していき、 $0.1\mu\text{m}$ 以下のサイズの間隙だけとなる。電子顕微鏡観察によると、ベッドの破壊、ベッド間の密着は更に顕著になる。

圧密圧力D段階において、京都粘土は沖積粘土及び大阪湾粘土よりも、より小さい間隙まで（ $0.01\mu\text{m}$ 前後の間隙サイズまで）圧密による影響が及んでいる。

d) 圧密圧力 (D段階: $\rho=10\text{MPa}$) での間隙径の比較

図-12, 13に実験に用いた各粘土の最大圧密圧力 (D段階: $\rho=10\text{MPa}$) での間隙径分布を一覧で示した。

沖積粘土と大阪湾粘土は、ほとんど同じ間隙径分布を示す。これらの粘土は、同一地点で採取された海成の粘土であり、堆積環境はほとんど同じであると考えられる。粒度特性、塑性指数なども比較的似ており、電子顕微鏡観察からは、ともに多くの珪藻類の混入が観察され、ほぼ同様な外観を呈している。しかし、これらの粘土の形成時期は異なり、沖積粘土に比較して、大阪湾粘土の方がエージング効果による粘土粒子間の構造が発達しているものと考えられる。このように、構成粘土鉱物、物理特性、含まれる珪藻類等が似かよっている粘土を、高圧力で圧密をすると、時間をかけて形成された粘土の構造は壊れてしまい、最終的に似たような間隙径分布になるものと考えられる。

一方、京都粘土については、沖積粘土及び大阪湾粘土に比べ、同一圧力で圧密した場合、はるかに間隙が小さくなる。圧密後の電子顕微鏡写真をみても、京都粘土のベッドの変形、密着は最も顕著である。前述のように、京都粘土と大阪湾粘土に含まれる粘土鉱物は基本的に同じで、地層形成時の土粒子の供給源は同一であると考えられる。しかしながら、大阪湾粘土と京都粘土が堆積した環境は異なっていると考えられ、それが、粒度分布や塑性指数の違い、珪藻類の混入の違いに反映している。このような堆積環境の相違が、圧密に伴う微視構造の違いに反映しているものと考えられる。

以上を総合的に判断すると、高圧で圧密後、終局的に達するであろう間隙径分布は、粘土鉱物の種類あるいは塑性指数などの物理特性とも関係するが、珪藻類などの微化石類と粘土鉱物が組み合わさった形での粘土構成物の違いが関与していることが指摘できる。

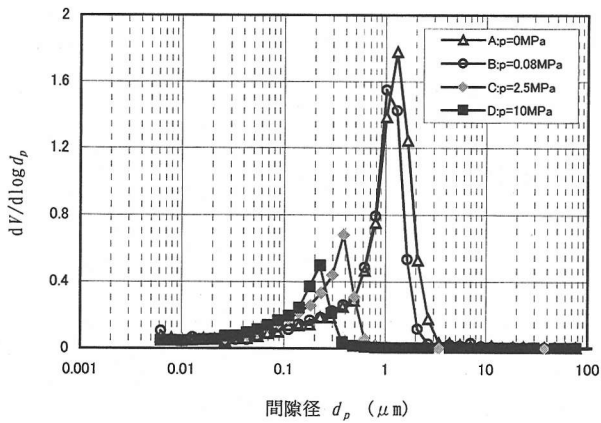


図-6 圧密に伴う間隙径分布曲線の変化
(沖積粘土: Ma13 層)

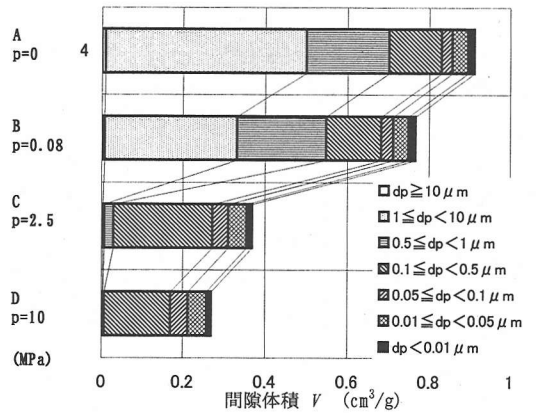


図-7 圧密に伴う間隙径頻度の変化
(沖積粘土: Ma13 層)

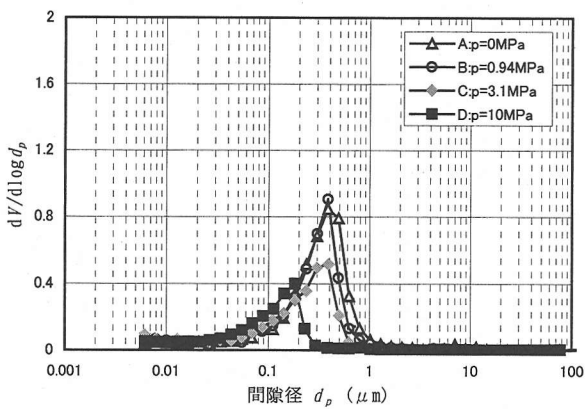


図-8 圧密に伴う間隙径分布曲線の変化
(大阪湾粘土: Ma11 層)

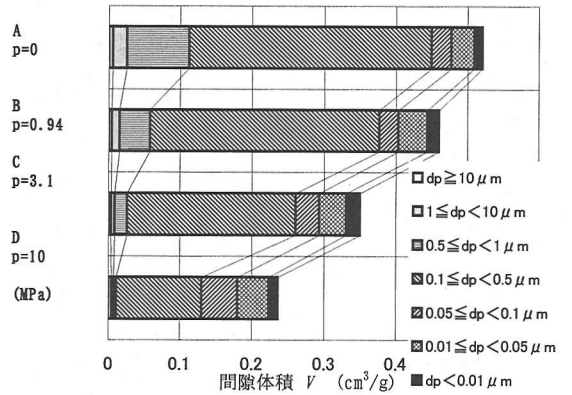


図-9 圧密に伴う間隙径頻度の変化
(大阪湾粘土: Ma11 層)

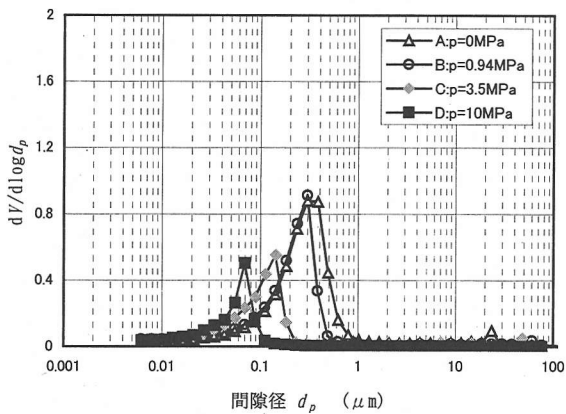


図-10 圧密に伴う間隙径分布曲線の変化
(京都粘土: Ma4 層)

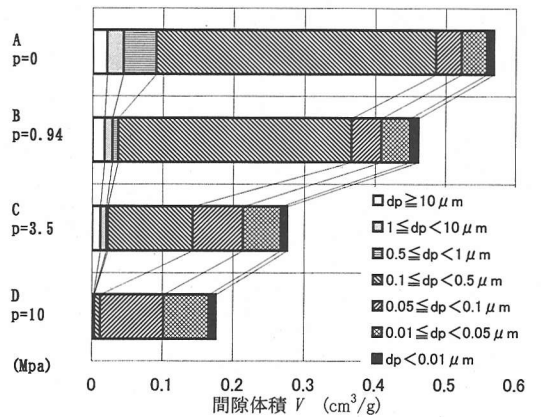


図-11 圧密に伴う間隙径頻度の変化
(京都粘土: Ma4 層)

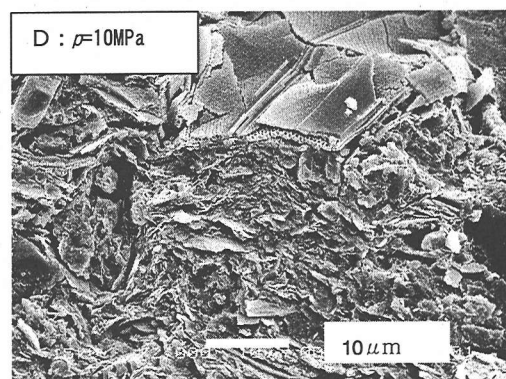
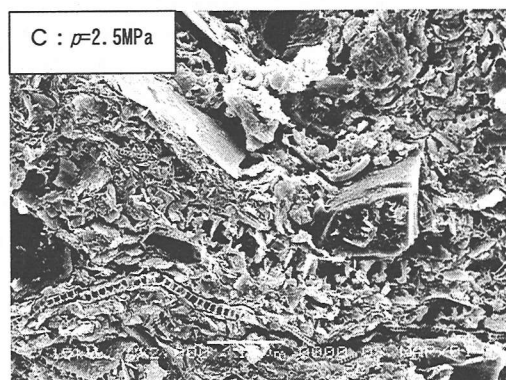
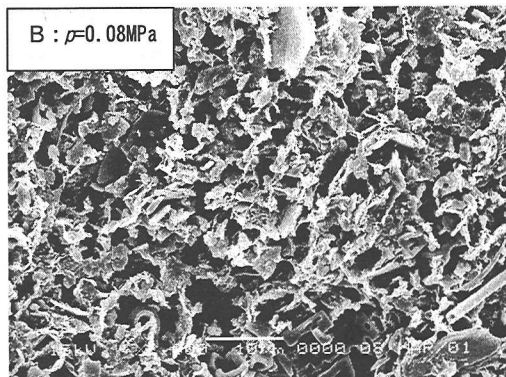
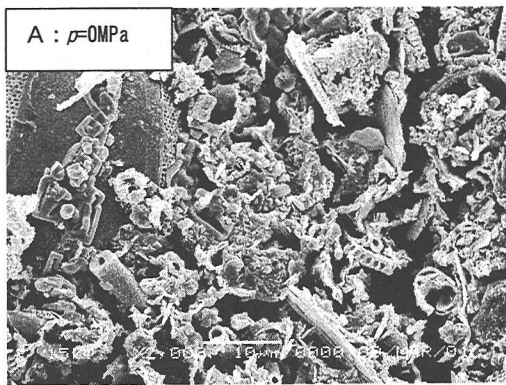


写真-4 圧密に伴う微視構造変化
(沖積粘土 : Ma13 層)

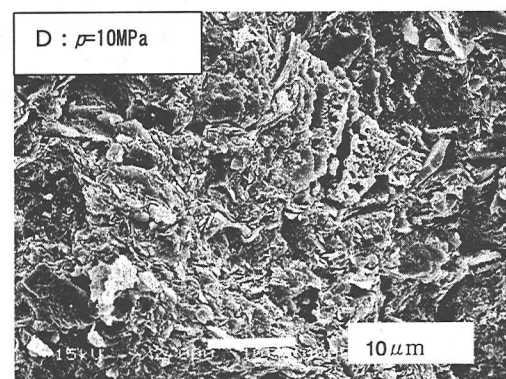
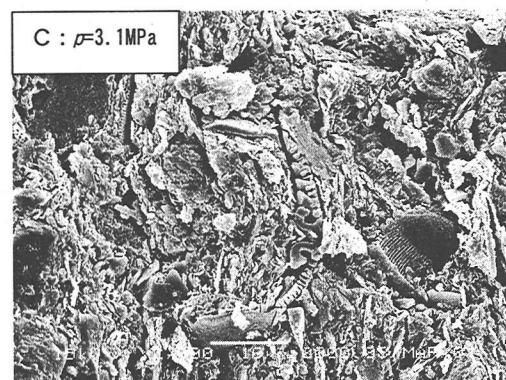
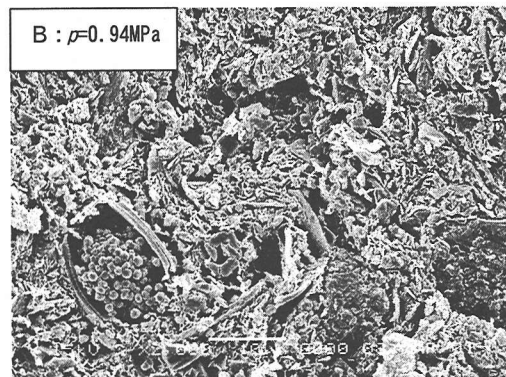
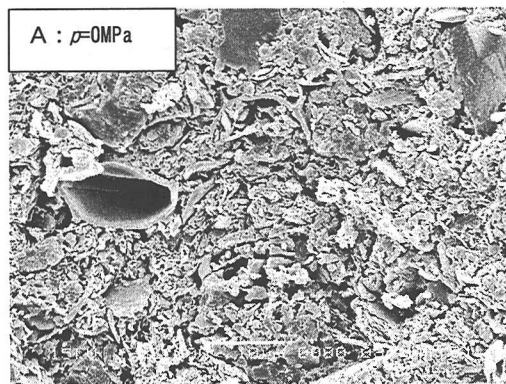


写真-5 圧密に伴う微視構造変化
(大阪湾粘土 : Ma11 層)

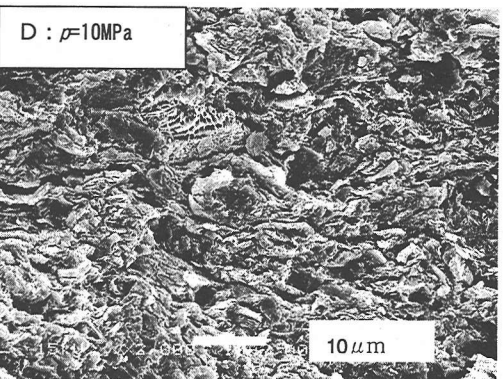
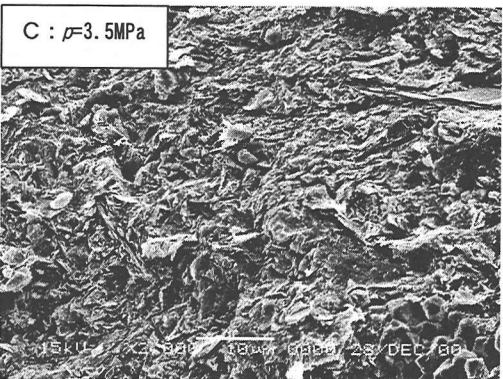
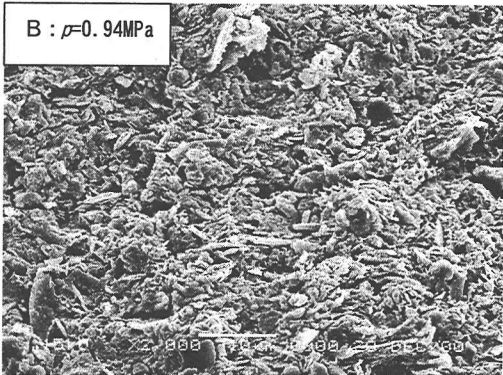
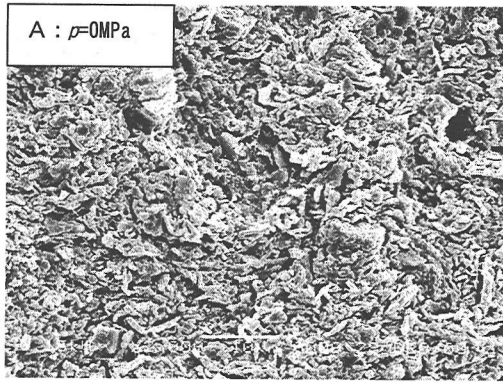


写真-6 圧密に伴う微視構造変化
(京都粘土: Ma4層)

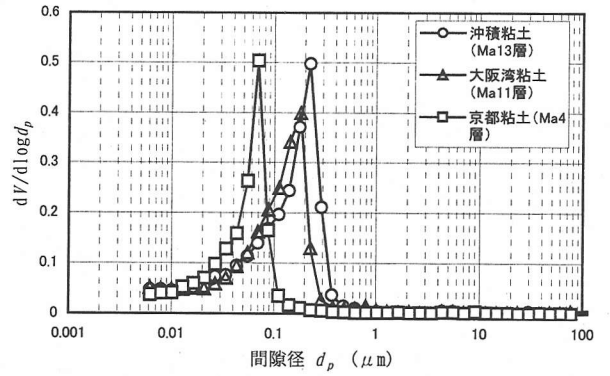


図-12 最終圧密圧力下 ($p=10\text{MPa}$) での
間隙径分布曲線の比較

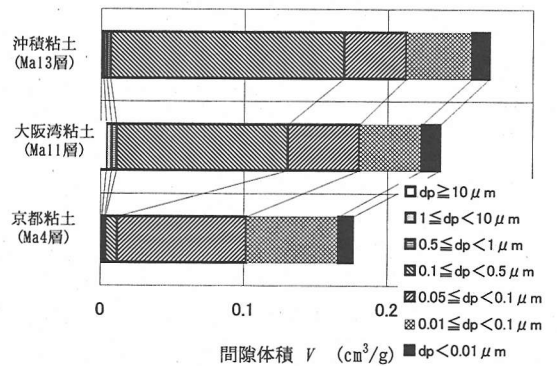


図-13 最終圧密圧力下 ($p=10\text{MPa}$) での
間隙径頻度の比較

5. まとめ

本研究では、洪積粘土の不攪乱状態及び圧密に伴って変化する微視構造特性を、水銀圧入型ポロシメータによる間隙径分布の測定と、電子顕微鏡観察から明らかにした。得られた結論は、以下のとおりである。

- (1) 実験に用いた大阪湾粘土 (Ma11層) と京都粘土 (Ma4層) の粘土鉱物組成は、同一であるとみなせる。ただし、京都粘土の粒径のほうがやや細粒で、塑性指数も大きい。また、京都粘土には、珪藻類がわずかしこ混入していないのに対し、大阪湾粘土は多量の珪藻類を混入している。沖積粘土 (Ma13層) は、大阪湾粘土と物理特性が類似し、大量の珪藻類を混入している。
- (2) 不攪乱状態の沖積粘土は、 $1\sim 3\mu\text{m}$ のメソポアと、 $0.01\sim 1\mu\text{m}$ のマイクロポアがほぼ同体積を占めている。これに対し、大阪湾粘土及び京都粘土は、 $1\mu\text{m}$ 以下のマイクロポアのみで構成されている。沖積粘土では、土粒子の集合体 (ベッド) が相互に連

結（リンク）している様子が観察されるが、大阪湾粘土及び京都粘土では、ベッドは確認されるものの、ベッド同士がかなり密着しておりリンク構造は判然としない。

- (3) 沖積粘土と大阪湾粘土は、粒度特性、塑性指数や混入する珪藻類等が似かよっているが、その形成時期は異なり、沖積粘土に比較して大阪湾粘土の方がエージング効果による粘土粒子間の構造が発達しているものと考えられる。これらの粘土は、不攪乱状態では全く異なる間隙径分布を示すが、圧密降伏応力を超えて高压で圧密されると、粘土の構造は壊れ、類似した間隙径分布になる。
- (4) 京都粘土は、大阪湾粘土と含まれる粘土鉱物は同一であるが、粒度分布がより細粒で、塑性指数が大きく、珪藻類の混入が少ない。また、地層の形成時代は、大阪湾粘土よりもはるかに古い。この粘土を圧密した場合、同一圧密圧力で比較すると、大阪湾粘土よりもはるかに小さい間隙径分布となる。圧密後の電子顕微鏡写真からは、ベッドの変形、密着は、大阪湾粘土よりも顕著であることが観察された。
- (5) 圧密降伏応力を超えた高压で圧密後、最終的に達するであろう間隙径分布は、粘土の形成時期の違いにはあまり影響されないものと考えられる。むしろ、粘土鉱物の種類あるいは塑性指数などの物理特性、珪藻類の混入を含めてみたマクロ的な粘土構成物自体の違いが関与していることが指摘できる。

参考文献

- 1) 土田孝：大深度の洪積粘土の $e-\log p$ 関係における構造の影響，土木学会第 51 回年次学術講演会，pp. 376-377, 1996.
- 2) 山本浩司，本郷隆夫，陳国華，赤井俊文：大阪湾海成粘土の圧密降伏応力付近の長期圧密特性，第 35 回地盤工学研究発表会，pp. 721-722, 2000.
- 3) 赤井浩一，佐野郁雄：大阪上部洪積層粘土の長期圧密特性，土と基礎，Vol. 29, No. 3, pp. 43-47, 1981.
- 4) Delage, P. and Lefebvre, G : Study of the structure of a sensitive

- Champlain clay and of its evolution during consolidation, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.21, pp.21-35, 1984.
- 5) Lapiere, C., Leroueil, S. and Locat, J. : Mercury intrusion and permeability of Louiseville clay, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.27, pp.761-773, 1990.
 - 6) 鬼塚克忠，根上武仁：有明粘土の乱さない試料および再圧密試料の微視的構造変化，土と基礎，Vol. 46, No. 4, pp. 17-20, 1998.
 - 7) 三浦哲彦，山寺彰，日野剛徳：間隙径分布の測定に基づく海成粘土の圧縮特性に関する考察，土木学会論文集，No. 624/III-47, pp. 203-215, 1999.
 - 8) 立石義孝：珪藻土の工学的特性と切土斜面表層の安定に関する研究，佐賀大学工学系研究科博士論文，1997.
 - 9) 八嶋厚，重松宏明，岡二三生，長屋淳一：上部大阪洪積粘土の力学特性と構造変化，土木学会論文集，No. 624/III-47, pp. 217-229, 1999.
 - 10) Tanaka, H. and Locat, J. : A microstructural investigation of Osaka Bay clay : the impact of microfossils on its mechanical behaviour, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.36, pp.493-508, 1999.
 - 11) 市原実：大阪層群，創元社，1993.
 - 12) 土質工学会関西支部編：海底地盤，海底地盤の土質，pp. 101-188, 1995.
 - 13) 藤田和夫：近畿地盤の背景としての地形・地質，土と基礎，Vol. 36, No. 11, pp. 9-14, 1988.
 - 14) 加藤瞬朗：食品冷凍の理論と応用，光琳書院，pp. 945-960, 1972.
 - 15) 高野玉吉，唯野哲男：食品工業の乾燥，光琳書院，pp. 223-279, 1975.
 - 16) Washburn, E.W. : Note on a method of determining the distribution of pore sizes in porous material, *Proceedings, National Academy of Science*, Vol.7, 99.115-116, 1921.
 - 17) 松尾新一郎，嘉門雅史：粘土の構造に関する用語について，土と基礎，Vol. 24, No. 1, pp. 59-64, 1976.

(2001. 5. 14 受付)

THE CHANGE IN MICROSTRUCTURE OF PLEISTOCENE CLAYS DUE TO ONE DIMENSIONAL CONSOLIDATION

Fusao RITO, Naoki OHMUKAI, Hiroyuki TANAKA and Masanori TANAKA

The difference in microstructure of two Pleistocene clays is studied. Osaka bay clay and Kyoto clay consist of the same minerals, belonging to the Osaka Group (Osaka bay clay is Ma11, and Kyoto clay is Ma4). According to the series of observation by SEM, it is known that the content of Diatom of Osaka bay clay is much larger than that of Kyoto clay. The change of micro pore size distribution due to one-dimensional consolidation was studied by a mercury intrusion porosimeter. The pore size distribution of Kyoto clay changed sensitively with the increment of consolidation pressure, however, in the case of Osaka bay clay, the change was not so clear as Kyoto clay. In the final consolidation pressure of 10MPa, the pore size of Kyoto clay was smaller than $0.1 \mu\text{m}$, while that of Osaka bay clay ranged between $0.01 \mu\text{m}$ and $0.3 \mu\text{m}$. The reason of this difference is related with the content of microfossils such as Diatoms.