

高温履歴を受ける粘性土の微視的構造と
工学的性質の変化に関する研究

(課題番号 11650508)

平成 11 年度～平成 12 年度科学研究費補助金

(基盤研究 (C) (2)) 研究成果報告書

平成 13 年 3 月

研究代表者 森 脇 武 夫

(広島大学・工学部・助教授)

は し が き

経済活動の進展によって、近年、地盤が高温環境に曝される機会が増えている。生石灰パイルなどによる化学的地盤改良、核廃棄物の地中処理、ゴミの埋め立て処分に伴う地盤の高温化がその代表的な例である。特に、核廃棄物の地中処理においては、ガラス固化され、ステンレス性容器に納められた高レベル放射性廃棄物は、ベントナイトなどの粘性土で取り囲まれた状態で保管されるが、この粘性土及び周辺地盤は放射性廃棄物の崩壊熱によって 100~300℃程度の高温環境に極めて長期間曝される。そのため、核廃棄物を安全に保管するとともに、周辺の地下水汚染を引き起こさないようにするためには、高温環境に曝されることによって粘性土の工学的な性質がどのように変化するかを明らかにしておくなければならない。

そこで本研究では、ベントナイトを中心とする粘性土が高温履歴を受けるときの、強度・変形特性と圧縮・圧密特性がどのように変化するかを、水の蒸発を抑えて密閉状態のもとで 50~200℃の高温履歴を自由に与えることのできる高温対応型高圧三軸セルを製作して明らかにする。

また、これまでの温度効果に関する研究では、温度履歴による粘性土の工学的性質の変化だけが調べられていたが、本研究では申請者が開発した粘性土の電子顕微鏡写真を画像解析することによって粒子構造を定量化する手法を用いて、高温履歴による粘性土の微視的構造の変化を明らかにし、どのようなメカニズムによって粘性土の工学的性質が変化するかを明らかにする。

研究組織

研究代表者：森 脇 武 夫 （広島大学・工学部・助教授）

研究経費

平成11年度	2,600千円
平成12年度	1,100千円
計	3,700千円

研究発表

(1) 学会誌等

- 1) Takeo MORIWAKI and Yoko WADA : Quantitative evaluation of microstructure of clay, Proceedings of International Symposium on Suction, Swelling, Permeability and Structure of Clays, Vol. 1, pp.411-418, 2001年1月.

(2) 口頭発表

- 1) 森脇武夫・平林岳樹：粘土の微視的構造と力学特性に及ぼす温度および時間効果、第51回土木学会中国支部研究発表会発表概要集, pp.417-418, 1999年6月.
- 2) 森脇武夫・古川重幸：高温圧密による粘土の微視的構造と工学的性質の変化、第52回土木学会中国支部研究発表会発表概要集, pp.309-310, 2000年6月.
- 3) 森脇武夫・木下洋樹・井上豊美：高温履歴を受けた粘性土の変形・強度特性、第53回土木学会中国支部研究発表会発表概要集, 2001年6月（発表予定）.
- 4) 森脇武夫・木下洋樹・井上豊美：100℃を越える高温履歴を受けた粘性土の力学特性、土木学会第56回年次学術講演会、2001年9月（発表予定）.

第1部

高温履歴を受けた粘性土の圧縮・圧密および変形・強度特性

目 次

第1章	序論	1
第2章	既往の研究	3
2.1	概要	3
2.2	粘土の構造	3
2.3	年代効果	4
2.4	高温環境にさらされる地盤	6
2.5	高温環境が粘性土へ及ぼす影響	10
第3章	試験に用いた試料の物理化学的性質	17
3.1	試験に用いた試料	17
3.2	カオリン，ベントナイトの基本的性質	17
3.3	試料の作成	18
3.4	配合試料の物理的，力学的性質	20
第4章	試験方法及び試験装置	21
4.1	概要	21
4.2	試験方法	21
第5章	試験結果及び考察	28
5.1	概要	28
5.2	高温三軸圧縮試験	29
第6章	結論	49
	参考文献	51

第 1 章 序論

粘土を 1000℃ 程度の高温環境下に置くと、その特性が大きく変化することは周知のことであり、陶磁器の製作などは、その利用例の代表である。また、粘土を 60℃～90℃ 程度の比較的低い高温環境に長時間さらした場合でも粘土の挙動および特性に微妙な影響を与えることが判明している。一方近年、粘土を加熱すると年代効果が加速され不攪乱自然粘土試料を実験室で再現できる可能性が示されており、粘土を高温環境下で再圧密する方法が提案されている。またこれとは別に、経済活動の進展に伴って地盤が高温環境に曝される機会が増加している。すなわち、化学的な地盤改良地盤、高レベル放射性廃棄物の地中処分およびごみ埋立地盤などがその代表的な例であり、熱履歴を受けた土および地盤の変形・強度特性を知ることの重要性が指摘されている。

特に、高レベル放射性廃棄物の地中処分においては、ガラス固化された高レベル放射性廃棄物はステンレス性容器（オーバーパック）に納められ、安定な地下深部の岩盤に掘削された坑道に埋設される。この際オーバーパックと岩盤の間には粘土質の緩衝材が充填されるが、高レベル放射性廃棄物の熱崩壊によってこの粘性土および周辺地盤は 100℃～300℃ 程度の高温環境に極めて長期間さらされる。そのため、高レベル放射性廃棄物を安全に保管するとともに、周辺の地下水汚染を引き起こさないようにするためには、高温環境にさらされることによって、粘性土の工学的な性質がどのように変化するかを明らかにしておくかなければならない。そして、高温履歴を受ける粘性土の工学的性質の変化を明らかにし、そのメカニズムを本質的に解明することで、地盤や構造物の安全性を確保することや、地盤環境を保全することなど様々な問題を解決するのに貢献できる。

以上のような背景を踏まえて、本研究では温度履歴を受けた粘性土の工学的性質について調べる。具体的な方法としては、高温高圧型三軸試験装置を用いて \overline{CU} （圧密非排水三軸圧縮）試験を行い、温度履歴を受けた粘性土の強度・変形特性、圧縮・圧密特性について考察する。試験においては、試料としてベントナイトおよびカオリンを用いた。ベントナイトは放射性廃棄物の地中処分において実際に緩衝材として利用が考えられている材料であり、カオリンはベントナイトとは対照的に化学的に安定した粘土で、温度効果の影響を検討する際には両粘土

の特徴を比較することが効果的である。また試験温度として、高レベル放射性廃棄物の地中処分において設計温度となっている 100℃までを与え、粘性土の工学的性質に及ぼす温度効果の影響を広い範囲で明らかにする。

第2章 既往の研究

2.1 概要

高温効果に関する研究は、1960年代から国内外で行なわれているが、その大半は夏季に太陽で熱せられた路床・路盤の挙動に関するもので、その温度も60℃程度である。また、加熱中の試料の排水条件もまちまちであったので、加熱によるせん断強度の変化に関しても相反する報告が見られる。1980年代に入り、地盤改良や放射性廃棄物の地中処分の問題が発生すると、スウェーデンやイタリアなどから再び粘土を加熱する研究が始まり、日本でも高温三軸試験が行なわれている。しかし、依然として試験温度は90℃程度までである^{1) 2)}。一方、粘土を加熱することによって再構成試料の品質を改善し、年代効果を有する自然堆積粘土を実験室内で再現する方法が提案されている。

本章ではまず、高温環境におかれた粘土の挙動に影響を与える粘土の微視的構造と年代効果について説明する。

2.2 粘土の構造³⁾

土粒子の中で、砂やシルト粒子は球体や楕円体などに近い形状で、厚さをもった土粒子がほとんどである。しかし、粘性土を構成する微細な粘土粒子の形状は、一般に薄片状のものが多く、球体や楕円体のものは極めて少ない。これは粘土鉱物の大きさが数 μm 以下であることや粘土鉱物の結晶構造に関係している。

粘性土では、これらの土粒子は非常に微細なために砂のように個々の土粒子が単独で存在することは極めてまれである。これは粘土粒子の自重が小さいために物理化学的作用が大きいことに起因している。この土粒子が複数個集まった集合体をペッド (ped) と呼び、粘土の構造を構成する最小の基本単位と考えられている。また、間隙をポア (pore) という。このような基本単位としてのペッドは物理化学的な力の作用する上限と見なされ、ペッド内部は通常安定の状態にあり、ペッド間には機械的な力のみが作用すると仮定されている。ただし、外力の作用によってペッドは回転、変形、分割されることもあり得る。

一般に、自然に生成された土は整然とした構造を形成していることが大きな特徴である。長い年月の外的・内的な営力などによってセメンテーション効果や年代効果が生じ、ユニークな力学特性を示すことになる。

2.3 年代効果

自然粘土地盤は非常に長い年月をかけて形成されるため、次のような力学特性を持つ。不攪乱試料と攪乱試料との力学特性の比較を図 2-3-1 に示す。

- | | |
|--------|--|
| 一軸圧縮試験 | <ul style="list-style-type: none"> ・強度・鋭敏比が高い ・破壊時に明瞭なピークが現れる |
| 標準圧密試験 | <ul style="list-style-type: none"> ・圧密降伏応力直後に急激な沈下が生じる ・初期間隙比が大きく、圧密降伏応力が大きい |

これらの特徴は、自然地盤が二次圧密やセメンテーションの作用などの年代効果を受けたためだと考えられ、Bjerrum⁴⁾によって最初に指摘された。

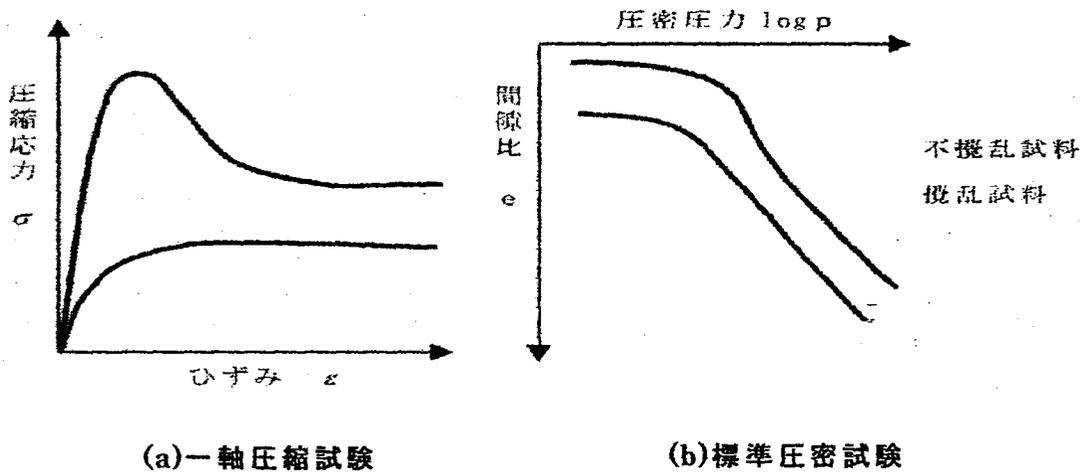


図 2-3-1 力学特性の違い

§1 二次圧密

飽和粘土の圧密において、間隙水圧が消散するまでを一次圧密、消散後の粘土の骨組みの圧縮クリープ現象を二次圧密と呼ぶ。一次圧密終了後、有効応力一定のまま間隙比は減少していき、自然地盤粘土のように長い年月をかけて圧密されるほど締め固まった粘土となる。Bjerrumによると図 2-3-2 の A にある粘土が二次圧密されて 3000 年後には応力一定のまま B の位置まで移動する。B の位置にある粘土で圧密試験を行うと B~C の曲線が得られる。B での粘土は正規圧密領域にあるにもかかわらず圧密降伏応力が存在し、あたかも過圧密粘土であるかのような挙動を示す。このように二次圧密が進むと、擬似過圧密状態が生じる。

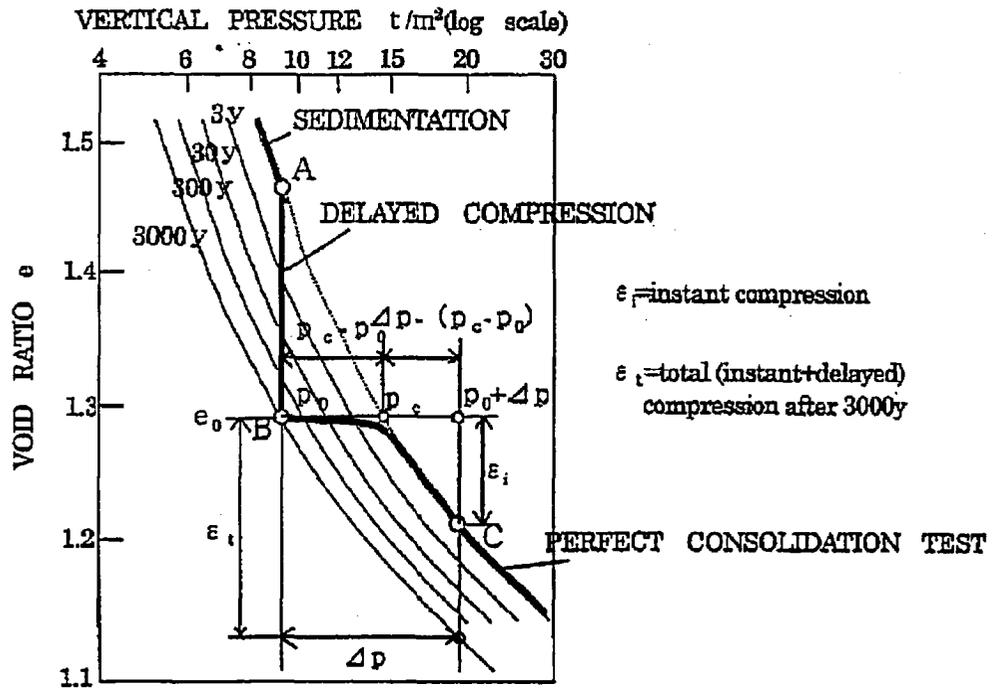


図 2-3-2 Bjerrum の $e - \log p$ 関係の概念図 ⁵⁾

§2 セメンテーション

間隙水圧中の溶存物質や懸濁物質などのセメント物質によって土粒子が結合した状態、またはその作用をセメンテーションといい、こう結作用とも呼ばれる。セメンテーション的な結合は、粒子間に吸着あるいは沈殿したコロイド状のシリカ、鉄、アルミニウムの水酸化物、有機物、各種の炭酸塩などのセメント物質によって生じる。セメント作用は本質的にセメント物質と土粒子との付着と考えられており、粒子構造の骨格部分の強度を上げるが、土の練り返しによってセメンテーションは壊れ、構造がいったん壊れるとその作用は消えてしまう。このセメンテーションによる結合力はイオンによる結合力に比べて小さいので、結合力を発揮するような沈殿が生じるためには長い時間を必要とする。また、セメンテーションによっても擬似過圧密が生じることが Bjerrum によって示された。

セメンテーションによって粒子間の化学的な固結作用が進行する場合、間隙比は変化せずに p_c が増加し、 p_c 付近の $e - \log p$ 関係は右上部に膨らむ傾向を示す。この結果、圧密圧力が p_c を超えた直後の圧縮性が非常に大きくなる ⁶⁾。

2.4 高温環境にさらされる地盤

自然界で温度履歴を受ける地盤としては、化学的な地盤改良を施工した地盤や廃棄物地下処分周辺地盤、ごみ埋立地盤、温泉地帯地盤などが挙げられる。

ここでは、以下に示す地盤の高温履歴と地盤特性について報告する。

- 1) 生石灰杭打設地盤
- 2) 放射性廃棄物周辺地盤
- 3) ごみ埋立地盤
- 4) 温泉地帯地盤

§1 生石灰杭打設地盤

化学的な地盤改良を施工した地盤は、改良材の化学反応による水和熱によって高温状態になることが報告されており、生石灰杭打設地盤は、生石灰の反応熱によって温度上昇を生じ、ある期間高温状態にさらされ高温履歴を受ける。このため、生石灰杭打設地盤内は高温圧密状態になっている。

Pach⁷⁾によれば、生石灰(CaO)と水(H₂O)との反応は、水が液体の状態下では限界温度が320℃であるとされている。しかし、現地計測では生石灰杭中心部で最高300~400℃まで温度上昇を生じ、2日程度で100℃以下に低下した後、周辺地盤の温度とバランスするようになった¹⁾。このため、生石灰杭打設地盤は、土質条件によって若干異なるが、生石灰の発熱により約50~70℃の高温状態となる。したがって、生石灰杭改良地盤は高温圧密状態になり、生石灰の改良効果として考えられている i) 含水比低下、ii) 膨張の効果の他に、室内高温圧密試験で得られている擬似圧密促進効果が作用しているものと考えられる。

これまでの生石灰を用いた地盤改良における生石灰の反応熱については、表層安定処理工法において、粘性土と混合改良処理した際の蒸発乾燥による含水比低下として考慮されていたが、生石灰の場合には、粘性地盤中に打設されるため断熱系の土中に長期間温度が保たれる。

§2 放射性廃棄物周辺地盤

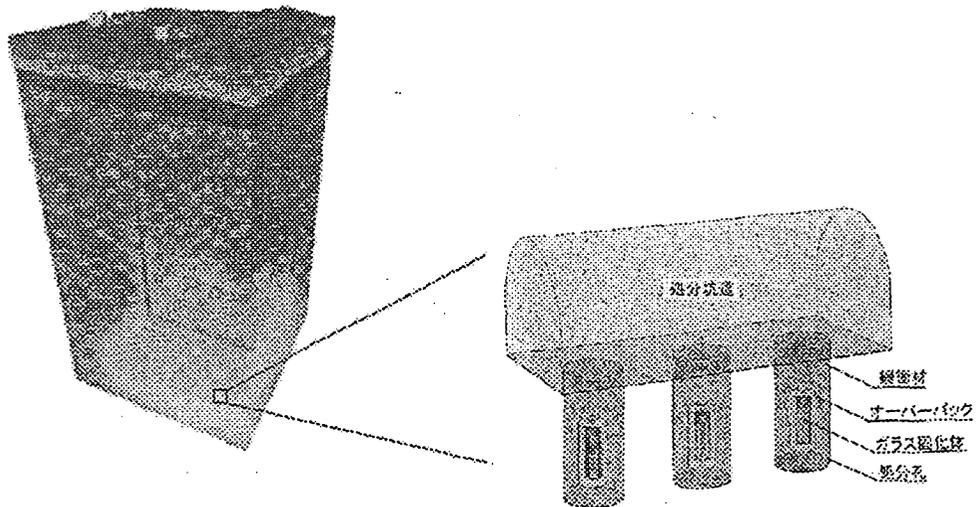


図 2-4-1 放射性廃棄物処分法^{8) 9)}

使用済核燃料から有用なウラン，プルトニウムを回収する過程で生じる高レベル放射性廃液は，固化体に安定処理した後，地下数百メートルより深い地層中に埋設処分（地層処分）する方法が有力である．高レベル放射性廃棄物は，地層処分後も高い放射能を有するため，図 2-4-1 に示されるように廃棄物固化体をオーバーパック，緩衝材（埋戻し材）などの人口バリア，ならびに地層の天然バリアで隔離される．

高レベル放射性廃棄物は地層処分後も高い放射能を放出すると同時に長期間発熱するため周辺の地層の温度が上昇する．その程度は，廃棄物の種類ごとの発熱量，地層内における廃棄物の処理数量と間隔，地層の熱的特性や水理特性などの条件によって決まるが，様々な数値解析（下岡¹⁰⁾，石井ら¹¹⁾，佐藤ら¹²⁾）によれば，廃棄物の近傍で数 10～数 100 年間，100℃前後あるいはそれ以上の温度になると予想されている．このため，天然バリアである地層に対して，オーバーパック，緩衝材などの人口バリア材料の高温環境下での長期安定性が要求される．

廃棄物収納のための立杭，処分トンネル，処分孔などの空間は，固化体パッケージ（オーバーパックを含む）を収納後は緩衝材で充填し閉鎖される．地下水を吸収して膨潤することによって隙間を充填し，放射性廃棄物の流出を防ぐとともに，機械的に廃棄物を保持することが緩衝材の役割である．緩衝材には止水性（低透水性），核種吸着性，自己シール性，膨潤性，熱伝導性が求められ，天然の粘土，砂，破碎した岩石，ベントナイト等が対象とされる．特に，処分孔と固化体パッケージの間の空隙は止水性，核種吸着性の観点から高圧で締固めたベントナイトまたは，ベントナイトと砂の混合物の利用が考えられている．

高温環境下におけるこれらの材料の力学的特性，また岩石・岩盤の比熱，熱伝導率などの熱的特性について実験的研究が行われており，これまでのところ，これらの特性は温度依存性があることが明らかになっている．

§3 ごみ埋立地盤

ごみ埋立地盤は，埋立材料中の有機物の腐食，分解に伴う発熱により，埋立後のある期間高温状態になり，温度履歴を受ける．ごみ埋立地盤の地中温度は，ごみの組成，埋立方法（ごみ層厚，覆土の状況，埋立期間等）などにより異なるものと考えられる．

清水ら¹³⁾により，東京湾ごみ埋立地の地中温度が長期間にわたって実測された．ごみ地盤自体の地中温度は，埋立終了時には60℃前後の高温を呈し，その傾向が5年以上にわたって続き，10年目位から低下し始め，20年程度経てほぼ分解終了末期に達することが示されている．なお，ごみ埋立地の地中温度の最高は69.1℃，自然地盤の恒温層の温度は約16℃と記録されており，ごみ埋立地周辺地盤の地中温度は計測されていない．

§4 温泉地帯地盤

高温環境条件が実務的レベルで地盤の挙動に及ぼす影響の一つとして、地盤が熱によって変質し、地すべりなどの地盤災害を引き起こしたり、建設工事に悪影響を及ぼす現象を挙げる事ができる。地質学的に地殻変動が激しい日本では火山活動が活発であり、活動に伴う熱による変質作用を受けた地盤が広範に分布する。地球内部の熱エネルギーが関与する地盤や岩石の変質作用には、造山活動の過程で地下深部の岩石が高温高压条件下で緻密化する続成変質作用あるいは広域変質作用と、地下深所で温められた水やマグマから分離した溶液が地盤の断層や岩石の割れ目に沿って浅所に上昇し、周辺の地盤や岩石を劣化する熱水変質作用がある。熱水変質作用を受けた変質岩としては、変朽安山岩（プロピライト）が我が国では最も広く分布するが、その中でも特に変質の度合いが激しく局所的に粘土化したものは温泉余土と呼ばれ、建設工事においてはその取扱いが極めて困難である。

温泉余土は九州の別府地域、霧島地域および薩南地域や伊豆地方では比較的広範囲に分布している。温泉余土の化学的性質は、火山ガスに含まれる亜硫酸ガス（ SO_2 ）や硫化水素（ H_2S ）あるいは母岩や熱水に含まれる黄鉄鋼（ FeS_2 ）などの硫化物が酸化して硫酸を生じるので、酸性が強い。このため、温泉余土地帯に建設される鉄筋コンクリート構造物においては、コンクリートは劣化しやすく、また鉄筋は発錆しやすくなる。温泉余土は主要な変質鉱物として、酸性の環境下ではカオリナイトを含み、また弱酸性および中性の環境下ではモンモリロナイトを含む。これらの粘土鉱物を含む結果、温泉余土の力学的性質として、非排水強度が小さく、モンモリロナイトを含む場合はこれに加えて高い膨潤性がある。これらの性質は、温泉地の地すべり発生やトンネル掘削時における膨潤性地圧の発生と密接に結びついている。さらに、練り返し後の強度の経時変化を CBR 試験とコーン指数試験によって調べた結果によると、温泉余土では、関東ロームなどの火山灰質粘性土で見られるようなシキソトロピーによる強度の回復をほとんど期待できないことが報告されている¹⁴⁾。

2.5 高温環境が粘性土へ及ぼす影響

現在までに報告されているように、これまでに経験しなかったような高温環境が実際的な問題として生まれており、また生まれることが予想されている。高温環境が粘性土へ及ぼす影響について解明することは重要かつ緊急の課題である。

ここでは、以下に示す研究成果について報告する。ただし、100℃に近いような高温環境の重要性が認識されたのは比較的最近であり、報告する研究すべてがそのような高温を対象としているわけではない。

- 1) 粘土の構造
- 2) 二次圧密
- 3) セメンテーション
- 4) 化学的性質
- 5) 物理的性質
- 6) 力学的性質

§1 粘土の構造

粘土の構造の基本単位である ped の配列構造の程度を表すものを基本モデルといい、主に3つの構造モデルがある。図 2-5-1 にそれらを紹介する。

ここで、高温再圧密した粘土と通常の室温で再圧密された粘土の微視的構造を、パソコンを用いた画像解析手法によって比較した研究について報告する。室温再圧密試料の水平断面と鉛直断面の写真を写真 1, 2 に、高温再圧密試料の水平断面と鉛直断面の写真を写真 3, 4 に示す。

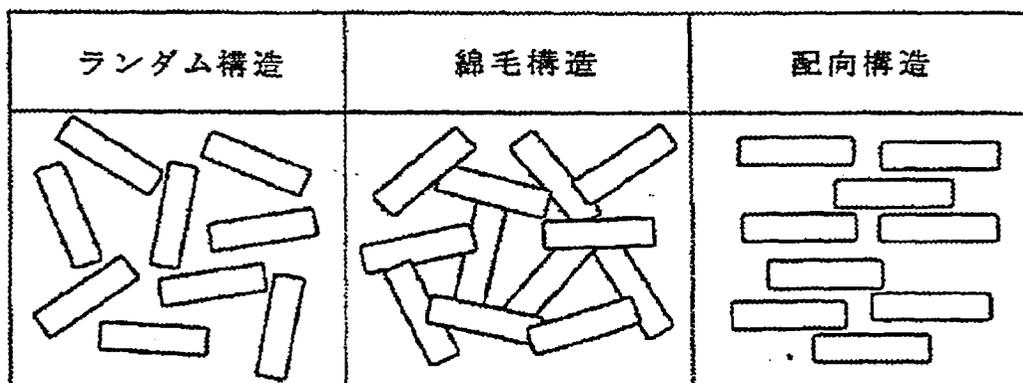


図 2-5-1 基本モデル¹⁵⁾



写真 1 水平断面



写真 2 鉛直断面

(a) 室温再圧密試料

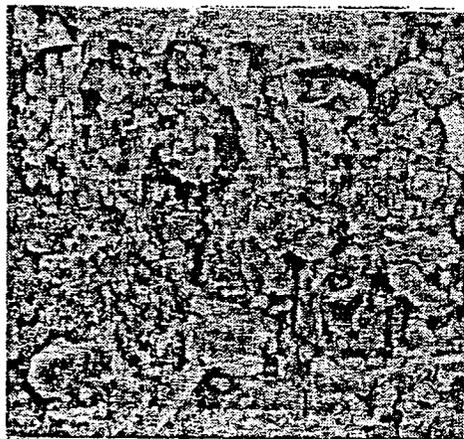


写真 3 水平断面

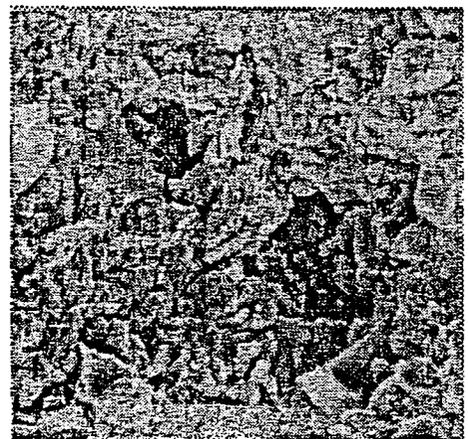


写真 4 鉛直断面

(b) 高温再圧密試料

写真 1, 2 より室温再圧密試料は水平方向に配向性を持った粒子構造であり、写真 3, 4 より高温再圧密試料は若干配向性を持つもののランダム構造に近い構造であるといえる。

さらに、それぞれの断面において直行する方向の濃度分布を測定し、その波形をパワースペクトル分析した結果、室温再圧密試料は配向構造、高温再圧密試料はランダム構造に近い構造になっていることが明らかとなった。

一般に、自然粘土はランダム構造か綿毛構造に近いが、その粘土や練り返し再圧密した粘土をさらに圧密すると配向構造になると言われている。つまり高温再圧密方法は、これまでに報告されているような巨視的な挙動だけでなく、微視的にも自然粘土に近い構造を再現しているといえる⁵⁾。

§2 二次圧密

粘土の力学的性質は温度に影響されることが報告されており、二次圧密においても温度の影響が報告されている。ここで、温度が二次圧密時に及ぼす影響について紹介する¹⁶⁾。

図 2-5-2 は、二次圧密時に温度効果を受けた粘土の等方圧密時の間隙比と時間の関係を表しており、温度の上昇とともに粘土の圧密が促進され間隙比が急激に減少している。つまり、二次圧密時に高温にすることで短時間に二次圧密を促進することが可能とされている。また、再び室温にすることにより、見かけ上過圧密土の挙動を示すことが明らかとなっている。

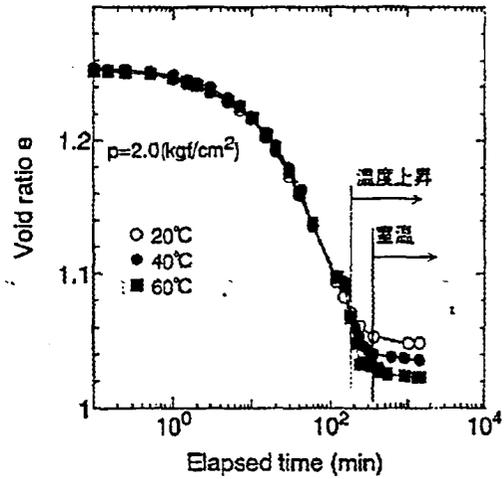


図 2-5-2 時間 - 間隙比¹⁶⁾

§3 セメンテーション

一般に堆積土のセメンテーションは、続成過程に起こる化学的セメント作用といえ、その過程にはセメント物質の種類や地盤に対する時間効果、温度効果、および圧密効果が複合的に関係していると考えられる。また、粘土スラリーを高温環境下で圧密することによって自然堆積粘土の乱さない試料の力学的特性が再現できる可能性が示されて以来、高温環境と土のセメンテーションの関係が重要であると認識されるようになった。

海底において高温環境となる場所が存在する。海嶺（リッジ）付近では、地殻からの熱の流れが大きく、堆積土内の温度は一般に高い。このような海域では多くの場合、生物遺骸の炭酸塩が堆積しており陸源の土粒子はほとんど堆積していない。一方、海嶺から少し離れた所では地温は下がり、これら2海域の堆積物の特性に違いが見られる。Wetzel¹⁷⁾によって次のことが明らかにされた。

- ① 間隙率 : 同じ深さで比べると、高温の方が間隙比は低い
- ② チョークになる深さ : 高温の方が浅い
- ③ 石灰岩になる深さ : 高温の方が浅い

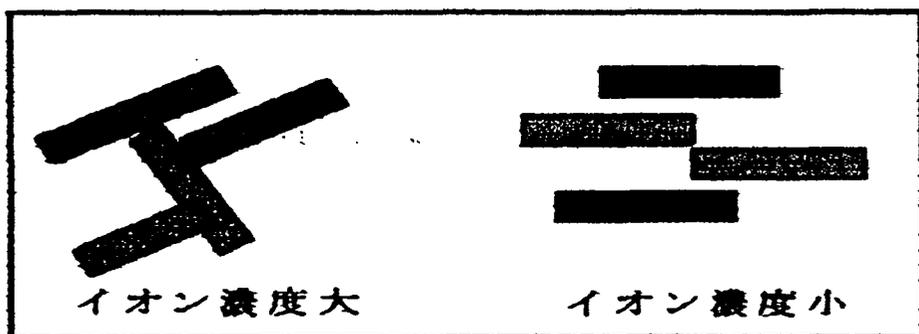
以上のことは、温度が高いほど結果的に圧密は速く進んでおり、また変成作用が速いことを示している。つまり、高温環境下に置くことで土のセメンテーション作用が促進されたと考えられる。

§4 化学的性質

粘土鉱物学の分野では、試料に温度変化を与えて、加熱による脱水や構造の変化などの熱的性質を利用する熱質量測定や示差熱分析などの熱解析手法が広く用いられている。しかし、高温環境が粘土の土・水系などの化学的性質（イオン交換や分散・凝集など）に及ぼす影響についての研究例は少なく、未だ明らかとなっていないので、今後さらに検討していく必要がある。

ここで、小泉ら¹⁸⁾によって行われた研究について報告する。スラリー粘土試料を高温（75℃）で再圧密した粘土と室温で再圧密した粘土の土質工学的な性質の違いについて、鉱物組成や化学分析を通して明らかにするため、高温と室温の再圧密試料に対して、陽イオン交換量（CEC）や試料中の間隙水の水質分析が行われた。その結果、高温試料の方が粘土中の間隙水や試料から排出される間隙水のイオン濃度が室温試料よりも高いことが示された。

一般的に粘土中のイオン濃度が高いと、土粒子表面に吸着されるイオン（カオチン）が多くなり、図 2-5-3 に示すように凝集力が強くなり、図 2-5-4 のようなカードハウスといわれる強い骨格を持った凝集体（骨格構造）になると考えられている。



(a)イオン濃度大

(b)イオン濃度小

図 2-5-3 粘土粒子の凝集の模式図

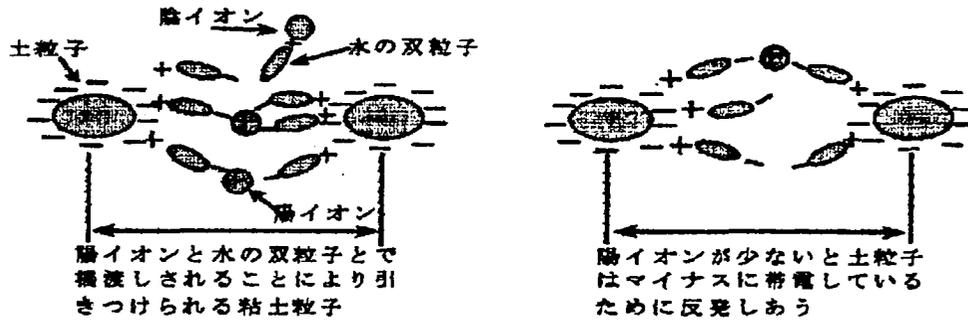


図 2-5-4 粘土の骨格構造の模式図

§5 物理的性質

高温環境が土の物理的性質に及ぼす影響を考える場合、その扱い方には次の2つがある。

- ① 試験時の温度が直接結果に影響を及ぼすもの
- ② 高温履歴を受けた試料が物理的性質に影響を及ぼすもの

ここでは、試験時の温度が直接影響するコンシステンシー限界の例について報告する。

液性限界・塑性限界試験は、通常室温で行うことになっている。この試験を試験時の温度を変えて行った例がある¹⁹⁾。

液性限界は、温度が上昇すると減少する試料が多いが、試料によっては温度にほとんど関係しないものもある。一般には、温度が上昇すると水の粘性が低下するため液性限界は低下すると考えられる。しかし、活性の小さい試料ほどその傾向は認められない。塑性限界は、測定値の範囲が狭く、データのばらつきのために液性限界ほどの傾向は認められない。一方、塑性指数の変化は液性限界とほぼ同様な傾向にある。

§6 力学的性質

力学的性質として体積変化特性（圧縮・圧密挙動）とせん断特性を取り上げ、以下に示す研究例について報告する。

- ① 高温再圧密試料の特性
- ② 高温圧密試験
- ③ 高温三軸圧縮試験

① 高温再圧密試料の特性²⁰⁾

スラリーから高温で再圧密した粘土試料と室温再圧密試料、および不攪乱試料の $e - \log p$ 曲線を図 2-5-5 に示す。高温試料は室温試料より初期間隙比が大きく、圧密降伏応力が高い。特に、圧密降伏応力より大きな圧密圧力が加わると圧縮量が激増しており、自然粘土の圧縮挙動をよく再現しているといえる。

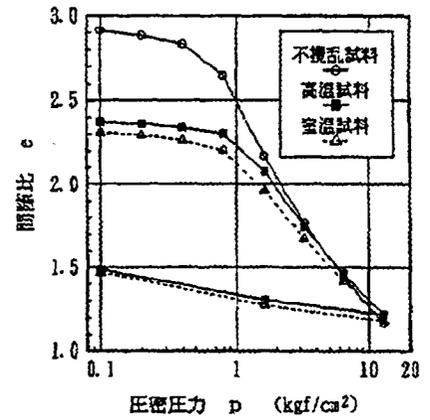
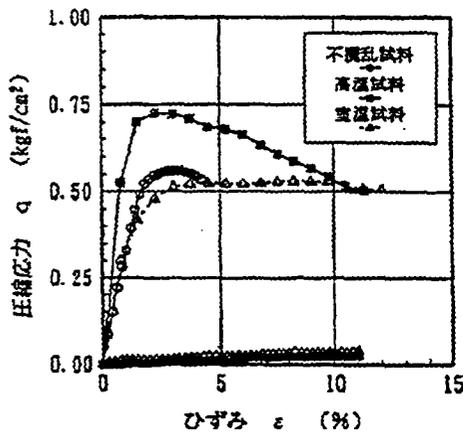


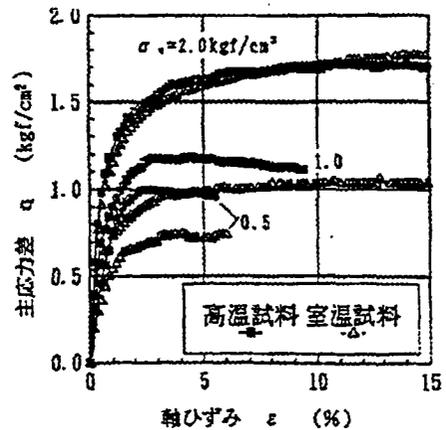
図 2-5-5 $e - \log p$ 曲線²⁰⁾

一軸圧縮試験および三軸圧縮試験より得られた応力-ひずみ曲線を図 2-5-6 に示す。室温試料の応力-ひずみ曲線はひずみ硬化型で圧縮強度も小さいが、高温試料の応力-ひずみ曲線はひずみ軟化型となり圧縮強度も大きい。

これらのことより、高温試料は自然粘土の力学的特性をよく再現しているといえる。



(a) 一軸圧縮試験



(b) 三軸圧縮試験

図 2-5-6 応力-ひずみ曲線²⁰⁾

② 高温圧密試験 ²¹⁾

高温圧密試験において、次に示す結果が得られている。

- ・ 正規圧密状態で温度を上げると圧縮する。
- ・ 高温履歴を与えることで、自然堆積粘土に特徴的な Pc 効果が現われる。
- ・ 二次圧密時に高温にすると、圧密が促進され、体積が収縮する。

ここで、温度と間隙比の関係については図 2-5-7 に示しており、温度差 ΔT と温度変化に伴う間隙比の変化量は比例関係にあることが分かる。

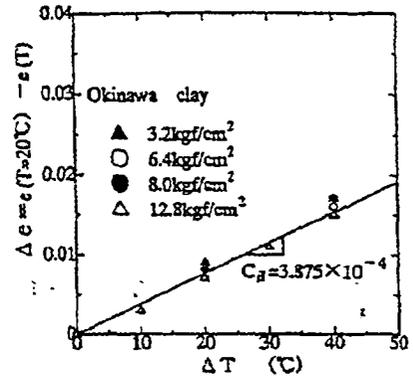


図 2-5-7 温度と間隙比の関係 ²¹⁾

③ 高温三軸圧縮試験 ²²⁾

正規圧密粘土を用いた高温三軸圧縮試験の結果を以下に示す。

- ・ 加熱により体積収縮を起こし、間隙比は減少する。
- ・ 図 2-5-8 に示すように、加熱により粘土のせん断強度が増加する。
- ・ 加熱により間隙水圧が発生しにくくなっている。

これは、図 2-5-9 に示されているように、加熱試料の有効応力経路が室温試料の有効応力経路の右にきていることから判断できる。

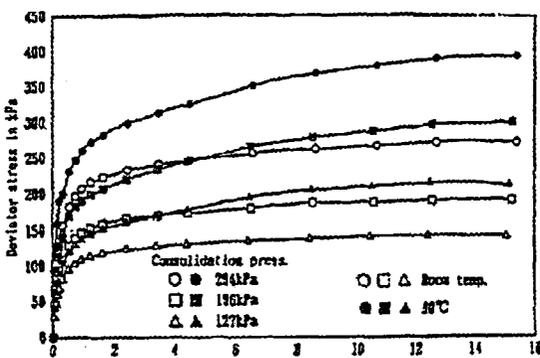


図 2-5-8 軸ひずみ-軸差応力曲線 ²²⁾

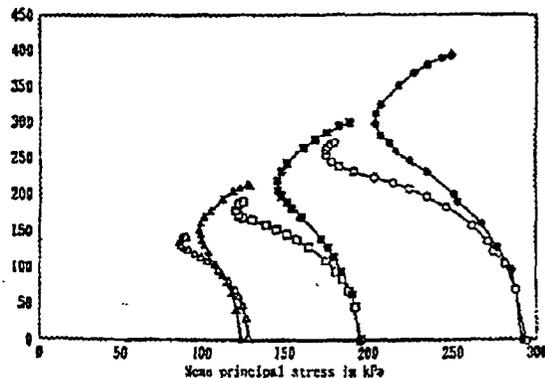


図 2-5-9 有効応力経路 ²²⁾

第3章 試験に用いた試料の物理化学的性質

3.1 試験に用いた試料

試験には、入手しやすい市販のカオリン、ベントナイト（（株）片山化学工業）を使用した。両粘土とも、細粒分からなる粒度の整ったものである。

試料の性質は以下に示すとおりである。

表 3-1-1 化学組成（%）

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	Fe ₂ O ₃	Loss
カオリン	67.85	27.5			0.23	3.62
ベントナイト	74	11	4.0% 以下	3.0% 以下	4.0% 以下	8.0

表 3-1-2 物理特性（蒸留水による）

	液性限界	塑性限界	塑性指数	比重
カオリン	50.5	34.1	16.4	2.724
ベントナイト	53.7	409.2	355.5	2.576

3.2 カオリン、ベントナイトの基本的性質²³⁾

カオリンは、天然に産出する含水珪酸アルミニウム（Al₂O₃・2SiO₂・2H₂O）で、白色または類白色の粉末で、通常の粘土に比べ色が白く可塑性がある。また化学的に安定しており、膨張、収縮することはほとんどない。カオリン鉱物は地表付近の酸性環境で生成しやすく、カオリン鉱物からなるカオリン粘土は世界各地に分布している。カオリン粘土はもっとも広く利用される原料粘土として製紙、陶磁器、化粧品などに用いられる。

ベントナイトの主要鉱石はモンモリロナイトで、化学組成は一定ではなく石英、長石、雲母、黄鉄鉱などが混在する。また超微粒の粘土で、イオン交換性、膨潤性、複合体形成能などの化学的活性が顕著である。ベントナイトは膨潤性、粘性、陽イオン交換性、吸着性などを利用し、ボーリング泥水、土壌改良、漏水防止な

どに用いられる。

カオリナイト、ベントナイトともに層状珪酸塩（珪酸アルミニウム、珪酸マグネシウム）の繰り返し多層構造体からなり、低溶解性物質である。カオリナイトは 2:1 層（3 層）構造であり、特にアルカリベントナイトは異常に水を吸収膨張してゼリー状になる。

3.3 試料の作成

3.3.1 配合

配合は、重量比でカオリン：ベントナイト=1:0, 3:1 の 2 種類で行い、塩分濃度は 0.1N で作成した。

以下、カオリン：ベントナイト=1:0 のものをカオリン粘土、カオリン：ベントナイト=3:1 のものを混合粘土と呼ぶ。

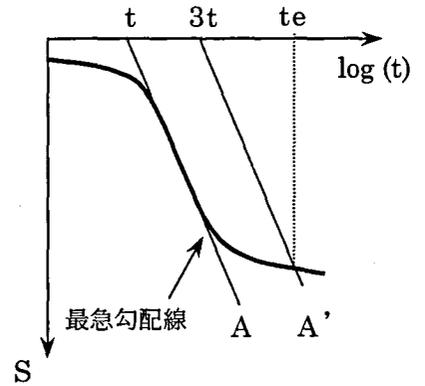
3.3.2 試料作成

カオリン、ベントナイトが所定の配合になるように混合した後、初期含水比を、カオリン粘土は液性限界の 1.8 倍、混合粘土は 2.0 倍になるように塩化カルシウム溶液（蒸留水に塩化カルシウムを加え所定の濃度にしたもの）を混合した。その試料を真空脱泡装置付ミキサーで試料が均一になるまで 6 時間攪拌しながら脱気した。脱気の後、予圧密装置のモールドに流し込み 24 時間自重圧密を行う。自重圧密の後、ペロフラムシリンダーを用いて各段階での圧密時間を 24 時間とし、1.96→7.84→29.4→49.0→98.0→196.0 kPa の鉛直圧密応力で段階的に載荷した。196.0 kPa まで上げた最終段階において、3 t 法*によって一次圧密終了時間を決定し圧密を終了させる。

圧密が終了した試料をモールドから取り出し 4 等分する。その後、含水比の変化を防ぐためこの試料をポリエチレンフィルムで包み、最後にパラフィンでコーティングして約 20℃ の恒温室内で保管する。

3 t 法*

圧密の最終段階鉛直応力 196.0 kPa において沈下量を測定し、 $\log(t)-(s)$ 曲線を描く。右図に示すように曲線の最急勾配線 A と時間軸との交点 t の 3 倍の点 $3t$ を通り、最急勾配線 A に平行な直線 A' を描く。A' と圧密曲線との交点での時間 t_e を一次圧密終了時間として決定する方法。



3.3.2 試料作成装置

図 3-3-1、表 3-3-2 に予圧密容器の概要を示す。

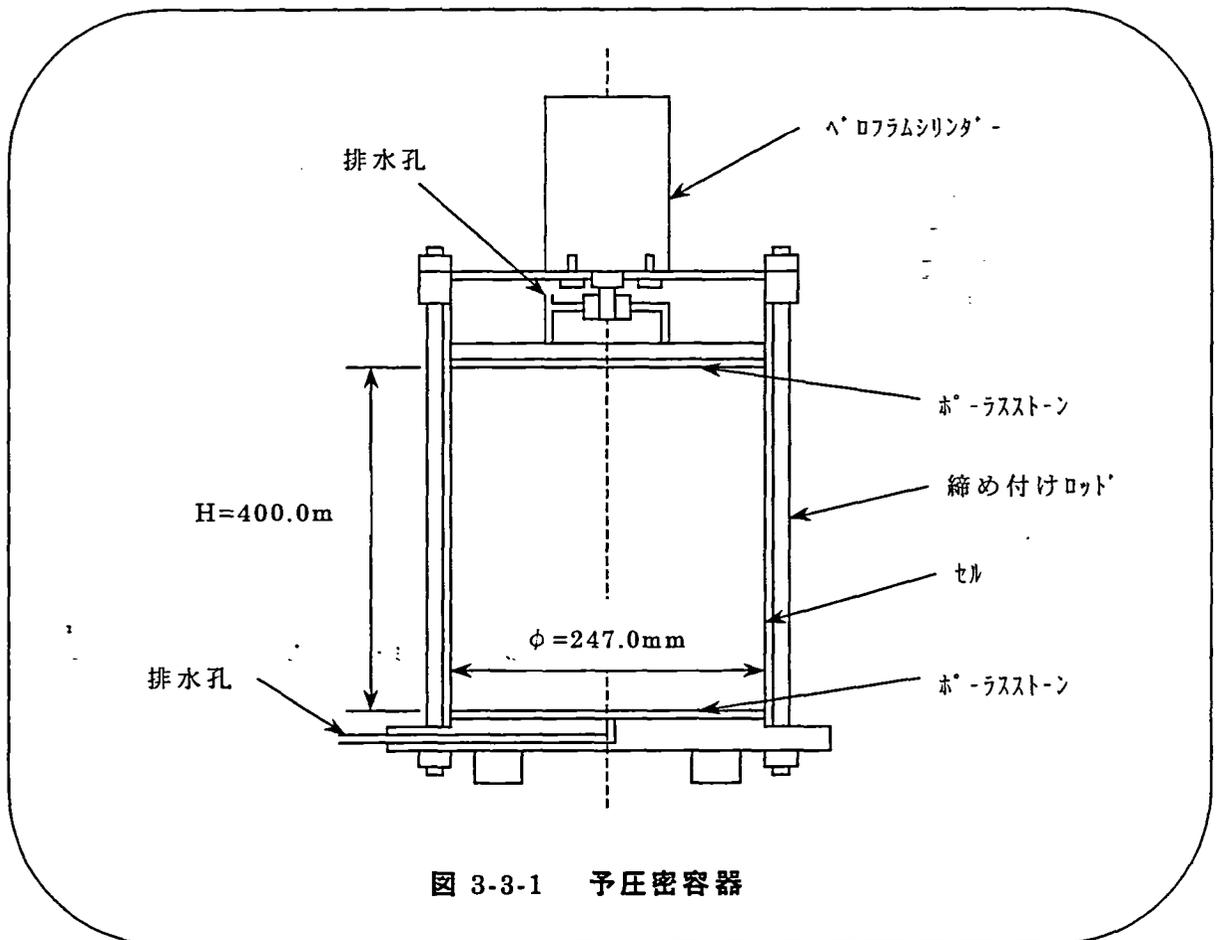


表 3-3-2 予圧密装置

攪拌器	ミキサー (株) 愛工社製作所
モールド	円筒型モールド 直径 247mm, 高さ 400mm, 厚さ 10mm
軸圧载荷装置	ペロフラムシリンダー MARUI 容量 : 10kgf/cm ² ストローク : 200 mm

3.4 配合試料の物理的, 力学的性質

配合試料のコンシステンシー限界を表 3-4-1, 圧密特性を表 3-4-2 に示す。

表 3-4-1 コンシステンシー限界

	液性限界	塑性限界	塑性指数
カオリン粘土	50.5	34.1	16.4
混合粘土	84.6	27.2	57.4

表 3-4-2 圧密特性

	圧密降伏応力 P _c	圧縮指数 C _c
カオリン粘土	149	0.317
混合粘土	115	0.456

第 4 章 試験方法及び試験装置

4.1 概要

本研究では、高温環境に置かれた粘性土の工学的性質がどのように変化するかを明らかにすることを目的として高温三軸圧縮試験を行う。ここで使用する高温対応型三軸セルは高背圧を負荷するとともに供試体内の水の蒸発を抑え、密閉状態にすることによって、50～200℃の非常に高い温度条件下で三軸試験が行えるものである。

三軸試験で調査される試験項目は（1）強度・変形特性および、（2）圧縮・圧密特性で、試験温度、試料を変えることで、これらが粘性土の工学的性質の温度依存性にどのような影響を及ぼすかを明らかにする。

4.2 試験方法

4.2.1 供試体の作成及びセット

供試体をトリマー上に設置、ワイヤーソーおよび直ナイフで直径 50.0mm、高さ 100.0mm の円柱状に成形する。成形した供試体の重さ m_0 、平均直径、平均高さを測定し、成形の際に切り取った粘土片の中から 3 つの試料片を取り出し、含水比を測定し 3 つの平均を供試体の初期含水比とする。

供試体の三軸セル台へのセットには、排水経路および間隙水圧測定用の経路に気泡が残らないようにあらかじめ各経路を脱気水で満たしておき、ゴムメンブレンで覆った供試体を設置する。この際、供試体とポーラスメタルとの間にポーラスメタルの目詰まりを防ぐためにろ紙を置く。このとき、ろ紙は気泡が混入しないよう水に浸したものをを用いる。（図 4-2-1 および写真 4-2-1 に供試体のセット状況を示す）

その後、設置した供試体を O リングで締め付け、三軸セル内の水およびごみなどを取り除き三軸セルを組み立て、セル内をシリコンオイルで完全に満たす。この際セル内に空気が残ると、加熱したときに膨張し大変危険であるため、空気圧を作用させゆっくりと満たす。また、セル内を従来の三軸試験で用いられている水ではなくシリコンオイルで満たすのは、本実験の特徴の一つであり、100℃を超える条件で試験を行うためと、温度上昇時のセル室内の膨張を抑えるためであ

る。これにより、安全かつ安定した実験を行うことができる。ダイヤルゲージを設置し、排水経路をビューレットにつなぐ。その後ビューレットに背圧^{*}、三軸セルにはセル圧をセル圧と背圧の差を10kPaに保ちながら、セル圧 60→110→210→310→410→510 kPa, 背圧 50→100→200→300→400→500 kPa まで段階的に作用させる。このとき三軸セル内に10 kPaの等方圧を作用させ、ビューレットに通じる排水コックを数分間開き供試体周囲の余分な水を排水させる。

高温履歴を与える場合は、最終段階のセル圧 510 kPa, 背圧 500 kPa を終了するまでに所定の温度になるよう加熱する。

なお本実験では、セル圧を 410kPa までは空気圧で与え、510kPa 以上の場合は D.D モーターを用いたピストン型セル圧発生装置で与えた。セル圧の微小な調整はセル圧計で計測しながらパーソナルコンピューターを用いて自動制御した。

また、試験装置について写真 4-2-2 に示す。

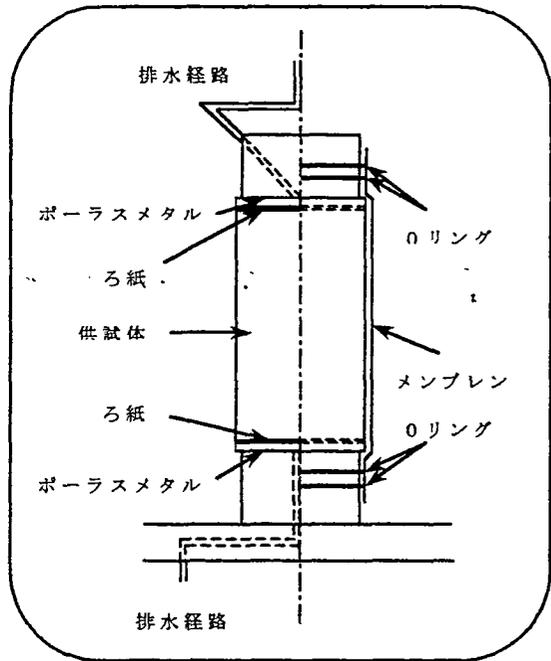


図 4-2-1 供試体セット状況

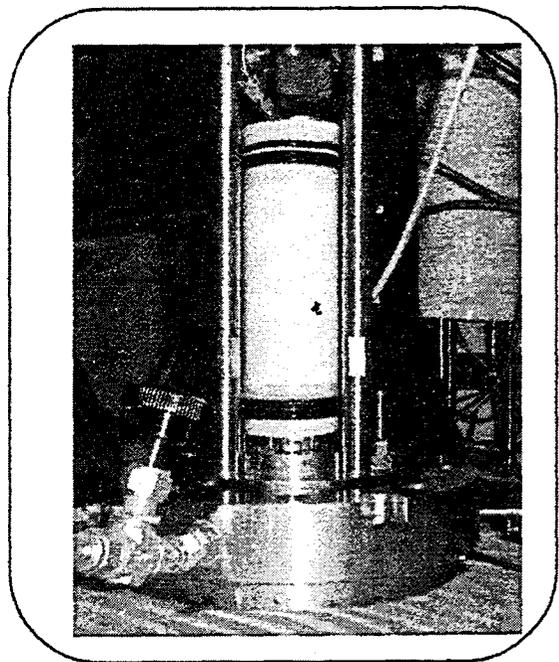


写真 4-2-1 供試体セット状況

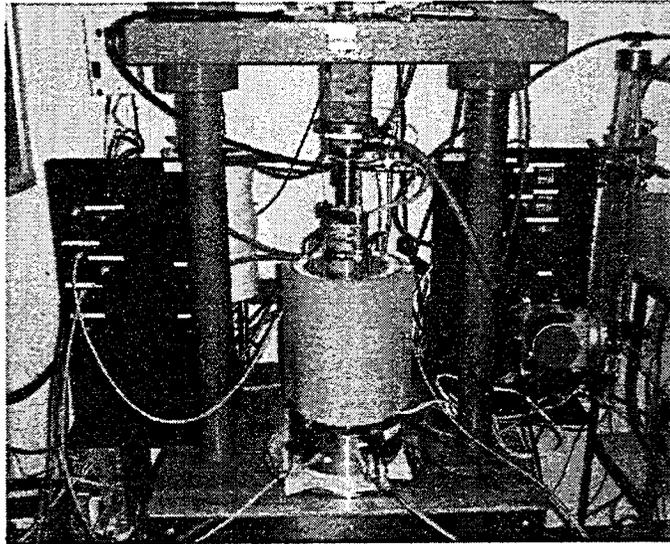


写真 4-2-2 試験装置

背圧*

背圧は間隙水中の気体を間隙水中に溶かし込み、供試体を十分に飽和させ、供試体内の飽和度を高めることと、高い温度条件において供試体内の水の蒸発を防ぐために与えられるものである。

また、段階を経て圧力を上昇させるのはセル圧、背圧を急激に作用させると供試体の有効応力が変動する恐れがあるためである。

図 4-2-3 に温度と蒸気圧の関係を示す。

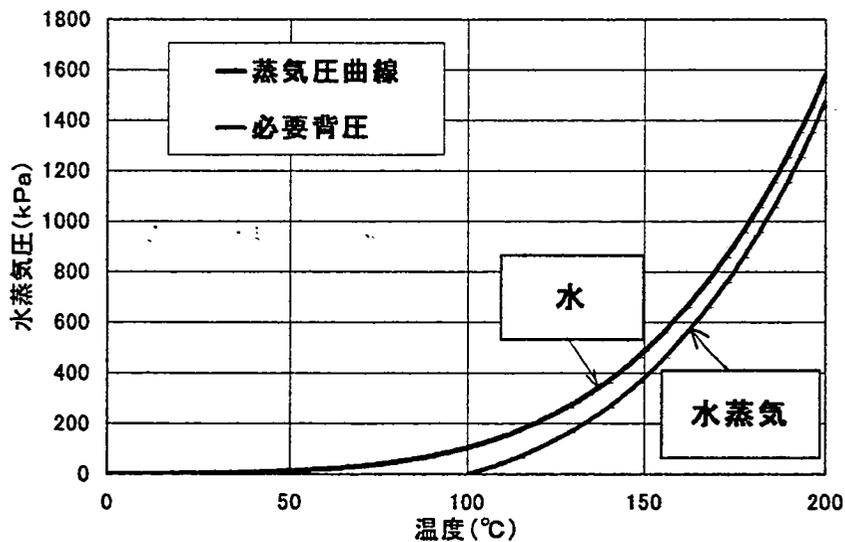


図 4-2-3 温度 - 蒸気圧関係

4.2.2 圧密

等方圧を作用させ余分な水を排出し、温度を室温、50℃、75℃、100℃まで上昇させた後、等方圧密を行う。背圧は500 kPaの一定に保ち、セル圧を600→750→1000 kPa、圧密圧力を100→250→500 kPaと段階的に作用させる。なおこのとき、各段階での圧密終了時間を、排水量を用いて3 t法によって決定し、圧密が終了したことを確認した後に次の段階に移るものとする。また、ピストンの断面積分の軸方向圧力は、ロードセルで軸圧を計測しながら圧縮機をパーソナルコンピュータを用いて自動制御して作用させた。この際、軸方向圧力を目標とする値まで急速に増加させると、供試体内部の間隙水圧が十分に消散せずに蓄積し、異常な変形を生じることがある。よって、過剰間隙水圧がほとんど発生しないように、軸方向に緩速で漸増载荷を行った。供試体の体積変化は、ビューレットへの排水量から求める。排水量は図4-2-4に示すように二重管ビューレットと基準ビューレットとの圧力差を差圧計を用いてより正確に測定した。ここで、排水条件は温度履歴が室温、50℃、75℃においては両面排水とし、100℃においては片面排水とした。これは、セル内オイルの温度上昇に伴いセル内上部の温度が上昇し、上部排水経路で水が膨張、蒸発したためである。

高温三軸圧縮試験装置のシステム概要を図4-2-4、表4-2-5に示す。

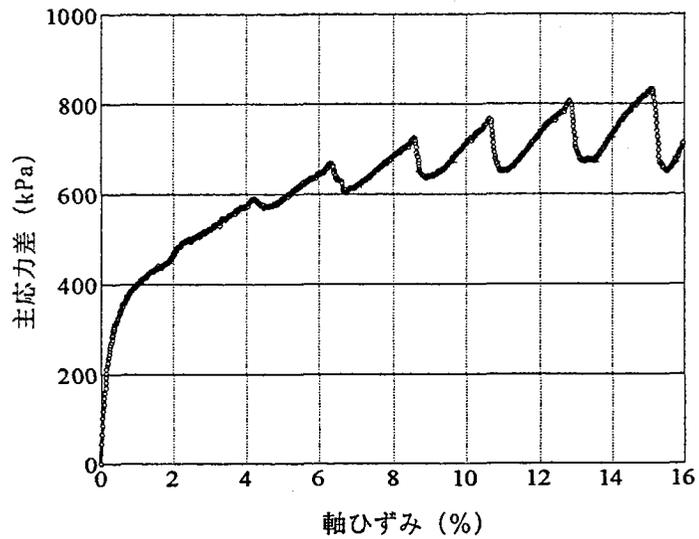
4.2.3 \overline{CU} (圧密非排水三軸圧縮) 試験

等方圧密により500 kPaの鉛直圧密圧力で圧密した後、供試体を非排水状態にして圧縮試験を行う。圧縮過程においてセル圧は500 kPa一定に保ち、軸ひずみ速度0.054%/minで供試体を軸圧縮する。軸変位量、軸圧縮力および間隙水圧を測定し、軸ひずみが15%以上になるまで圧縮を行う。この試験を各試料、各温度において同じ条件の下で行う。

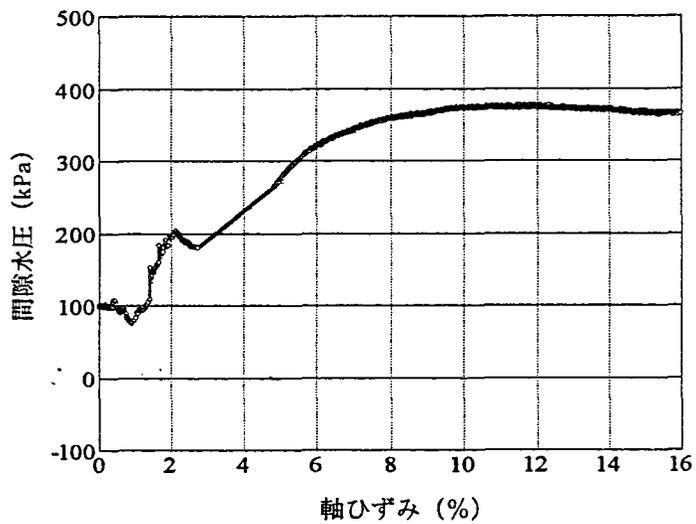
ここで、温度上昇に伴い水とオイルが膨張したときの、主応力差、間隙水圧を図4-2-6に示す。(a)より、温度上昇に伴いセル内のオイルが膨張し、膨張圧分だけ過剰に側圧が負荷され、主応力差に波が表れた。また(b)では、上部排水経路内で水が膨張、蒸発したため間隙水圧が正確に測れなかった。

対応策として、セル内オイルの温度が所定の温度に上昇するまで、ヒーターの

温度を比較的低い速度でゆっくりと上昇させた。さらに、試験温度が 100℃ の場合には、セル内オイルの温度をゆっくり上昇させても供試体上部の排水経路内で水が膨張、蒸発したため上部排水経路を閉じて試験を行った。



(a) 応力-ひずみ曲線



(b) 間隙水圧-ひずみ曲線

図 4-2-6 カオリン 100℃における失敗例

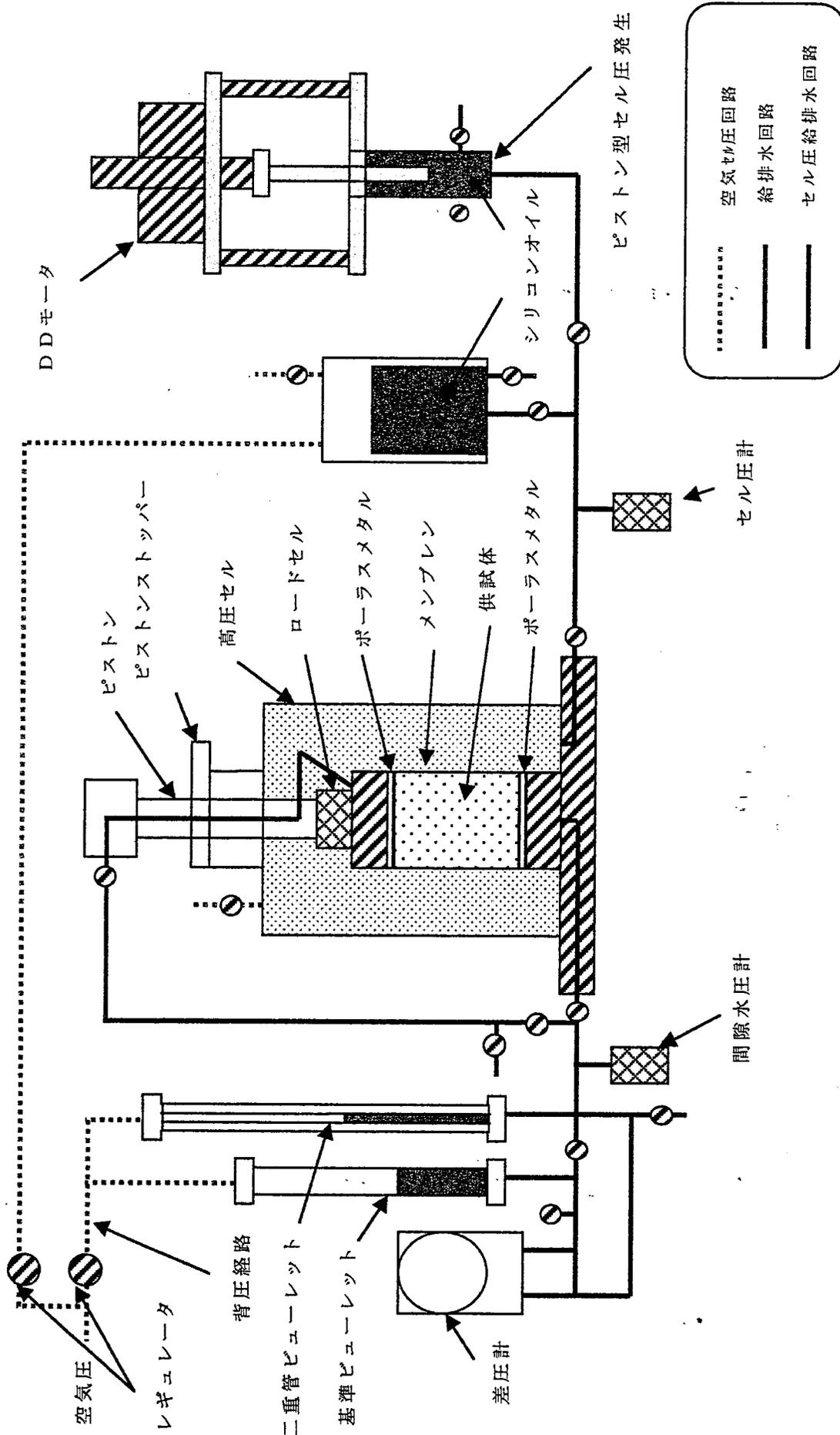


図 4-2-4 高温三軸圧縮試験装置

表 4-2-5 高温三軸圧密試験システム装置

	圧密時	せん断時
軸圧測定装置	荷重計 容量 : 100kgf タイプ : LC-100KF 株式会社共和電業	荷重計 容量 : 500kgf タイプ : CLP-500R TML Tokyo Japan
間隙水圧測定装置		間隙水圧計 タイプ : TDC-20-DSH 東洋測器 (株)
体積変化量測定装置	差圧計 容量 : 6.0kPa タイプ : FHKA12V- AAAYY-AA 富士電気株式会社	
側圧測定装置	セル圧計 タイプ : TDC-50-DSH 東洋測器 (株)	
軸変位量測定装置	ダイヤルゲージ 最小目盛り 0.01mm ストローク : 30mm	
軸圧載荷装置	The JACK ストローク : 100mm タイプ : J3CLUK 日本 GEAR CO. LTD	
側圧負荷装置	ES 型ドライブユニットシステム メガトルクモータ タイプ : ES3040C23-02 タイプ : YS3040FN501 日本精工株式会社	
温度制御装置	シリコンラバーヒーター タイプ : OT-3 オーエムヒーター株式会社	
自動計測装置	TDS-302 東京測量研究所	ビュースキャナ DC5200 NEC 三栄株式会社
計算及び制御装置	PC-9801DS NEC	PC-9821xe10 NEC

5.1 概要

本章では，各試験の結果をまとめ，変形特性および強度特性について検討を行う。測定した軸方向変位，排水量，軸圧，側圧および間隙水圧より以下の計算式を用いて，供試体の応力とひずみを求める。

$$\varepsilon_a = \frac{\Delta H}{H_c} \times 100$$

$$q = \sigma_a - \sigma_r = \frac{P}{A_c} \left(1 - \frac{\varepsilon_a}{100}\right) \times 10$$

$$\sigma_a' = \sigma_a - u$$

$$\sigma_r' = \sigma_r - u$$

$$p' = \frac{1}{3}(\sigma_a' + 2\sigma_r')$$

$$q' = \sigma_a' - \sigma_r'$$

ここで

ε_a : 軸ひずみ (%)

ΔH : 軸方向変位 (cm)

H_c : 圧密後の供試体高さ (cm)

q : 主応力差 (kPa)

p : 軸ひずみ ε_a (%) のときに供試体に加えられた軸圧縮力 (N)

A_c : 圧密後の供試体高さ

σ_a : 軸圧

σ_r : 側圧

u : 過剰間隙水圧

p' : 平均有効応力

5.2 高温三軸圧縮試験

圧密圧力が 500kPa になるまで等方圧密し、一次圧密が終了した後、セル圧を一次圧密終了時の値のまま一定に保ち、供試体を非排水状態にして圧縮試験を行った。圧縮速度は 0.054%/min で、圧縮期間中 25 秒ごとに軸変位、軸圧縮力および間隙水圧を測定する。同じ条件のもとでカオリン粘土、混合粘土それぞれに室温、50℃、75℃、100℃の温度履歴を与えて試験を行った。ここで、室温は若干の変化はあるものの 20℃とした。

この試験によって得られた結果から、以下のことについて考察を行う。

- 1) 主応力差－軸ひずみ関係
- 2) 間隙水圧－軸ひずみ関係
- 3) 有効応力経路関係
- 4) 温度と限界状態線の傾き (M) の関係
- 5) 間隙比
- 6) 温度効果

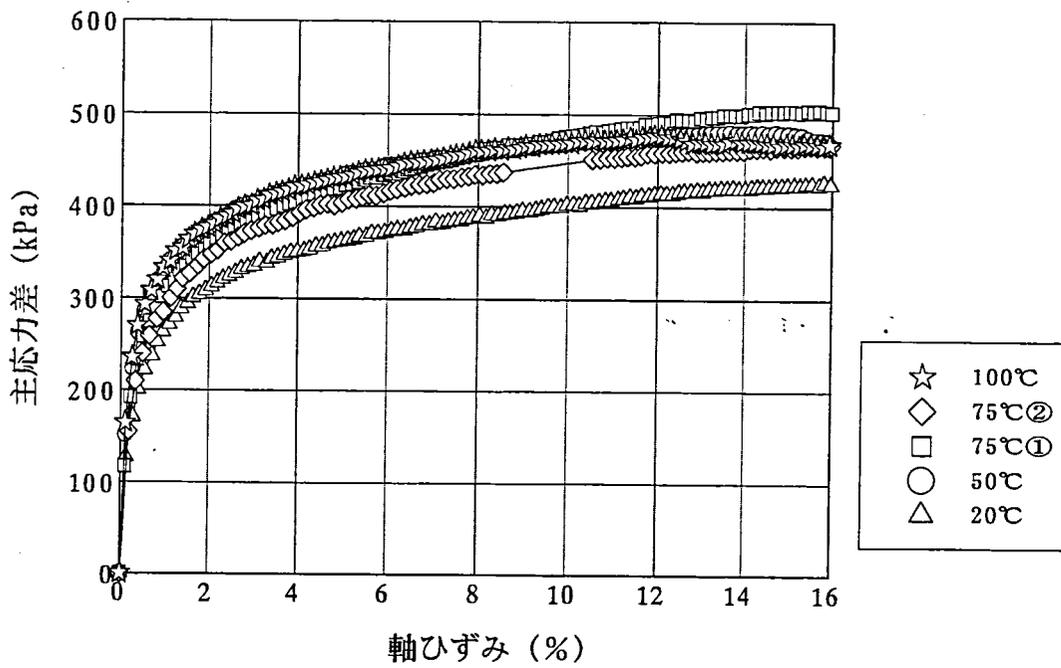
本試験より得られた圧縮強度、圧密後の間隙比を表 5-2-1、表 5-2-2 に、またその他の試験結果を図 5-2-3～図 5-2-13 に示す。

表 5-2-1 圧縮強度 (kPa)

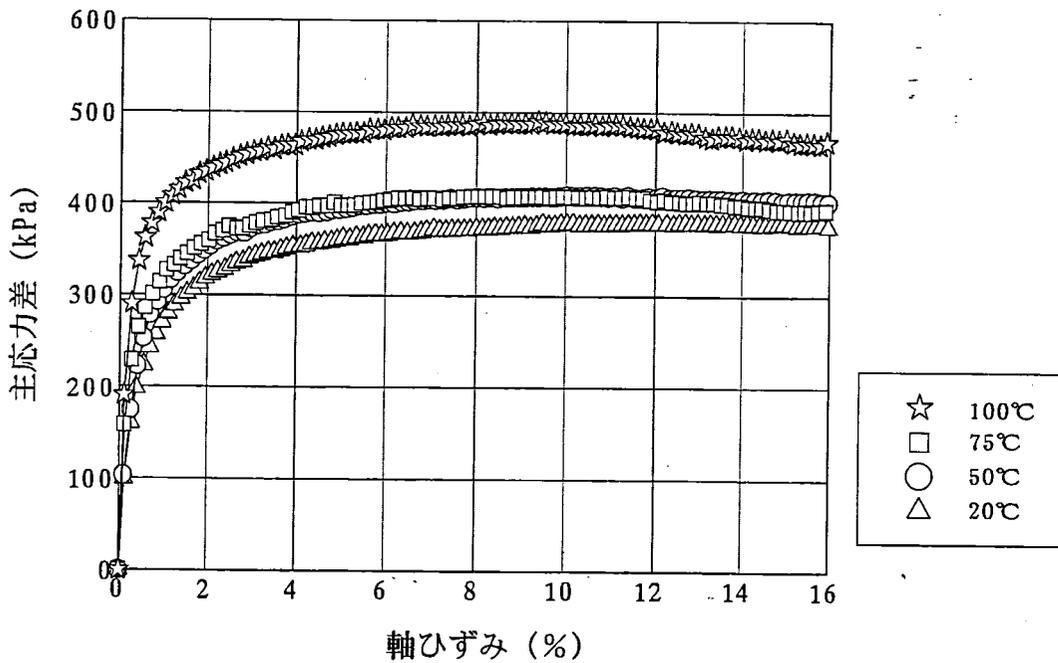
	室温	50℃	75℃①	75℃②	100℃
カオリン粘土	428.2	481.2	505.6	467.6	477.6
混合粘土	379.6	409.3	409.6		489.9

表 5-2-2 圧密後の間隙比

	室温	50℃	75℃①	75℃②	100℃
カオリン粘土	0.856	0.898	0.773	0.787	0.732
混合粘土	0.806	0.820	0.716		0.713



(a) カオリン粘土



(b) 混合粘土

図5 - 2 - 3 $q - \epsilon a$ 関係

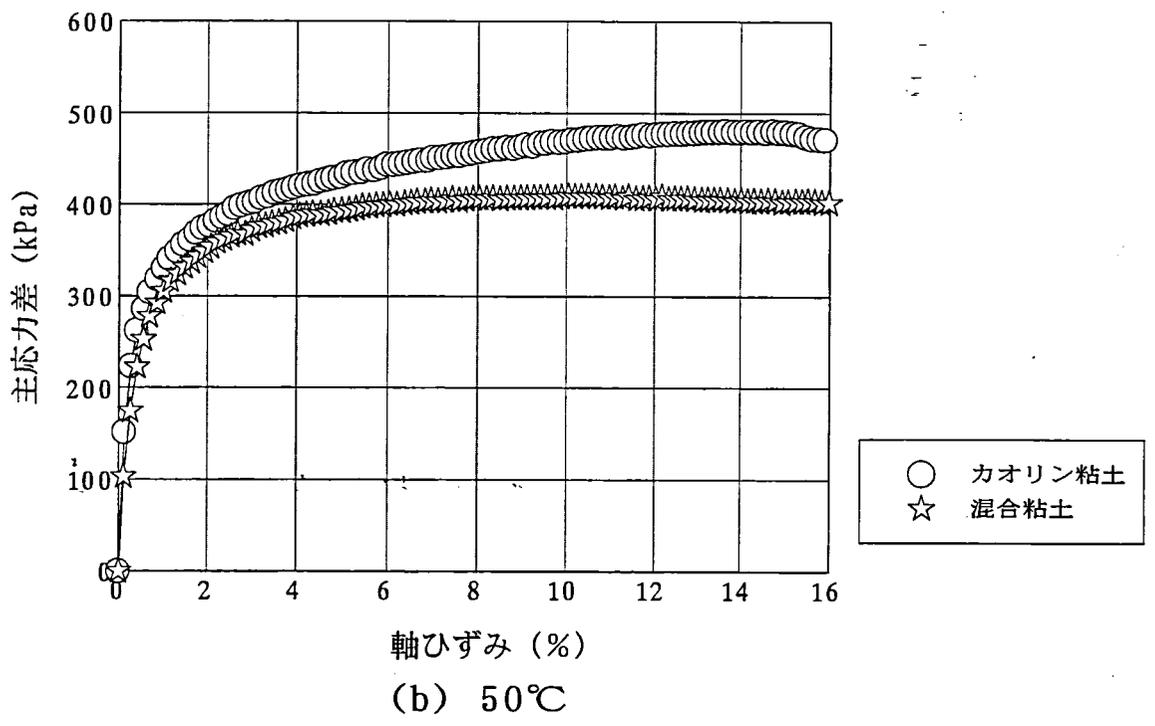
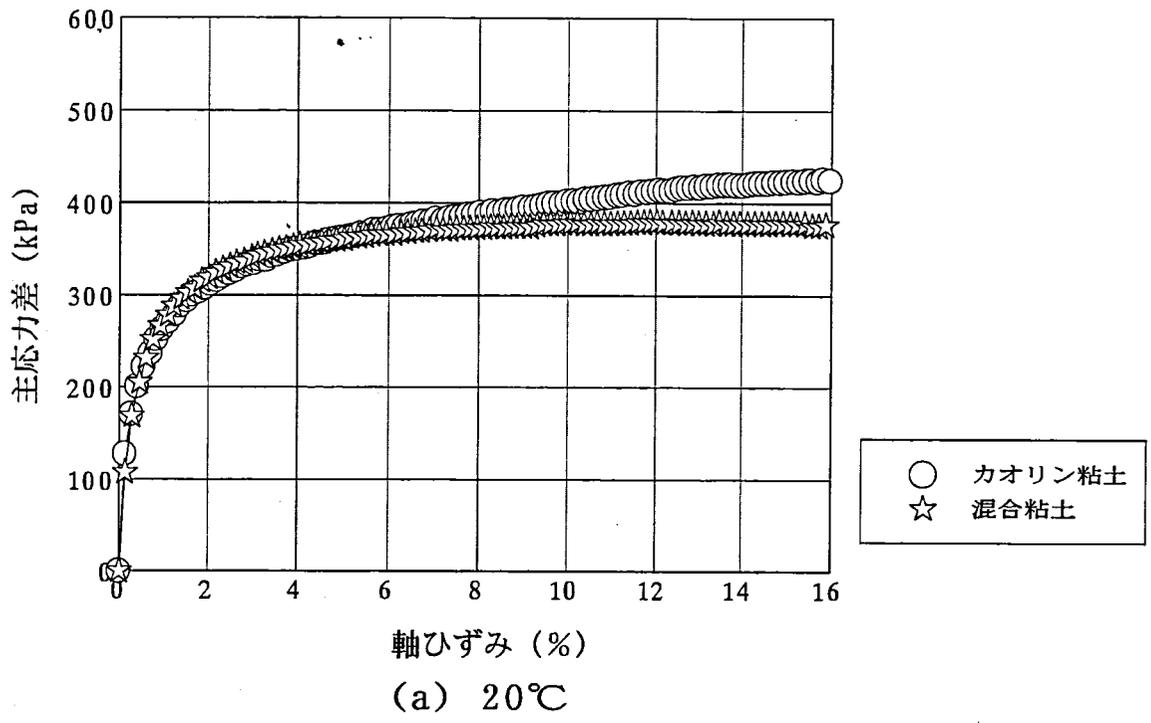


図5 - 2 - 4 q - ε a 関係

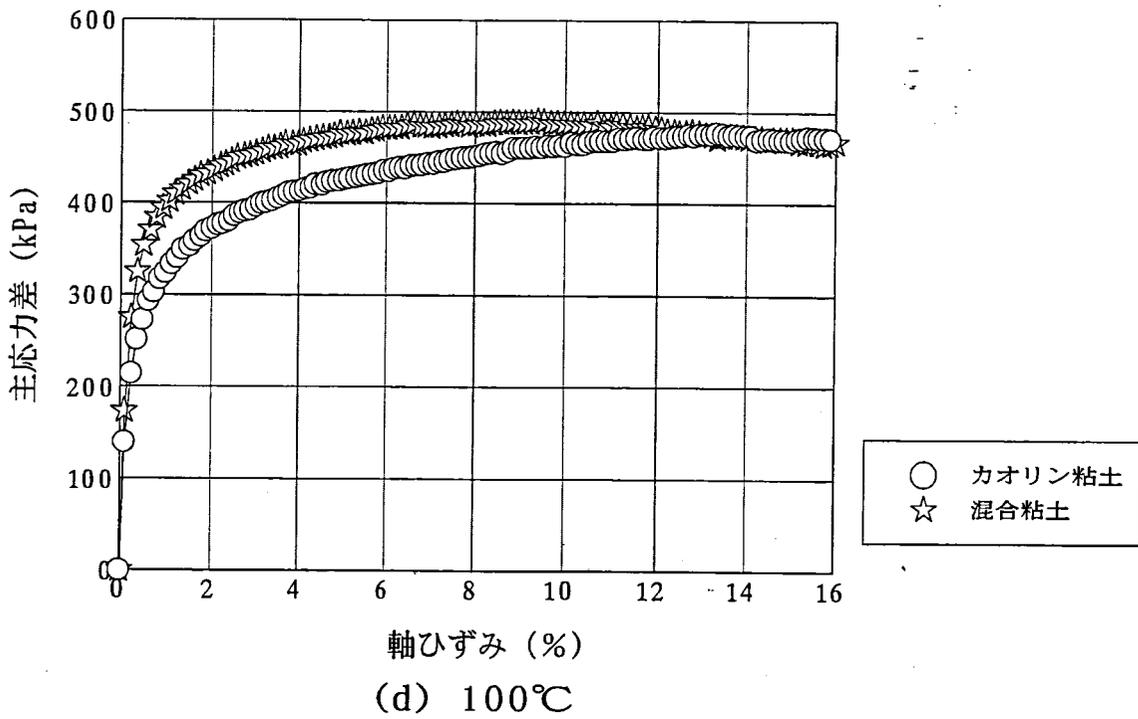
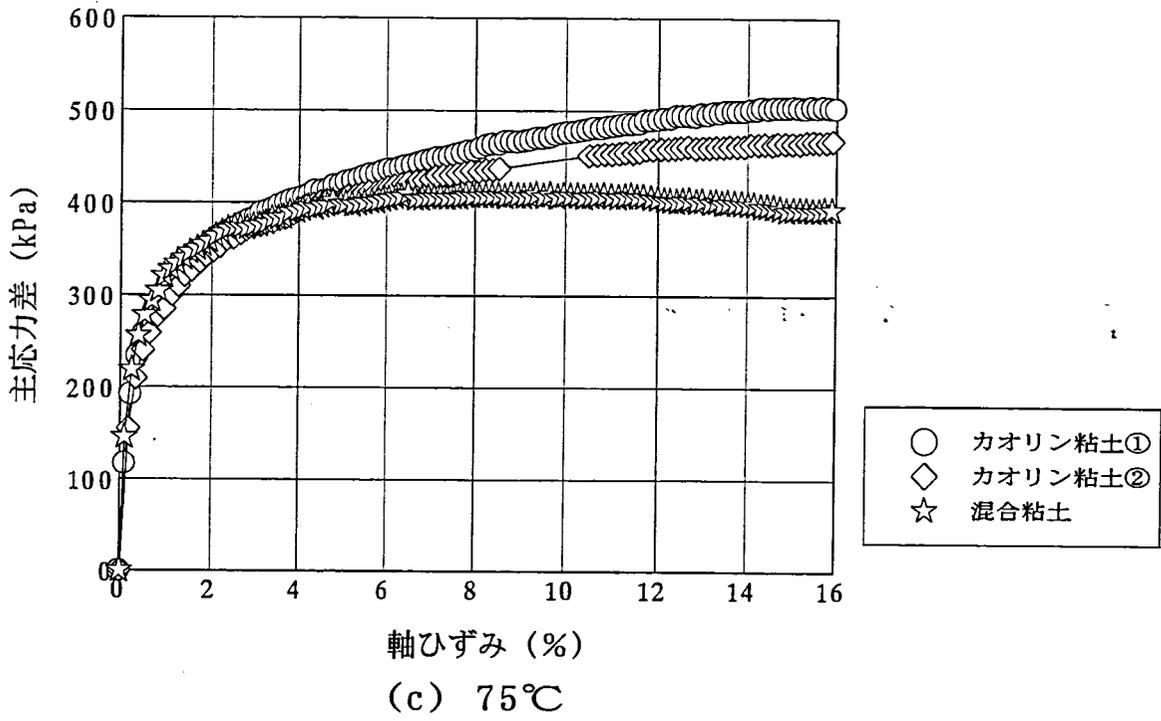
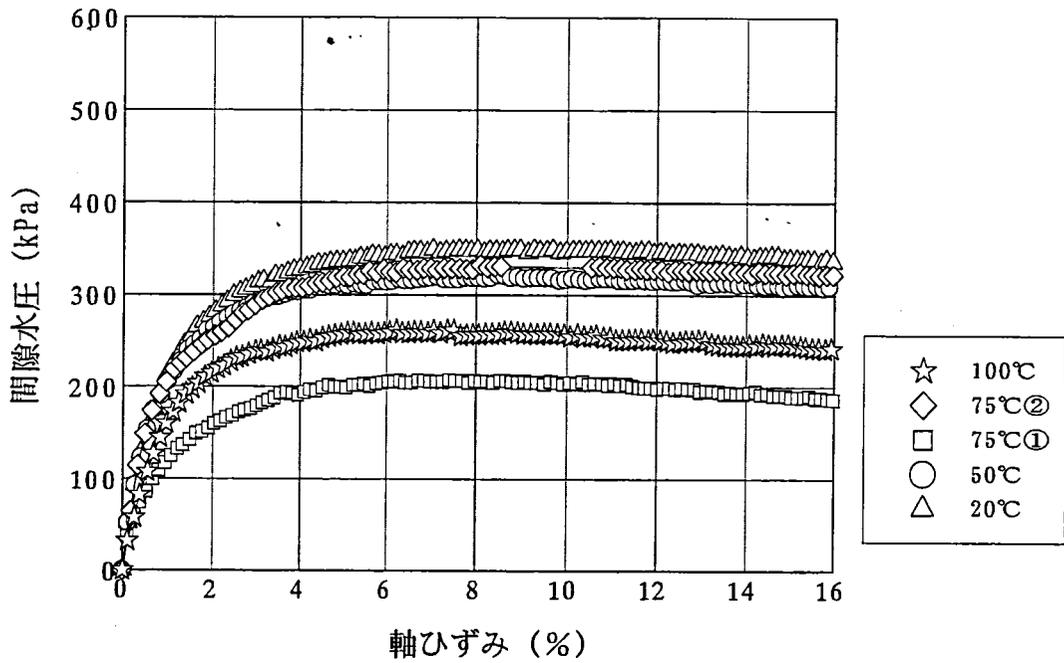
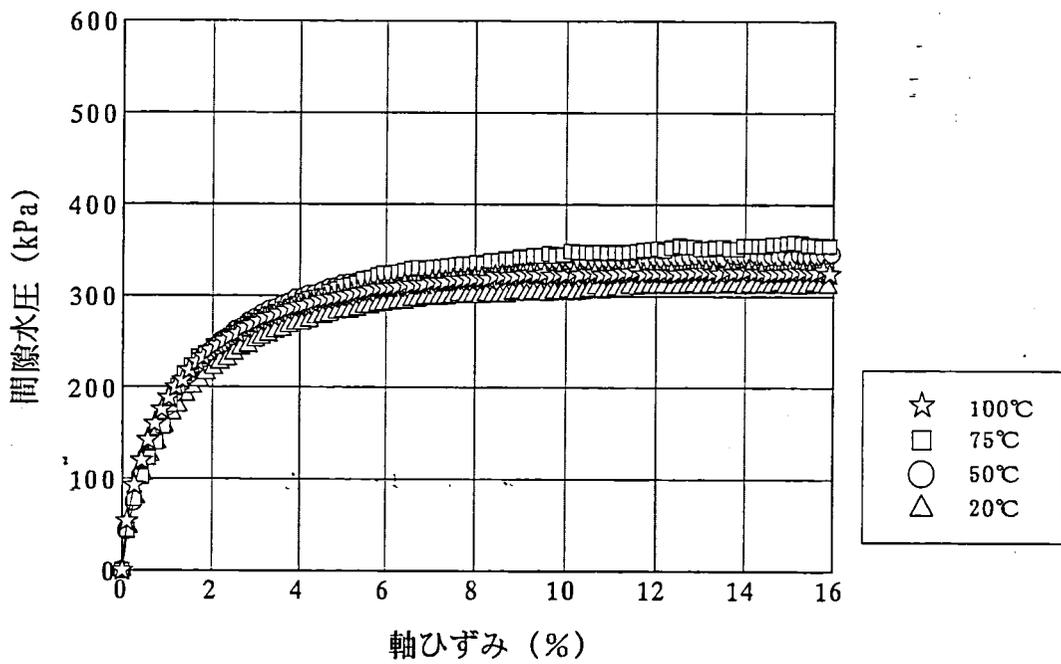


図5-2-4 q-εa 関係



(a) カオリン粘土



(b) 混合粘土

図5-2-5 $u-\epsilon a$ 関係

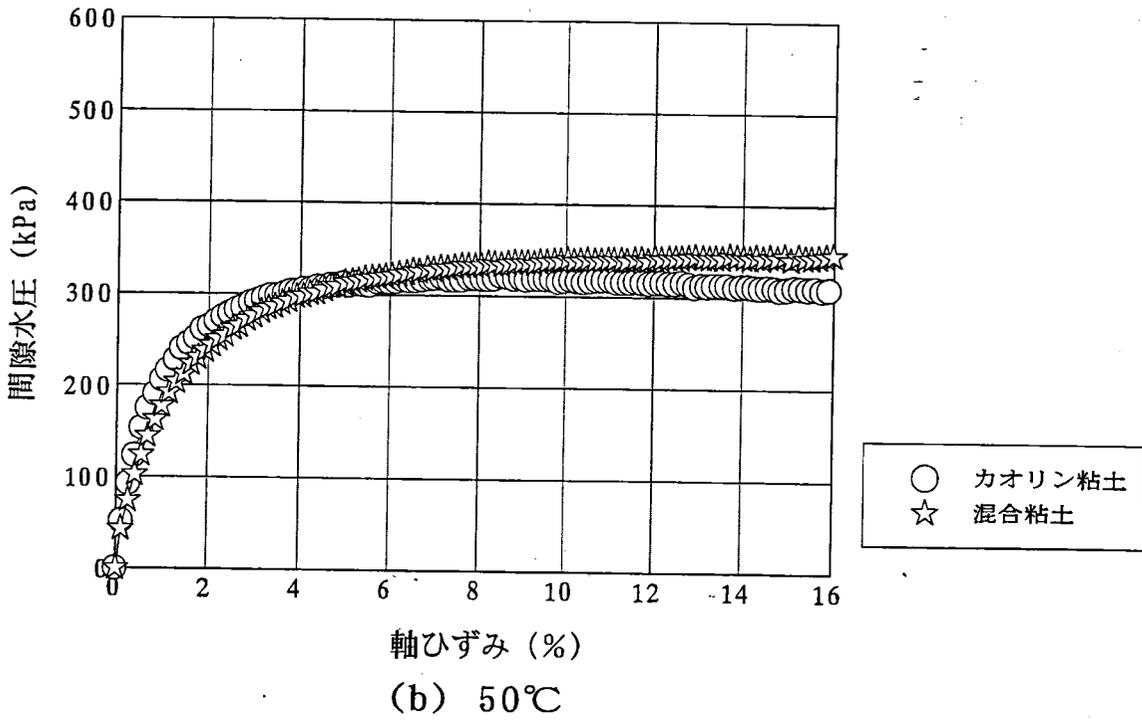
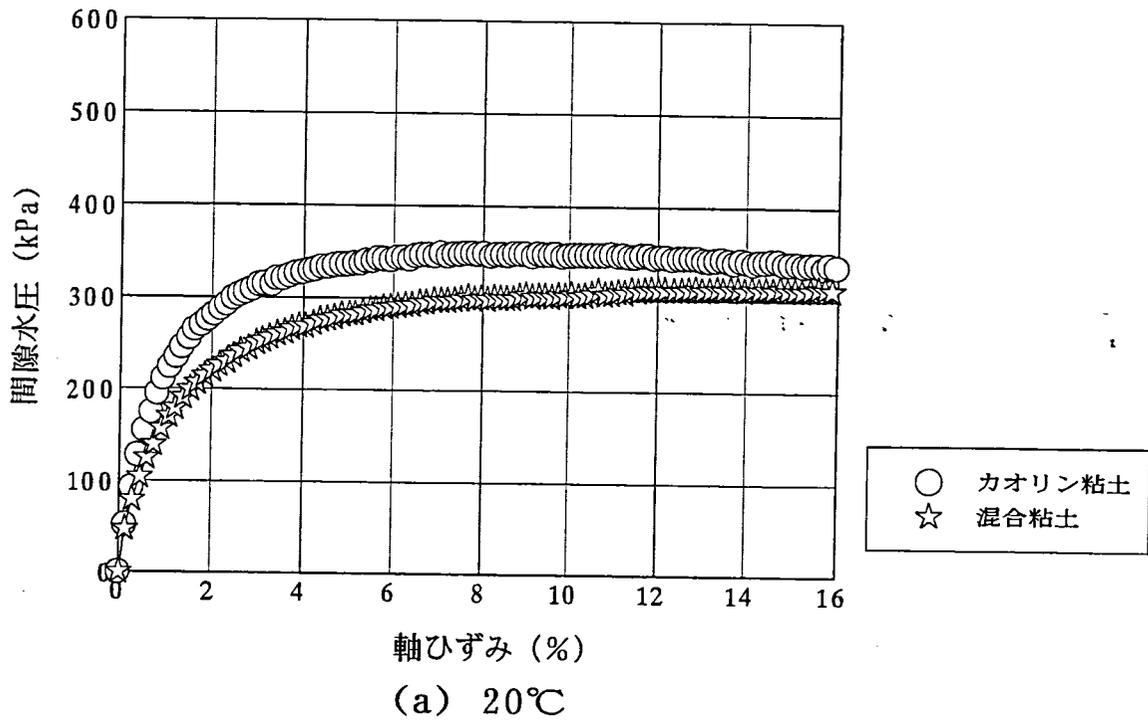


図5 - 2 - 6 u-ε a 関係

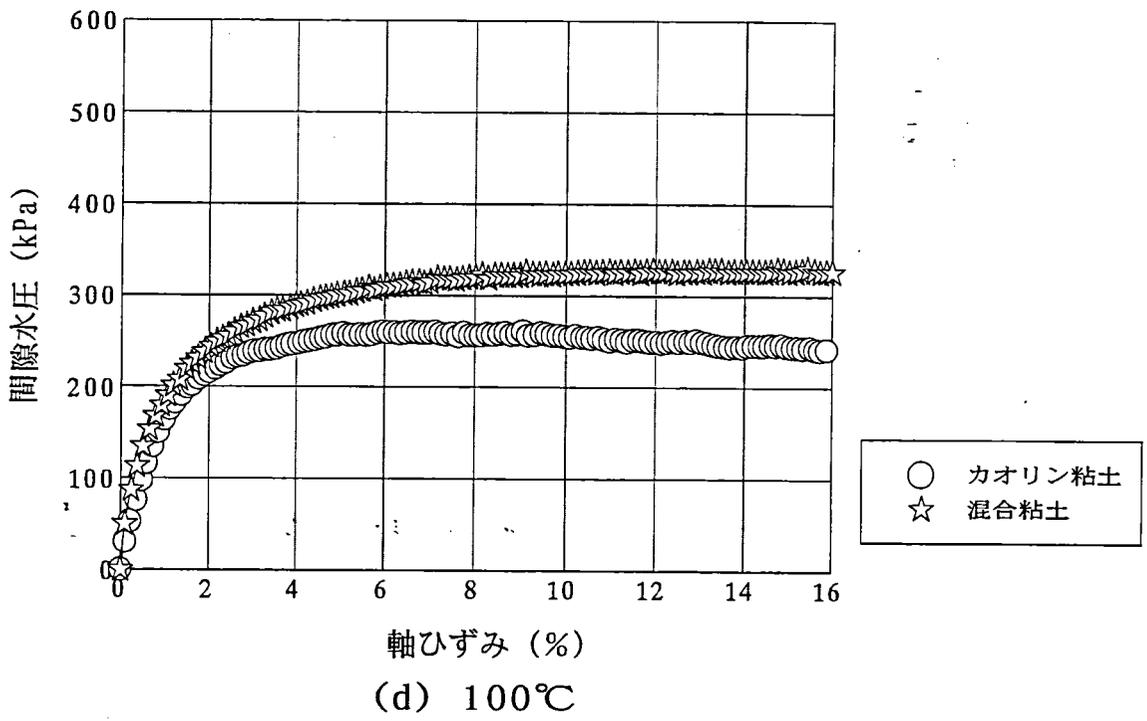
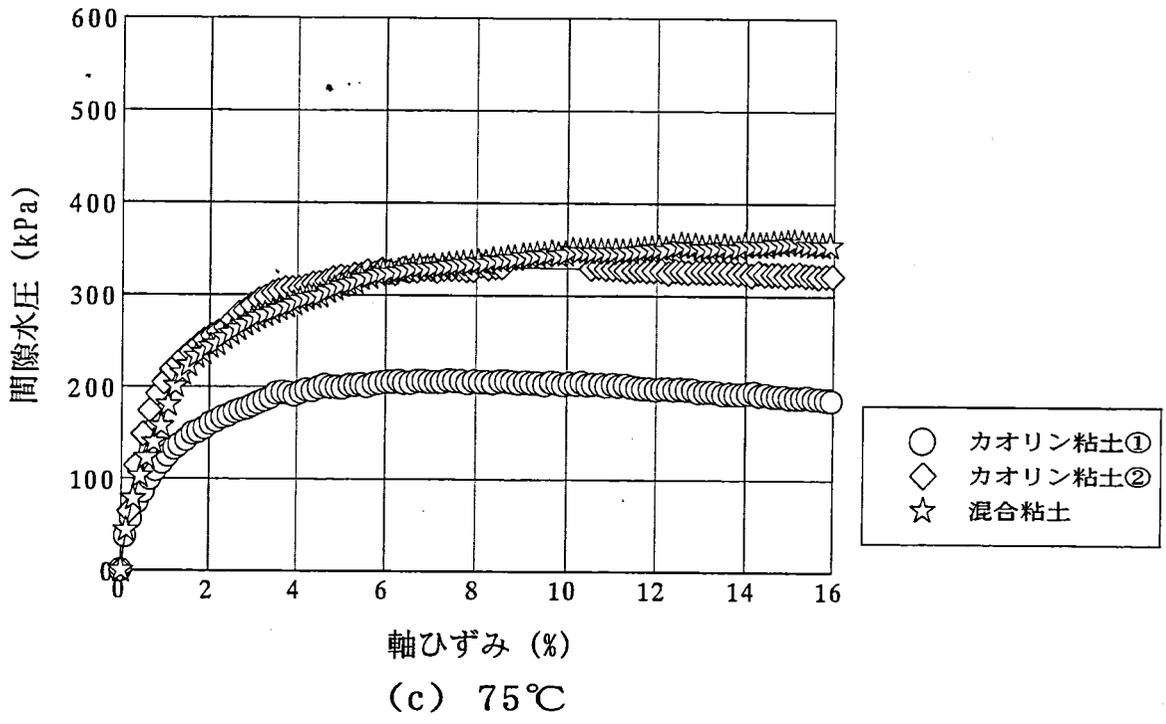
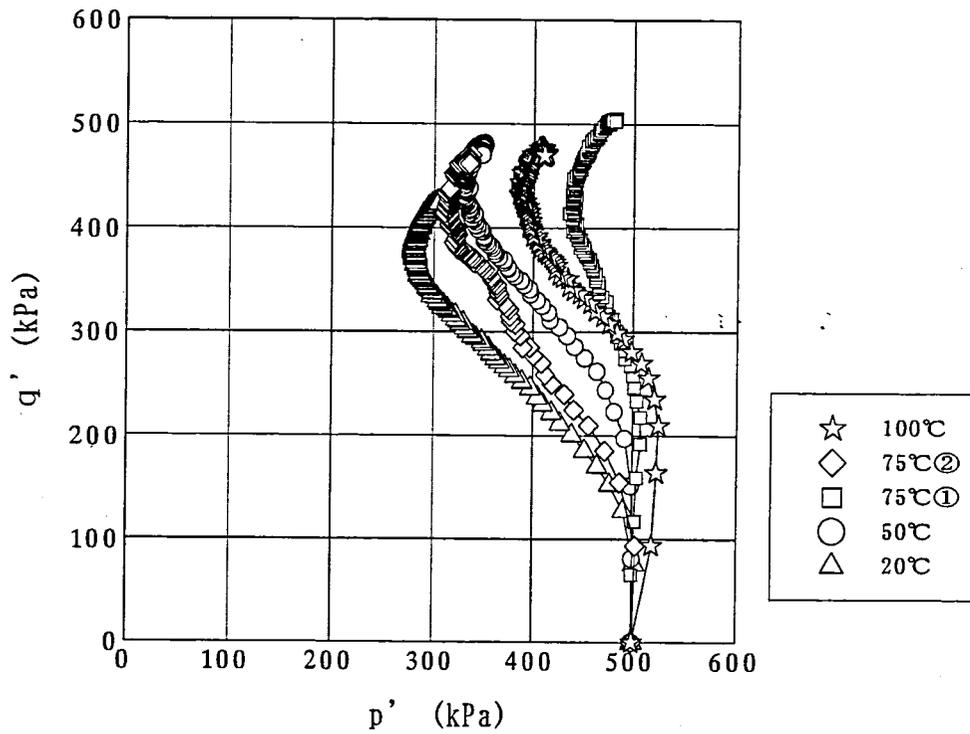
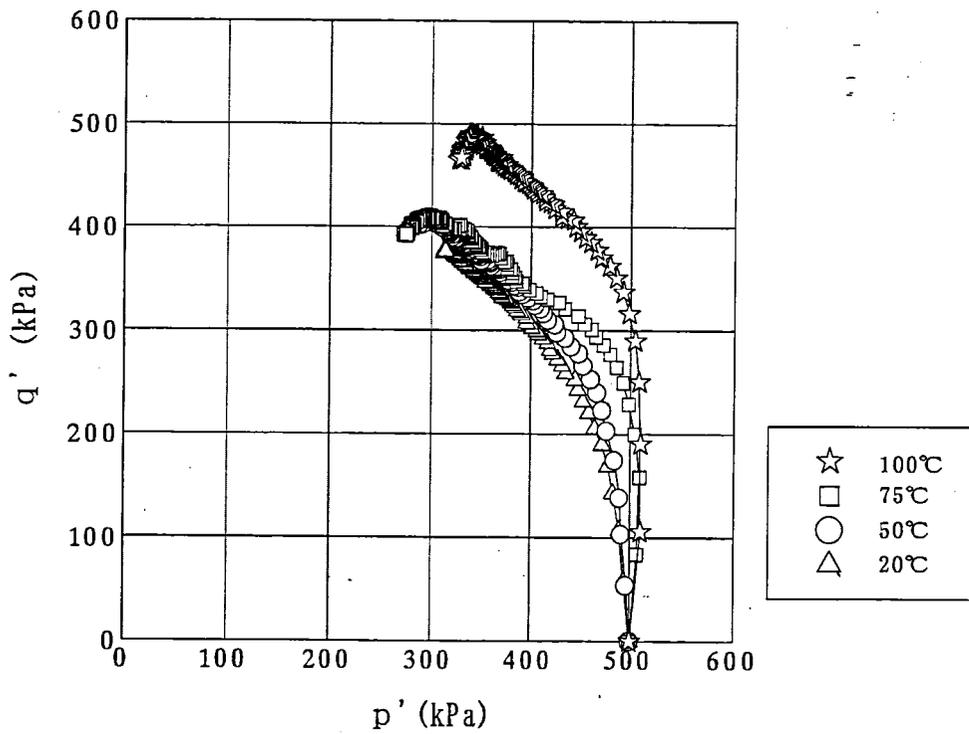


図5-2-6 u-ε a 関係



(a) カオリン粘土



(b) 混合粘土

図5-2-7 $q' - p'$ 関係

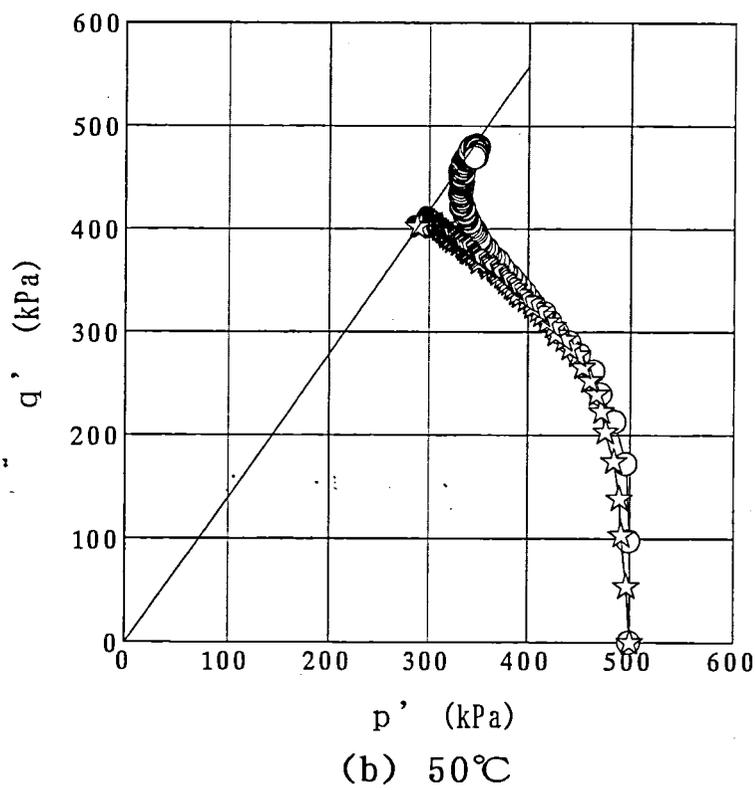
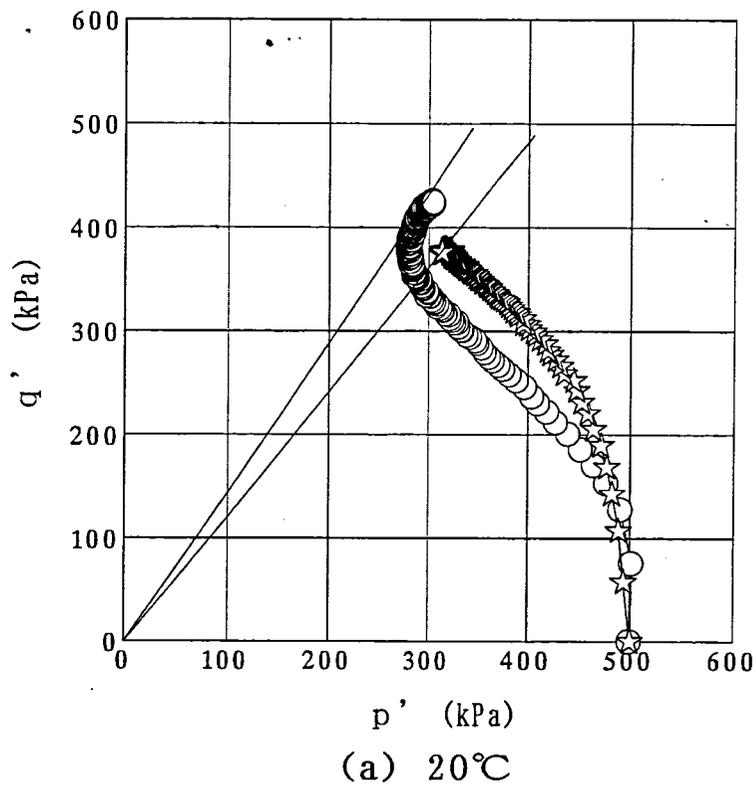
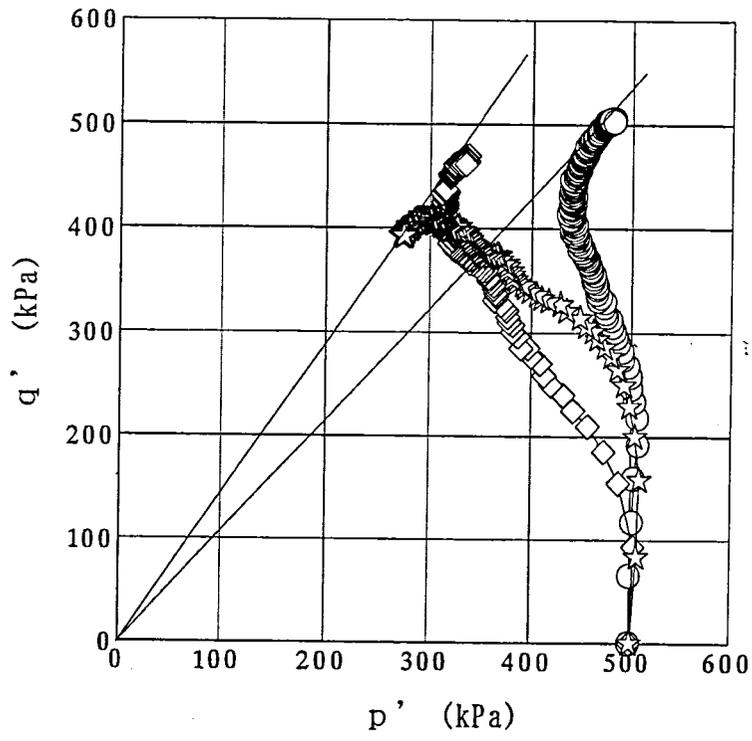
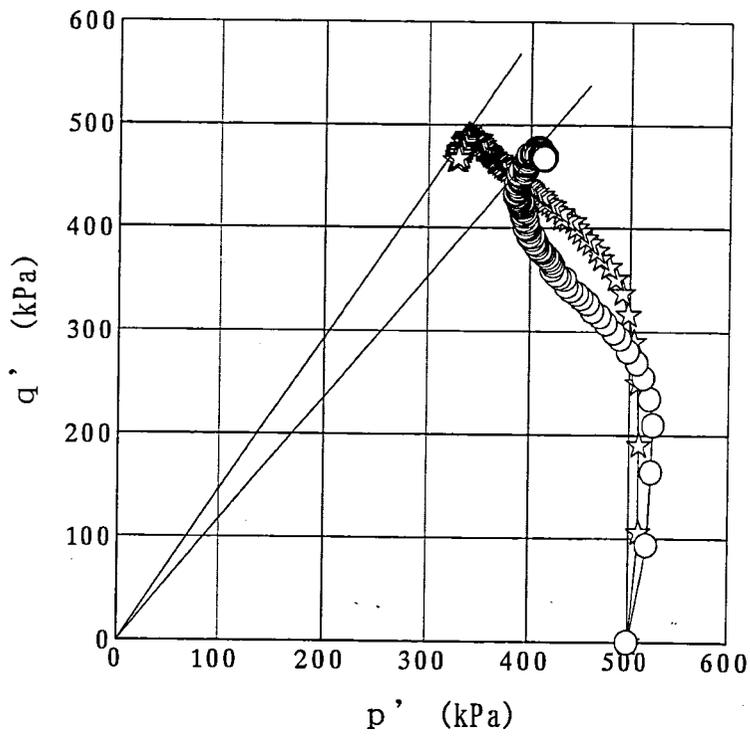


図5-2-8 $q' - p'$ 関係



(c) 75°C



(d) 100°C

図5-2-8 $q' - p'$ 関係

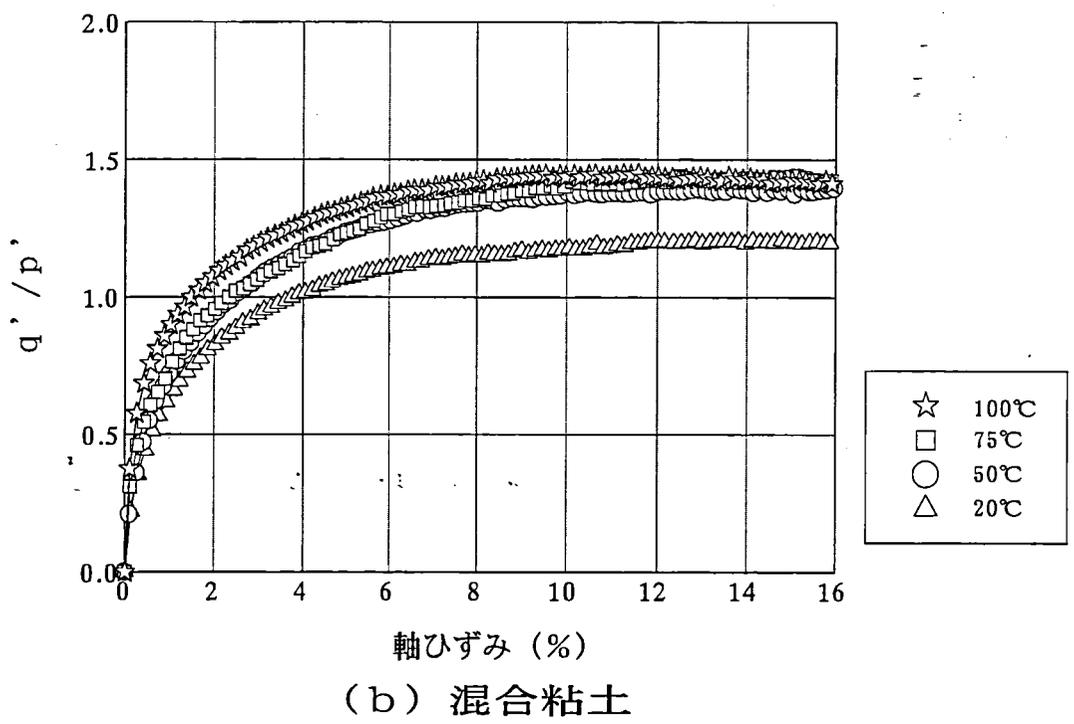
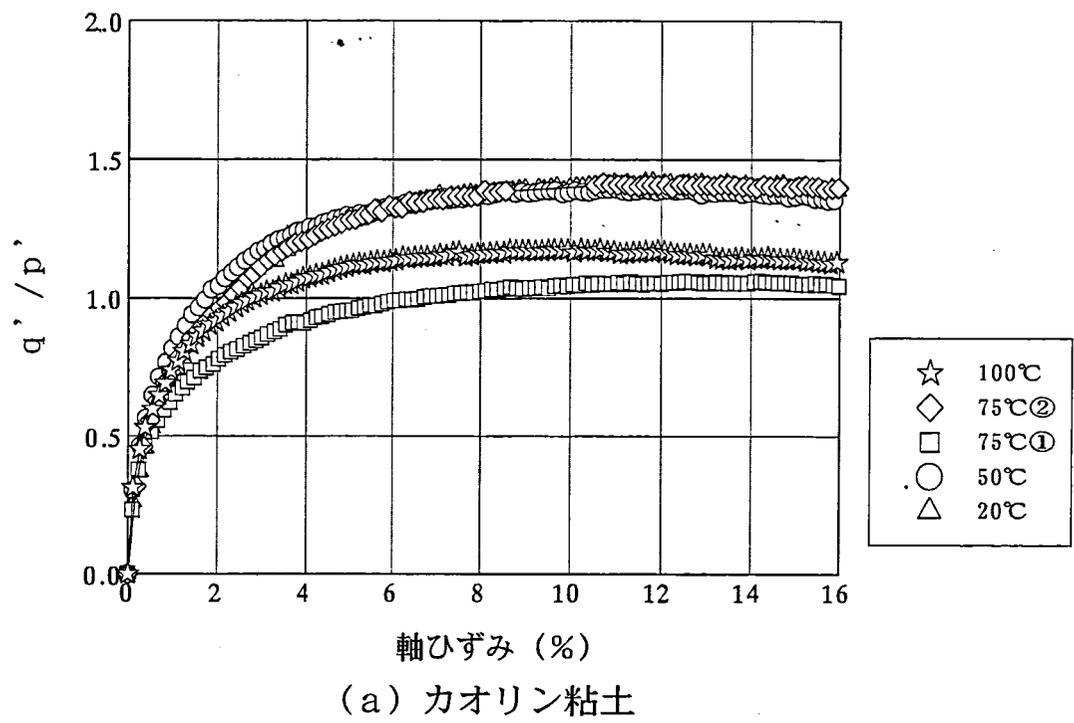
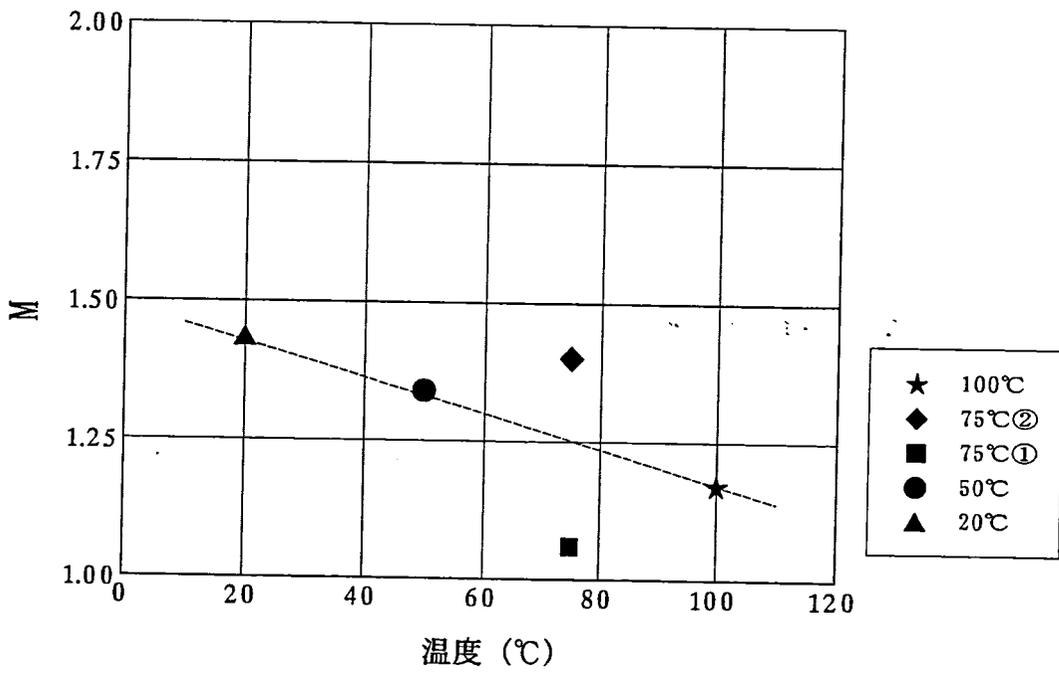
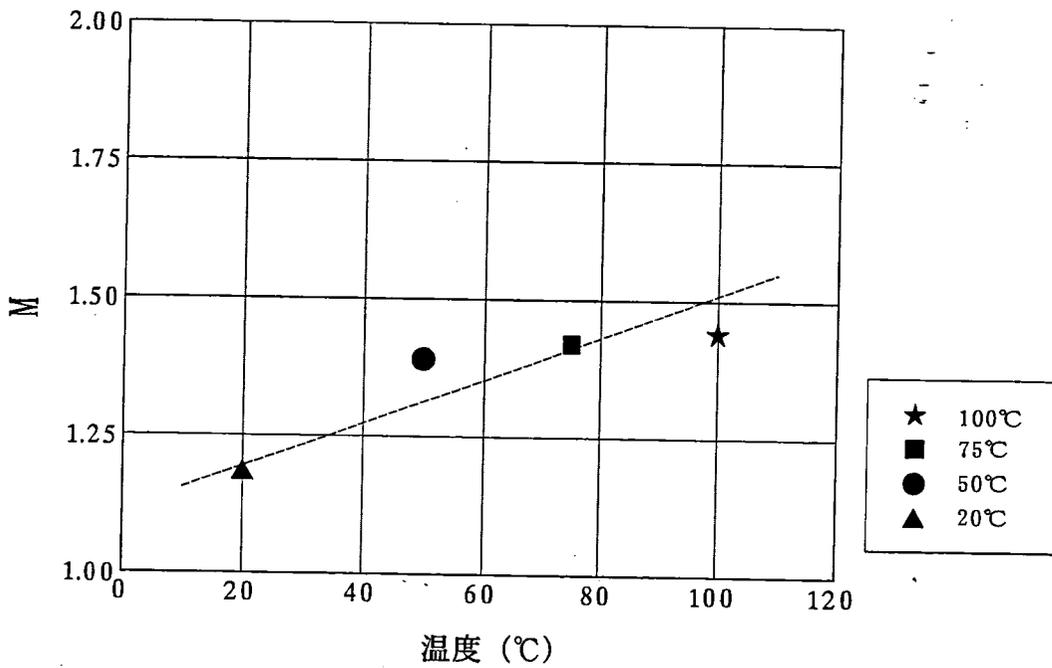


図5-2-9 $q' / p' - \epsilon a$ 関係

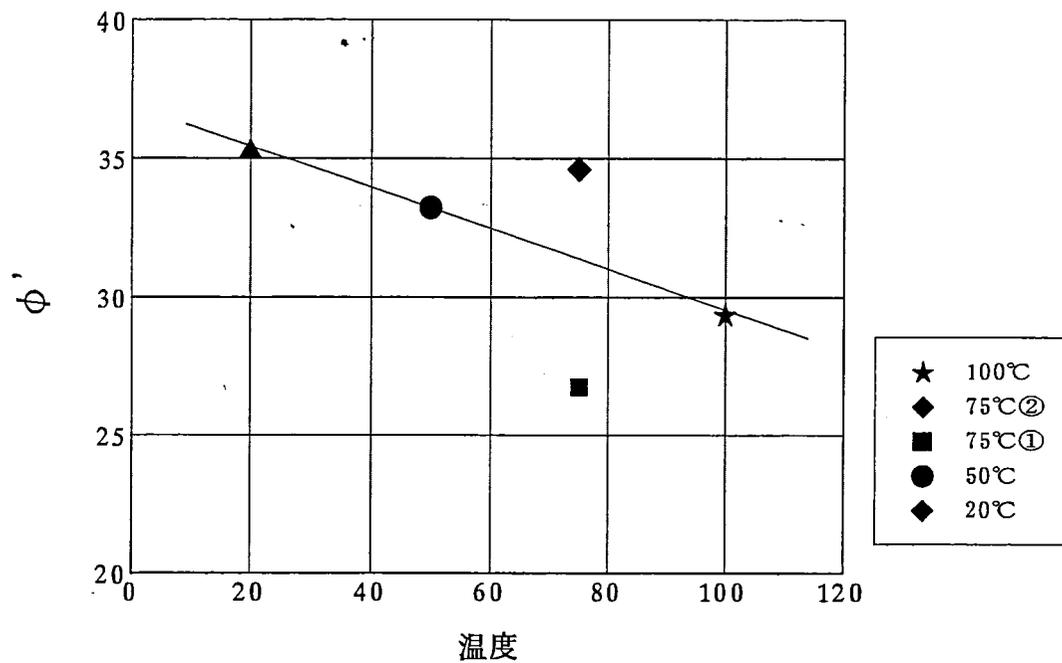


(a) カオリン粘土

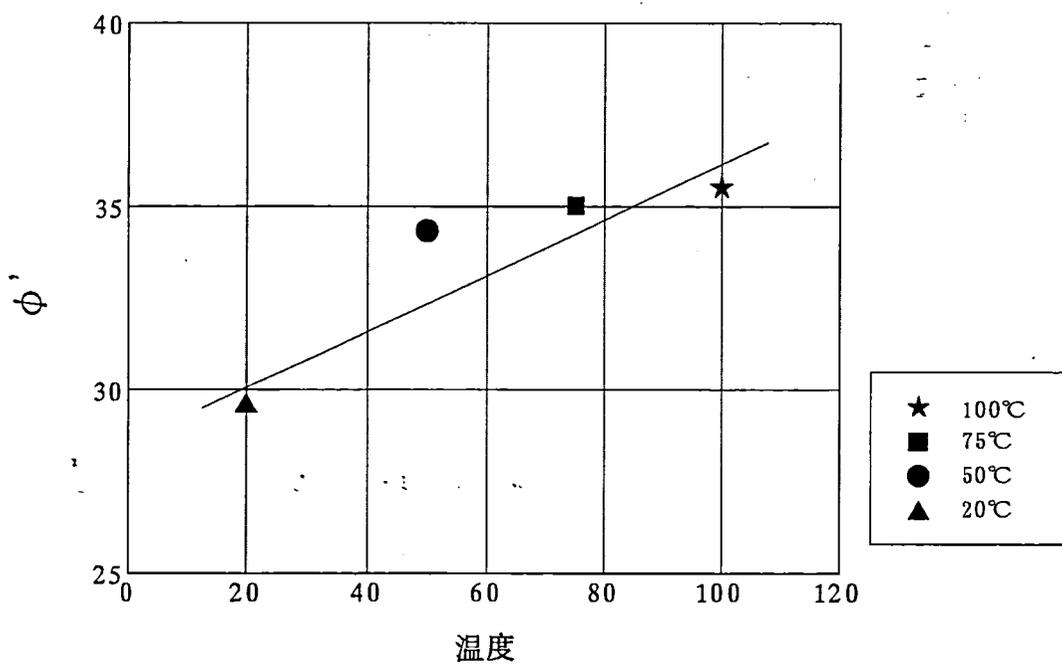


(b) 混合粘土

図5 - 2 - 10 M-温度 関係

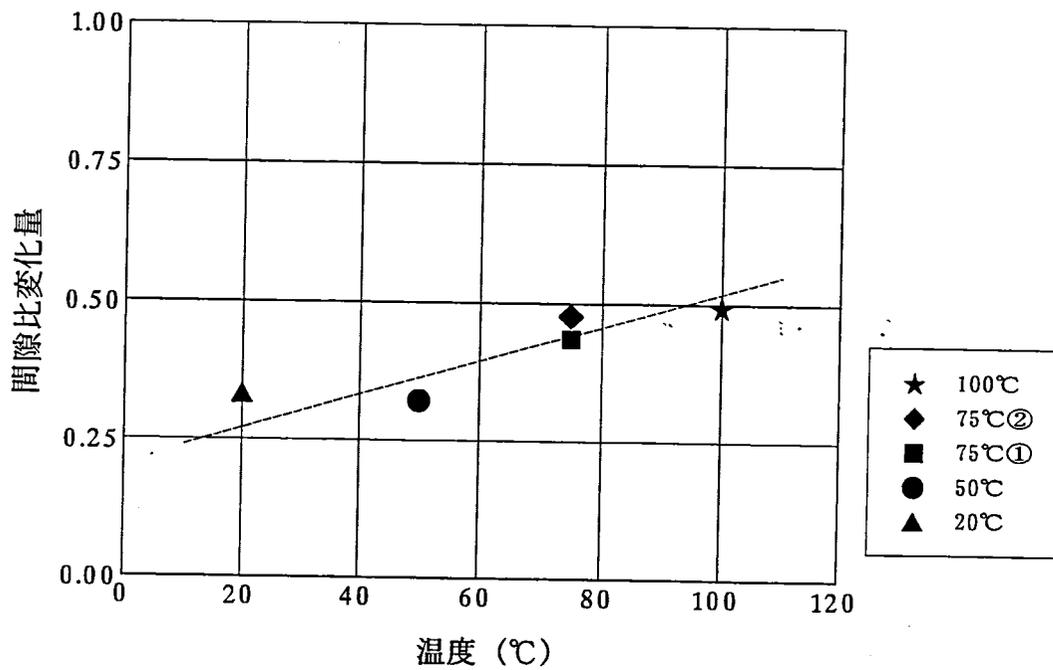


(a) カオリン粘土

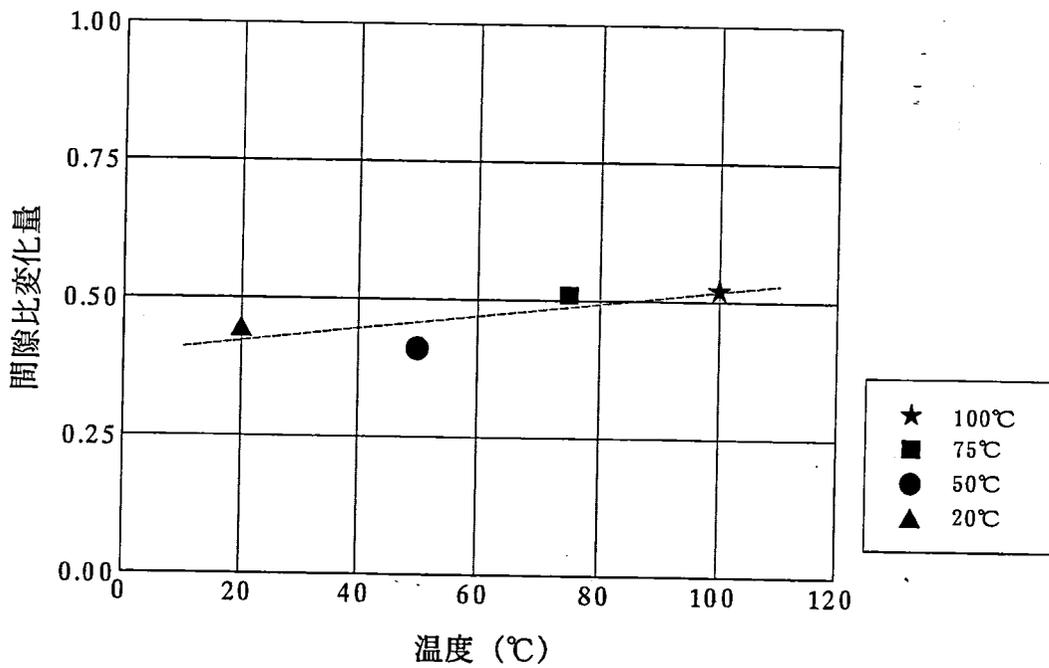


(b) 混合粘土

図5 - 2 - 11 ϕ' -温度 関係



(a) カオリン粘土



(b) 混合粘土

図5 - 2 - 12 間隙比変化量-温度 関係

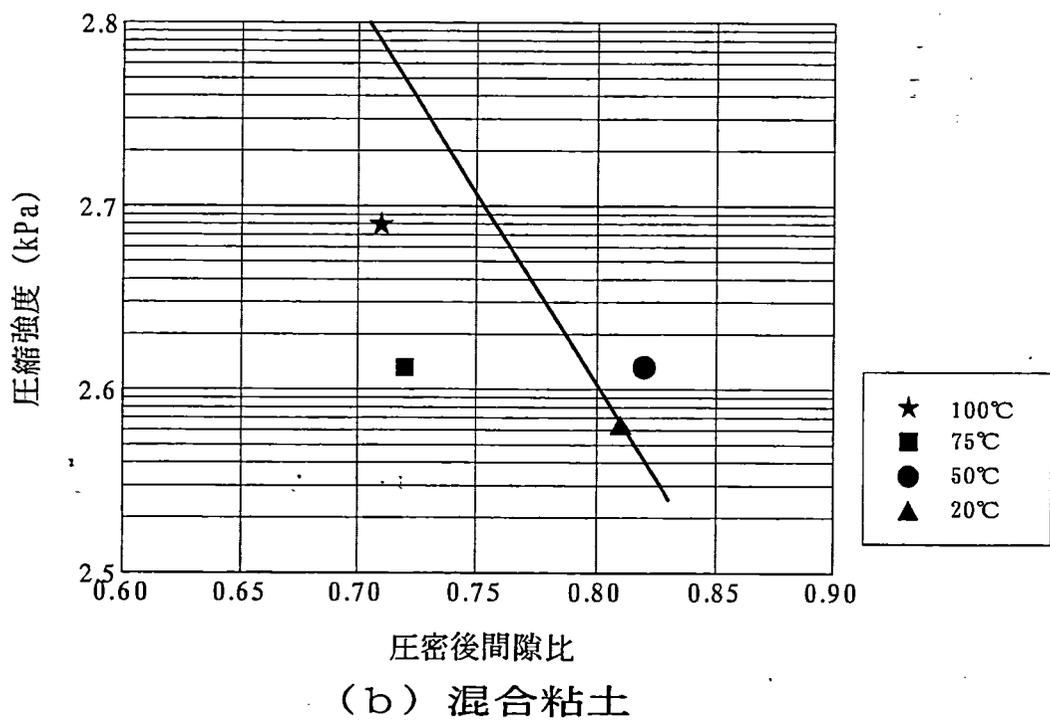
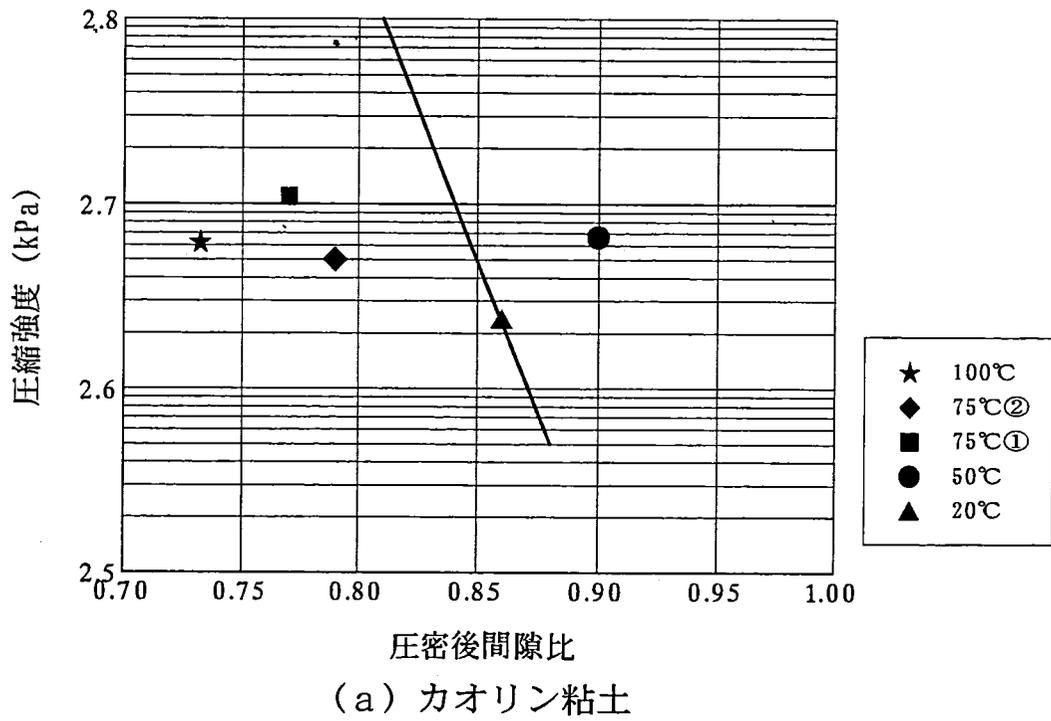


図5 - 2 - 13 圧縮強度-間隙比 関係

1) 主応力差－軸ひずみ関係

図 5-2-3～図 5-2-4 は、等方圧密後の非排水せん断時の主応力差 (q)－軸ひずみ (ε_a) 関係である。図 5-2-3 において、カオリン粘土の 75℃においてばらつきが見られたが、カオリン粘土、混合粘土ともに高温試料の方が大きな q の値を示す傾向が見られた。これは、高温試料ほど等方圧密時の排水量が多かったことより、圧密が促進され、土粒子構造が密実になったためだと考えられる。これは表 5-2-2 から判断できる。

また、試料ごとに比較すると、カオリン粘土の応力－ひずみ曲線はひずみ硬化型、混合粘土の応力－ひずみ曲線はひずみ軟化型となった。ここで、混合粘土においては、いずれも軸ひずみが 8～10% くらいで主応力差のピークが現れ、温度が高いほどピークを過ぎた後の軟化傾向が大きくなっている。骨格構造が発達しているものほど構造が破壊した後の軟化傾向が大きくなることから、温度の高い試料の方が室温試料より骨格構造が発達していたのではないかと考えられる。このことは森脇の研究⁵⁾による結果と類似している。

図 5-2-4、表 5-2-2 より温度ごとに比較すると、カオリン粘土の方が混合粘土に比べて圧密後の間隙比は大きい。室温、50℃、75℃ではカオリン粘土の q の方が大きい値となった。これはベントナイトが高塑性であるための影響であると考えられる。しかし、100℃では混合粘土の方で q が大きくなっており、ベントナイトの化学的物質の変化によるものとも考えることもできるが、この点についてはカオリン粘土における再実験と配合率を変えた混合粘土の実験を行う必要がある。

2) 間隙水圧－軸ひずみ関係

図 5-2-5～図 5-2-6 は、等方圧密後の非排水せん断時の間隙水圧 (u)－軸ひずみ (ε_a) 関係である。図 5-2-5 において、カオリン粘土では高温ほど間隙水圧は発生しにくい傾向が見られた。これは、藤原¹⁰⁾らが岡山粘土を用いて行った高温三軸試験と同様の傾向を示している。ただし、混合粘土においては温度上昇とともに間隙水圧は増加する傾向が多少現れた。

また、図 5-2-6 から分かるように、どの温度においてもカオリン粘土は軸ひずみが 6～8% のあたりから間隙水圧は減少しており、混合粘土は軸ひずみが増加

するとともに間隙水圧は徐々に上昇し続けている。

3) 有効応力経路関係

図 5-2-7～図 5-2-8 は、有効応力経路を示している。図 5-2-7 より、カオリン粘土、混合粘土ともに温度が上昇するにつれ、有効応力経路は右側へシフトしている。一般的に正規圧密粘土、過圧密粘土の応力経路は図 5-2-14 のようになることが分かっており、本実験で用いたカオリン粘土、混合粘土のどちらの試料も正規圧密粘土ではあるが、高温になるにつれ過圧密粘土の挙動に近づいているといえる。また、両試料の有効応力経路の形状に違いが見られた。カ

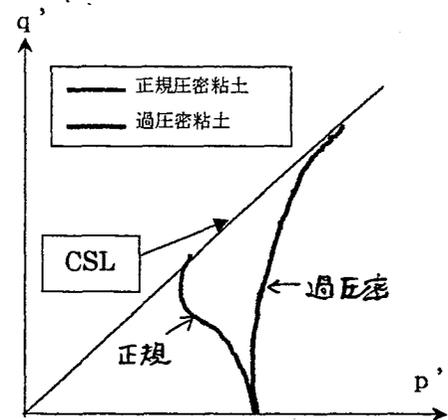


図 5-2-14 有効応力経路図

オリン粘土ではあるピークを境にして有効応力が増加していくのに対して、混合粘土では有効応力が減少していくことがわかる。この結果は、主応力差の結果の特性をよく表しているといえる。

また、図 5-2-8 より温度ごとに比較すると、限界状態線（破壊線）CSL の傾き M は室温ではカオリン粘土の方が大きいですが、 50°C ではほぼ同じ、 75°C では同じまたは逆に混合粘土の方が大きくなっており、 100°C では混合粘土の方が大きくなった。つまり、温度が上昇するにつれ M の値は混合粘土の方が大きくなった。

4) 温度と M の関係

図 5-2-9 は有効応力比－軸ひずみ関係を表しており、軸ひずみが増加するに従い有効応力比は一定値に収束する。この値が M を表している。

図 5-2-10 は温度と M の関係を示しており、図 5-2-11 には ϕ' と温度の関係を示している。ここで、強度定数のひとつである内部摩擦角 ϕ' と M には、

$$M = \frac{6 \sin \phi'}{3 - \sin \phi'}$$

の関係がある。

図 5-2-10 より、 M の値はカオリン粘土では室温 75°C でばらつきがあるものの、

高温履歴を与えることでMが小さくなった。一方、混合粘土では、高温ほどMの値は大きくなった。図 5-2-11 においても、カオリン粘土では高温履歴を与えることで ϕ' は小さくなり、混合試料では逆の傾向を示したことから、両試料において対照的な結果が得られた。

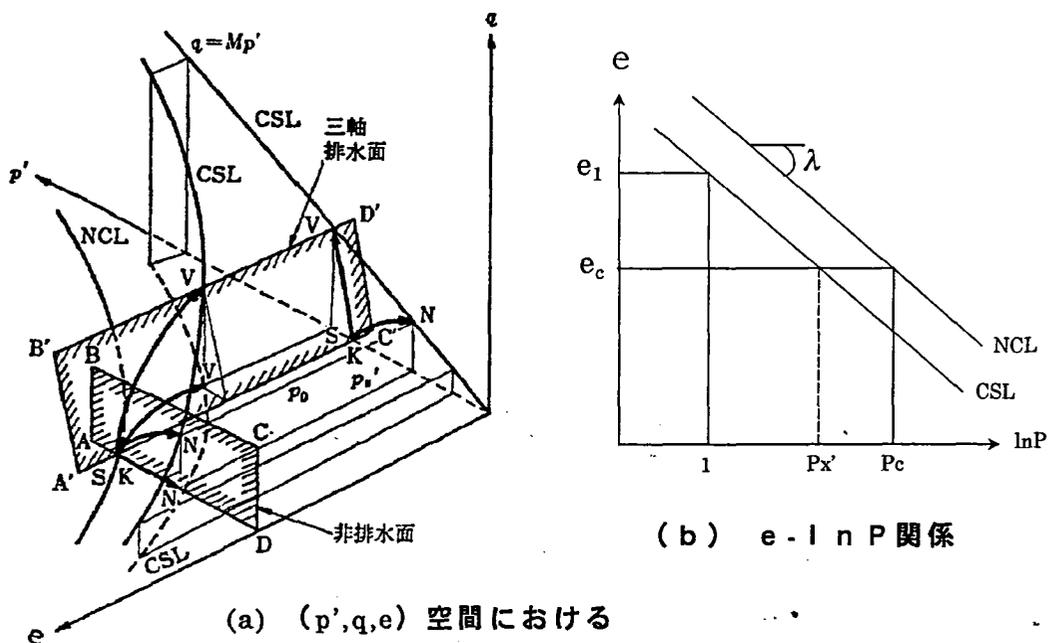
5) 間隙比と圧縮強度

図 5-2-12 は、温度と間隙比変化量の関係を表したものである。ここで、間隙比変化量は初期間隙比と圧密後の間隙比の差のことである。

カオリン粘土、混合粘土ともに温度が高いほど間隙比の変化量が大きくなる傾向が見られる。これは、温度の上昇とともに粘土の圧密が促進し、間隙比が減少したものと考えられ、藤原¹⁰⁾の研究によっても同様のことが示されている。また、温度変化に伴う間隙比の変化量は、カオリン粘土の方が若干大きくなった。

図 5-2-13 は圧縮強度と圧密後間隙比の関係を表している。図中には、粘土の限界状態の概念を用いた Cam clay モデルによる理論値を直線で、実測値を点で示している。

以下に Cam clay モデルの概念と用いた式を示す。



(a) (p', q, e) 空間における
限界状態線(CSL)と応力経路¹⁵⁾

(b) の幾何学的条件と, M の定義より

$$\begin{cases} e_c = e_1 - \lambda \cdot \ln P_x' \\ M = \frac{q_x'}{p_x'} \end{cases}$$

これらを整理して

$$e_c = \frac{C_c}{2.3} \cdot \log q_x' - \left(\log M - \frac{e_1}{\lambda} \right) \quad (1)$$

を得る. ここで,

$$\lambda = \frac{C_c}{2.3}$$

e_c : 圧密後の間隙比

e_1 : $P = 1$ のときの間隙比

λ : $e - \ln P$ 曲線の

p_c : 圧密圧力

p_x' : 圧密圧力 p_c における限界状態での有効軸応力

q_x' : 圧密圧力 p_c における限界状態での有効側方応力

c_c : 圧縮係数

式 (1) より, 間隙比と圧縮強度との間には片対数上で比例関係があることが分かる.

6) 温度効果

一般的に, 間隙比が小さい試料ほど土粒子構造はより密実であり, 圧縮強度は大きいと考えられる.

ここで, 図 5-2-13 は圧縮強度と圧密後の間隙比の関係を示しており, 実測値のみで比べると, カオリン粘土, 混合粘土ともに, 室温と 50℃ では, 50℃ の方が間隙比は大きいにも関わらず, 圧縮強度が大きくなっている. つまり, 50℃ の方が骨格構造が発達していると考えられる. これは, 高温圧密履歴時にセメンテーションなどによって年代効果が再現され, それが壊れずに残っていたためだと考えられる.

しかし, Cam clay モデルを用い室温状態を基準として得られた理論値と比較してみると, 両試料とも 50℃ 以外は間隙比減少に伴って見込まれる圧縮強度よりは小さな圧縮強度となった。つまり, 温度上昇に従う間隙比の減少によって圧縮強度は増加したが, その傾向は温度上昇によるセメンテーションなどによって年代効果が再現されたためではない。むしろ, 間隙比の減少量に対応した強度増加が得られておらず, 見方によっては, 温度が上昇したことによって強度が低下したとすることもできる。ただし, 本実験ではばらつきが見られたため, 今後さらに実験を行い検討していく必要がある。

第6章 結論

本研究では、温度履歴を受けた粘性土の工学的性質について、高温高压型三軸試験装置を用いて \overline{CU} （圧密非排水三軸圧縮）試験を行い、温度履歴を受けた粘性土の強度・変形特性、圧縮・圧密特性について調べた。また、試料には対照的な性質を持つカオリンとベントナイトを用いて、温度効果の影響を比較した。その結果より得られた主な結論を以下に示す。

- 1) 100℃の高温状態で飽和粘土の圧密非排水三軸圧縮試験が実施できた。100℃における圧縮・圧密特性および強度・変形特性は、100℃以下での温度効果のほぼ延長線上にあり、100℃程度では粘土の力学特性に大きな変化が表れないことが明らかとなった。
- 2) 温度と間隙比の関係においては、両試料とも高温履歴を与えるほど等方圧密時の排水量が増え、間隙比減少量が大きくなった。つまり、高温状態ほど圧密が促進され、土粒子構造が密実になったと考えられる。また、温度変化に伴う間隙比の変化量は、カオリン粘土の方が若干大きくなった。
- 3) 等方圧密後の非排水せん断時の主応力差と軸ひずみの関係において、両試料とも温度が高い方が大きな主応力差を示す傾向が見られた。これは、温度が高いほど圧密が促進され、土粒子構造が密実になったためだと考えられる。また、混合試料においては、温度が高いほどピークを過ぎた後の軟化傾向が大きくなっており、高温を与えた方が室温より骨格構造が発達していたのではないかと考えられる。
- 4) 有効応力経路においては、両試料とも温度が上昇するにつれ、全応力経路側にシフトし、過圧密粘土の応力経路に類似したものとなった。つまり、両試料とも正規圧密粘土であるにも関わらず、高温履歴を与えることで疑似過圧密状態に近づいたと考えられる。

- 5) 限界状態線においては、カオリン粘土では高温履歴を与えることで限界状態線の傾きは小さくなったが、混合粘土では大きくなった。両試料において、対照的な結果が得られた。
- 6) 温度効果については、両試料とも温度上昇に伴い強度が増加するという傾向が見られてはいるが、間隙比の減少量に対応して見込まれる強度増加は得られていなかった。つまり、見方によっては温度が上昇したことによって強度が低下したと考えられる。

参考文献

- 1) 足立格一郎：軟弱粘土の高温環境下での挙動究明に関する総合的研究，研究成果報告書，1996.
- 2) Pisit Kuntiwattanakul：Effect of High Temperature on Mechanical Behavior of Clays, Doctor Thesis of Tokyo University, 1991.
- 3) 清水正喜，赤木寛一，上俊二，風間秀彦，園田紘史，土田孝，東畑郁生：高温環境が粘性の諸特性に及ぼす影響の解明，高温環境と土一粘土の微視的構造から廃棄物の地中処分問題まで—シンポジウム，pp. 1-28, 1997.
- 4) Bjerrum, L.：Engineering geology of Norwegian normally consolidated marine clays as related to settlements of buildings, Geotechnique, Vol. 17, pp. 17-83, 1967.
- 5) 森脇武夫：自然堆積粘土の年代効果の把握と室内再現方法に関する研究，研究成果報告書，1997.
- 6) 土田孝，小林正樹，水上純一：高温再圧密による年代効果の再現性について，第24回土質工学研究発表会，pp. 605-608, 1989.
- 7) L. Pach：Silikaty, 4, 283, 1973.
- 8) 高橋美昭，出口朗，櫛田吉造：高レベル放射性廃棄物処分場の概念設計，土と基礎，Vol. 46, No. 10, pp. 7-9, 1998.
- 9) 増田純男，梅木博之，内藤守正：高レベル放射性廃棄物地層処分の安全評価，土と基礎，Vol. 46, No. 10, pp. 10-14, 1998.
- 10) 下岡浩：高レベル放射性廃棄物の地層処分場近傍における温度上昇と熱応力の数値解析法，日本伝視力学会誌，Vol. 24, No. 11, pp. 889-895, 1982.
- 11) 石井卓，櫛田吉造，今津雅紀，新谷貞夫：高レベル放射性廃棄物地層処分施設の概要とその熱的問題の検討，土木学会論文集，No. 355/VI-2, pp. 124-133, 1985.
- 12) 伊藤邦明，伊藤洋：地下空洞周辺の電熱に関する研究，土木学会論文集，No. 363/II-4, pp. 97-106, 1985.
- 13) 清水恵助ほか：東京湾におけるごみ埋立地盤の土質工学的研究（その7），第27回土質工学研究発表会講演集，pp. 13-16, 1988.

- 14) 大住明夫, 今川史郎: 温泉余土の土質工学的特徴について—主として室内試験結果の示唆する問題点—, 日本道路公団試験所報告, pp. 14-27, 1976.
- 15) Yong, R. N. and Warkentin, B. P.: Introduction to soil behavior, Macmillan, pp. 108-112, 1996.
- 16) 上俊二, 藤原東雄: 二次圧密時に温度効果を受けた粘土の非排水せん断強度の評価, 地盤工学会「高温環境と土」シンポジウム pp. 167-172, 1997.
- 17) Wetzel, A.: Influence of heat flow on oozelchalk cementation. Quantification from consolidation parameters in DSDP sites 504 sediments, J. Sediment Petrol., 59, pp. 539-547, 1989.
- 18) 小泉和広, 岸本弘樹, 坂上麻子, 土田孝: 高温で再圧密された粘土の力学特性と理化学特性について, 第50回土木学会年次学術講演会概要集, pp. 276-277, 1995.
- 19) Joakin, L.: Effect of temperature on some engineering properties of clay soils, Highway Research Board Special Report 103, pp. 186-193, 1969.
- 20) 森脇武夫, 藤原東雄, 安川郁夫, 日下部伸, 小泉和宏, 和田眞郷: 不攪乱自然粘土の年代効果と室内再現方法の検討, 高温環境と土—粘土の微視的構造から廃棄物の地中処分問題まで—シンポジウム, pp. 31-56, 1997.
- 21) 藤原東雄, 上俊二: 高温効果を受けた粘土の圧密特性(その2), 第34回地盤工学研究発表会, pp. 479-480, 1999.
- 22) 大石幹太, 東畑郁生, 岩下裕一: 高温環境で行った粘土のせん断試験, 第29回土質工学研究発表会, pp. 635-638, 1994.
- 23) 白水晴雄: 粘土鉱物学—粘土科学の基礎—, pp. 110-157, 1988.
- 24) 木村孟, 石原研而: 土木工学大系, pp. 91-123, 1980.
- 25) 古川重幸: 高温再圧密による粘土の微視的構造と工学的性質の変化, 広島大学卒業論文, 2000.

第2部

高温履歴による粘性土の微視的構造と力学特性の変化

目次

第1章 序論	1
第2章 既往の研究	
2.1 粘土の構造	2
2.2 年代効果	4
2.3 高温再圧密方法	7
2.4 微視的構造から見た年代効果の再現性	10
第3章 解析方法	
3.1 概要	13
3.2 解析装置	13
3.3 解析方法	16
3.4 解析精度	18
第4章 実験結果と解析結果および考察	
4.1 試料および再圧密方法	21
4.2 力学試験結果	22
4.3 解析結果	26
4.4 力学試験結果に対する考察	43
4.5 解析結果に対する考察	44
第5章 結論	50
参考文献	51

第1章 序論

土は土粒子の集合体であり空隙をもつ。したがって、土は粒子の集合体に対する力学、つまり粒状体の力学の対象であると考えられる。しかし、地盤に外力が作用したとき、地盤を構成するそれぞれの土粒子の変形や回転を逐一解析する事は非常に困難である。そこで、土粒子や空隙の中の水や空気のそれぞれが、均一に密実に分散した連続体物質であると仮定し、連続体の力学を適用して土の力学的挙動の解明が行われてきた。ところが、実際の土粒子は粒状体であるので、粒子形状やその粒子で形成される粒子構造は、土の力学的挙動に何らかの影響を及ぼしており、連続体の力学の適用だけでは解明されない問題が依然として多く残されている。粘土の構造に関する研究は、概念的なレオロジーモデルと呼ばれる構造要素を用いて説明されている¹⁾が、実際の構造がどのように変化しているのかは直接的には明らかにされていない。

また、現在の土質力学の理論体系は、実験室内で人工的に再圧密して作製された粘土に基づいて構築されている。しかし、自然地盤の粘土の力学特性と、再圧密して作製された粘土の力学特性が異なっていることが、近年の研究で明らかになってきた。これは、自然地盤が非常に長い時間をかけて形成されるため、その間に化学的結合作用や二次圧密などの年代効果により、粘土の粒子構造が発達するためと考えられる。そこで、自然粘土の持つ年代効果を実験室内で再現する方法が研究され、粘土を高温状態で圧密する方法が提案された。この方法は、粘土の巨視的挙動に関しては、年代効果の再現性が認められている。しかし、年代効果は現在の力学理論では未解明な点が多く、巨視的挙動からだけでは年代効果が再現されたとはいえない。そこで、本研究では年代効果の再現性を、粘土の微視的構造から検討する。具体的な方法として、走査型電子顕微鏡を用いて粘土の粒子構造の写真撮影を行い、コンピューターを使って撮影した写真の画像解析を行った。なお、今回の解析には、粒子構造を撮影した写真の濃度解析とスペクトル解析を行い、定量的かつ客観的に年代効果の再現性を評価した。

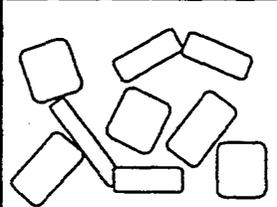
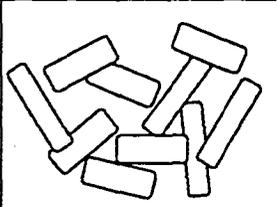
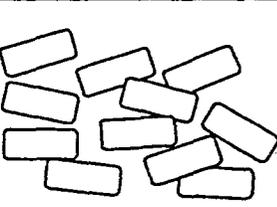
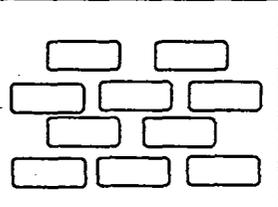
第2章 既往の研究

2.1 粘土の構造

土粒子の中で、砂やシルト粒子は球形や楕円体などに近い形状で、厚さを持った土粒子が多いのに対し、粘土を構成する微細な粘土粒子の形状は、一般に薄片状あるいは、板状のものが多く、極めて複雑な形状の土粒子を含んでいる。

粘土粒子は非常に小さく、負の電荷をもつため、粘土粒子は陽イオンの働きにより、凝集する。粘土粒子が複数個集まった集合体をペッド (ped) と呼び、粒子の構造を構成する最小単位と考えられている。また、間隙をポア (pore) と呼び、基本単位であるペッドの配列の程度を表すものを基本モデル²⁾という。

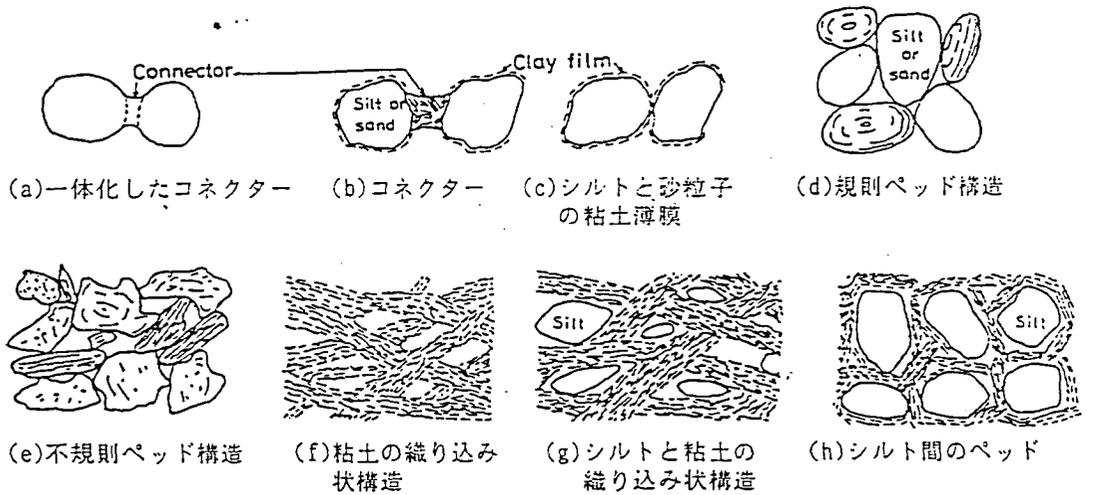
表-2.1.1 基本モデル

ランダム構造	綿毛化構造	分散構造 (不完全配向)	配向構造 (完全配向)
			

しかし、多種多様の粒子からなる自然の粘土では、表-2.1.1 ような基本モデルは、ほとんど見られず、粒子形状が不明確な粘土では、ペッドの境界すら識別できないことがある。

そこで、自然の粘性土の構造を表現するために、いろいろな観点から多くの実体モデルが提案された (Collins, McGown(1974)³⁾)。このモデルを用いて、不攪乱粘土の構造を眺めてみると、不攪乱粘土の構造は、不規則に綿毛化した構造であり、表-2.1.2 の実体モデル(b)~(e)の構造が認められることが多い。これは、長い年月の自然の外的・内的な営力によって、セメンテーション効果や年代効果が生じたためと考えられている。

表-2.1.2 実体モデル



また、攪乱粘土は、風化した砂粒子が破碎されたり、粘土薄膜の一部がはぎ取られて、微細な粒子が散在する構造になる。多くのペッドは破壊されて、締め固まり、大きな塊を形成するようになり、小さいペッドとして存在することは少ないと言われている。

さらに、高温予圧密した粘土と、室温予圧密した粘土の構造の比較も行われ(風間ら(1981)⁴⁾)、高温予圧密した粘土は、凝集作用によってペッドが形成され、構造的にはランダム構造に近いと考えられる。室温予圧密した粘土は、ランダム構造ではなく、ある程度の配向性をもち、その後の圧密過程において配向性が一層増すと考えられている。これらの構造の違いの原因には、土粒子と水系の化学反応や物理化学的作用が影響していることが指摘されている(小泉ら(1995)⁵⁾)。すなわち、高温になると電気伝導度と陽イオン濃度が高くなることより、以下のような温度効果が考えられる。

- ① 凝集作用がすすむ → ペッドになりやすい
- ② 粘性係数の低下 → 圧密時間の短縮
- ③ 陽イオン濃度増加 → 形成された構造の保持

これらの原因により、高温予圧密粘土と室温予圧密粘土で構造の違いが生じたのではないかと考えられている。

2. 2 年代効果

自然地盤は非常に長い年月をかけて形成されているため、化学的結合作用や二次圧密などの年代効果が発生を受けている。この年代効果を最初に指摘したのは Bjerrum(1967)⁶⁾で、Bjerrum は、図-2.2.1 に示すように “Instant Compression (即時圧密)” と “Delayed Compression (遅延圧密)” を用いて圧密現象を説明しようとした。一様な応力が瞬時に加えられると仮定し、間隙水の流出に遅れがなく、応力が加わると同時にその応力のすべてが有効応力として粘土骨格に作用する時の圧縮を Instant Compression と呼び、それ以降に生じる圧縮を Delayed Compression と呼んだ (鎖線)。

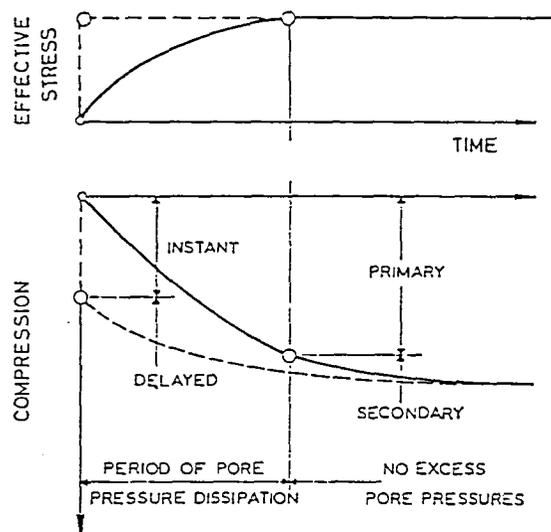


図-2.2.1 Bjerrum の Instant Compression と Delayed Compression

すなわち、圧密時間が長時間になればなるほど、有効応力一定のまま間隙比が減少していく。結局、図-2.2.2 にある点 A の粘土の圧密時間が長時間になるほど、有効応力一定のまま間隙比が減少していき (Delayed Compression)、約 3000 年後には点 B に移動する。約 3000 年後の粘土 (点 B) で圧密試験を行うと、B~C の圧密曲線が得られる。B~C の圧密曲線のように、正規圧密粘土であるにもかかわらず圧密降伏応力が存在し、あたかも過圧密粘土であるかのような状態は、疑似過圧密と呼ばれている。また、1 年後の粘土 (点 A) で圧密試験を

行くと、A~D の圧密曲線が得られ、圧密降伏応力 p_c に関しては、差が見られないように思われる。

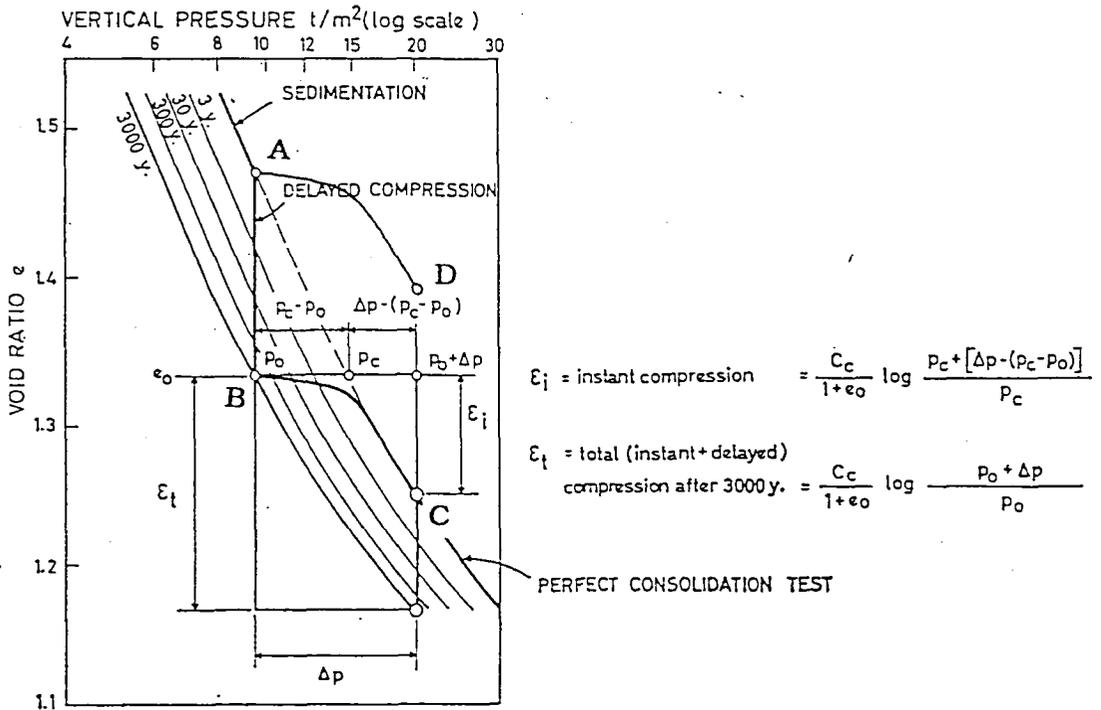


図-2.2.2 Bjerrum の $e \sim \log p$ 関係の概念図

しかし、年代効果のある堆積年代の古い粘土 (Aged 粘土) は、圧密試験において図-2.2.3⁷⁾ に示すように、正規圧密領域において下に凸な曲線になり、年代効果のない堆積年代の若い再圧密粘土 (Young 粘土) は、常に上に凸な曲線になる。

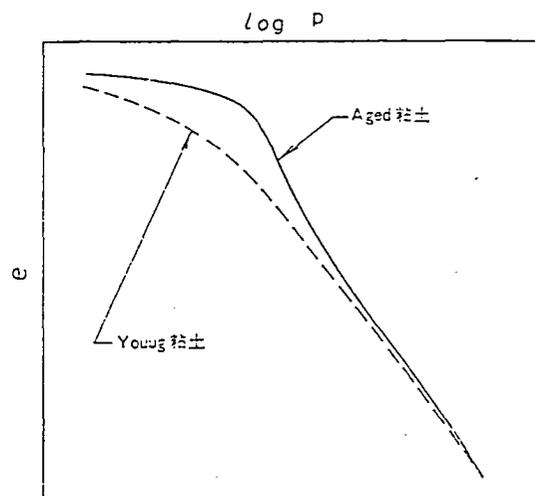


図-2.2.3 Aged 粘土と Young 粘土の圧密曲線

自然粘土と練り返し粘土圧密試験を行い (Mesri ら(1977)⁸⁾)、圧縮指数 C_c 、二次圧縮指数 C_a と圧密圧力の関係を表したものが図-2.2.4 である。不攪乱粘土の場合、圧密降伏応力付近で C_c と C_a が明瞭なピークを示し、その後、減少している。それに対し、練り返された粘土は、 C_c と C_a がほぼ一定で、不攪乱粘土の圧縮特性とは異なっていることが分かる。

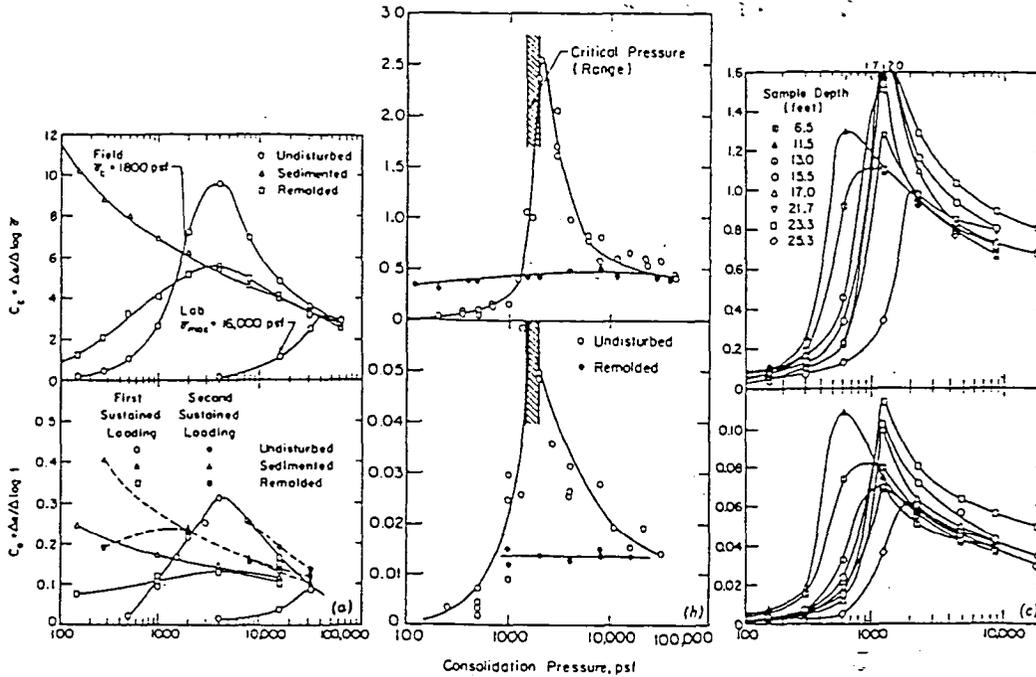


図-2.2.4 圧縮指数 C_c 、二次圧縮指数 C_a と圧密応力の関係

次に、土田ら (1989)⁹⁾ は、年代効果の評価のために、その度合いを示す新たなパラメータ r_c (圧縮指数比) を提案した。

$$r_c = C_{c \max} / C_c^*$$

$C_{c \max}$: $e \sim \log p$ 曲線における最大値 C_c 。

C_c^* : C_c が最大値を示す圧密応力の 5 倍の圧密応力での C_c 。

r_c は、正規圧密領域における圧縮性の変化の大きさを示す指標であり、

$$r_c = 1.2 \sim 3.0 \quad (\text{自然粘土})$$

$$r_c = 1.0 \sim 1.2 \quad (\text{再圧密粘土})$$

となることが示された。

2. 3 高温再圧密方法

自然地盤の挙動を把握するためには、不攪乱自然粘土を用いて様々な土質試験を行う必要があるが、自然粘土試料では試料のばらつきが大きく、さらに試験に使用できる試料の量にも限界があるため、十分な精度で再現性のある試験を行うことができない。そこで、通常は、現場から採取した多量の試料を均一な試料となるように、室内で粒度や含水比等の調整を行い、スラリーから再圧密して試験に用いている。しかし、室内で作成した通常の攪乱再圧密粘土試料は短期間で作成するため、年代効果を受けない。そのため、自然粘土試料と力学特性が大きく異なる。そこで、攪乱再圧密粘土で年代効果を再現するための方法が提案された。

①セメント系混和剤の利用：嘉門ら（1986）¹⁰⁾

化学的添加物質（セメント）を使用して、セメンテーション効果を再現する方法。この方法は、添加物質を加えているので、粘土の構造が本質的に変化してしまう。

②高温再圧密方法（スラリー状態から高温圧密）：土田ら（1989）⁹⁾

粘土をスラリー状態から高温（70~75℃）で再圧密する方法。高温状態では、化学的作用が促進され、より高位な粒子構造が形成される。

図-2.3.1 は、高温（70℃）で作成した高温圧密試料と室温（20℃）で再圧密した室温圧密試料、および不攪乱試料の標準圧密試験結果である。高温圧密試料には、年代効果を有する不攪乱粘土と同じように圧密降伏応力付近で突き出しがあるのに対し、室温圧密試料にはそれがない事が分かる

図-2.3.2 は、同じく3種類の試料を比較した一軸圧縮試験結果である。図より明らかに高温圧密試料の応力ひずみ曲線は、不攪乱試料の応力ひずみ曲線に類似している。以上の結果より、高温再圧密方法により不攪乱粘土の力学特性をある程度、再現できると考えられる。

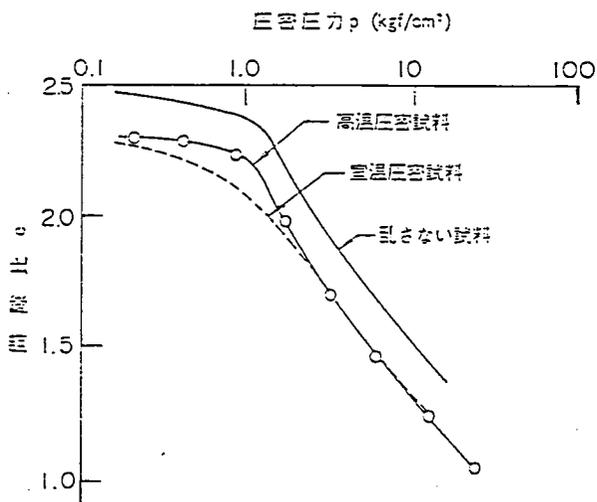


図-2.3.1 標準圧密試験における
e ~ log p 曲線の比較

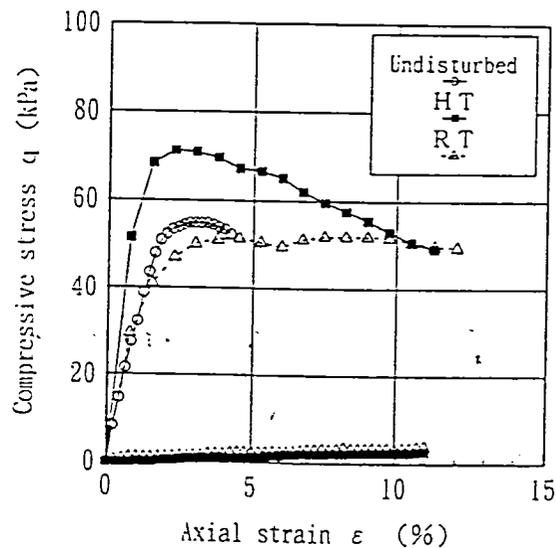


図-2.3.2 一軸圧縮試験における
応力～ひずみ曲線の比較

③高温再圧密方法（二次圧密中に高温養生）：森脇ら（1993）¹¹⁾

室温で再圧密した後、二次圧密中に高温で養生する方法。この方法では、再圧密の最終段階である養生温度と養生期間のみを変えればよいので、比較的容易に試料を作成できる。

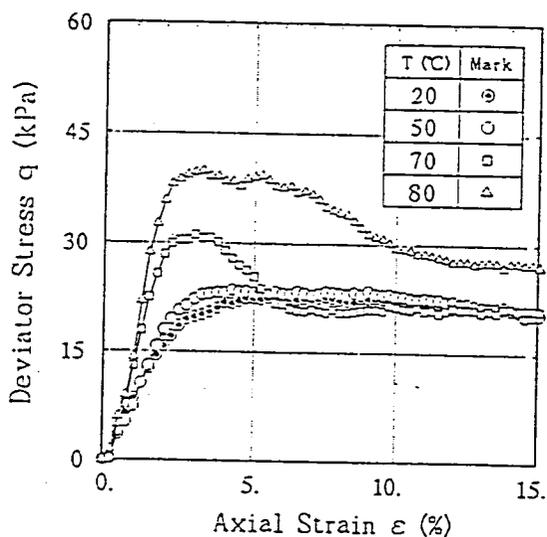


図-2.3.3 一軸圧縮試験の応力～ひずみ曲線に及ぼす養生温度の影響

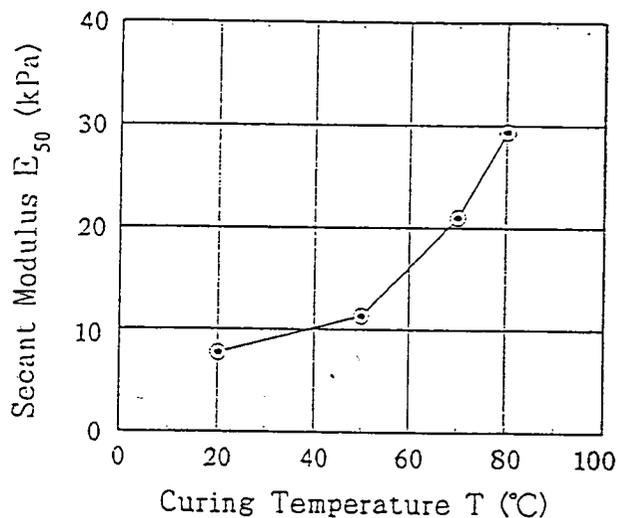


図-2.3.4 一軸圧縮試験の変形係数に及ぼす養生温度の影響

図-2.3.3より、温度が高くなるほど一軸圧縮強度に明瞭なピークが表れており、強度も高温になるほど増加する。また、図-2.3.4より、変形係数も温度とともに増加する。変形係数が大きいということは、試料に乱れが少ないことを表す。つまり、高温になる程、不攪乱粘土に近づいていることが分かる。

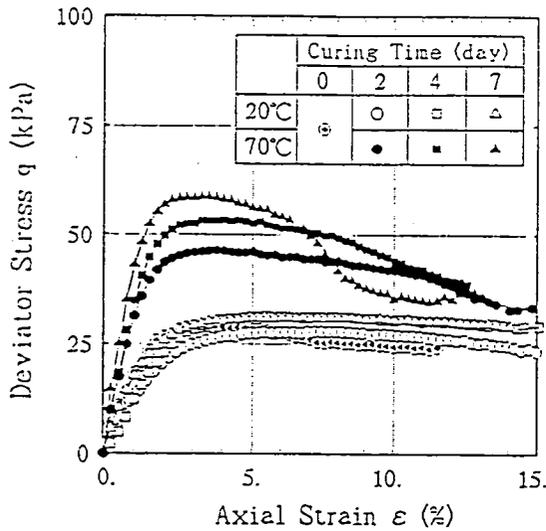


図-2.3.5 一軸圧縮試験の
応力～ひずみ曲線に及ぼす
養生期間の影響

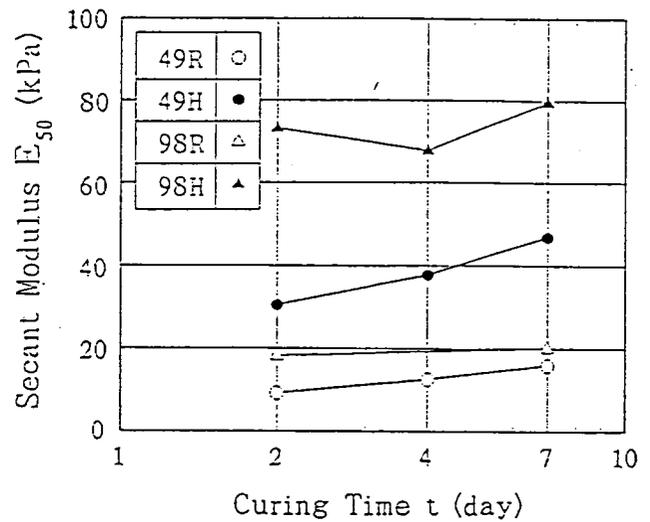


図-2.3.6 一軸圧縮試験の
変形係数に及ぼす
養生期間の影響

図-2.3.5より、室温養生試料の強度は養生期間にあまり影響しないが、高温養生試料の強度は養生期間が長いほど大きくなる。また、図-2.3.6より、変形係数は養生期間の増大とともに増加しており、(ただし、養生期間2日間の98Hを除く。)その増加割合は、高温養生試料の方が大きいことが分かる。

つまり、養生温度が高く、養生期間が長いほど、年代効果がよりよく再現されるのである。

2. 4 微視的構造から見た年代効果の再現性

これまで、高温再圧密粘土の力学特性が、年代効果を有する自然堆積粘土と類似していることは明らかにされてきた。しかし、粘土の巨視的挙動だけでなく、その原因となる粘土粒子の微視的構造までもが、類似していることを明らかにすることが必要である。

その方法として、走査型電子顕微鏡を用いて、粘土の水平断面と鉛直断面の粒子構造を撮影し、撮影した写真をスキャナーを用いてコンピューターに取り込み、粒子画像の画像解析を行う方法が考案された（重山（1996）¹²⁾）。この画像解析では、水平断面と鉛直断面の写真の濃度を、X方向とY方向に256段階の濃淡に分けて計測し、その濃度分布の形状により粘土粒子およびベッドの構造を評価する。

表-2.4.1 粘土の粒子構造のモデル

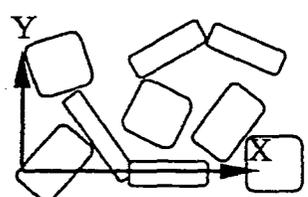
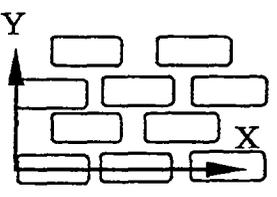
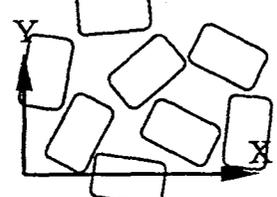
	不攪乱粘土	室温再圧密粘土	
粒子構造	ランダム構造	配向構造	
断面	鉛直、水平	鉛直	水平
モデル			

表-2.4.1 のように、不攪乱粘土はランダム構造に近い構造になっているので、水平と鉛直断面および、X方向とY方向の違いはあまりない。それに対し、室温再圧密粘土は配向構造に近い構造になっているので、鉛直断面のY方向は濃度の移り変わりが細くなり、鉛直断面のX方向は濃度の移り変わりが大きくなる。水平断面では両方向とも濃度の移り変わりが大きくなると考えられる。

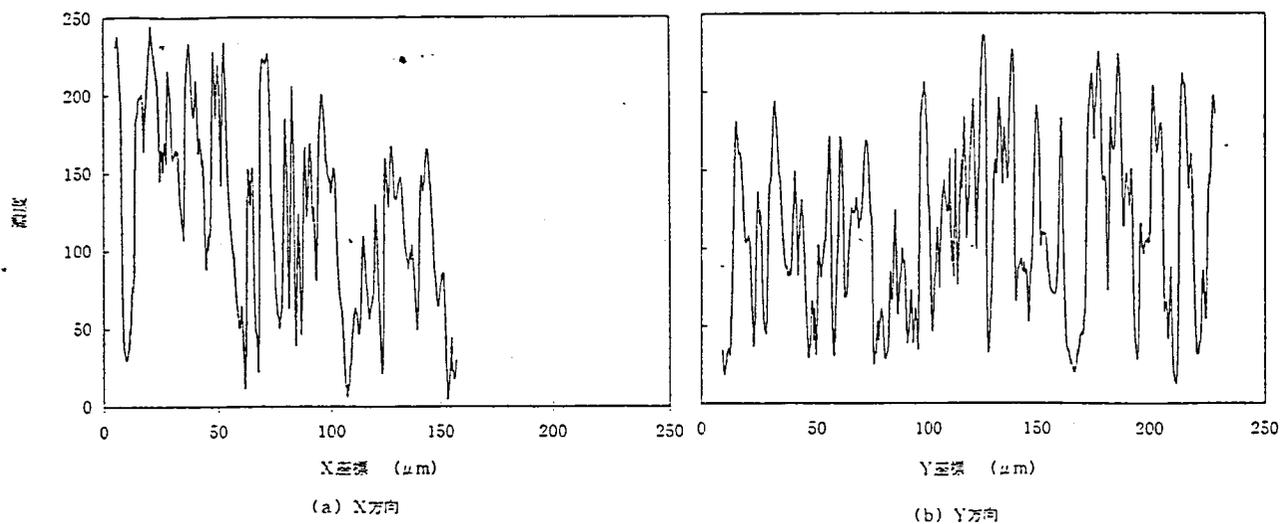


図-2.4.1 室温再圧密粘土の鉛直断面の濃度分布

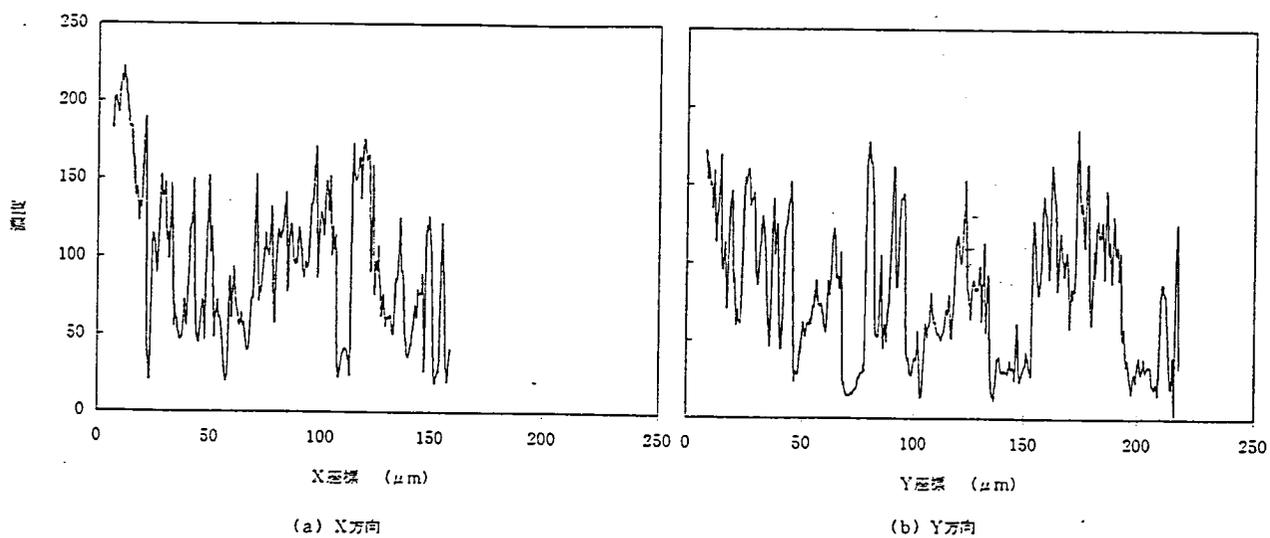


図-2.4.2 室温再圧密粘土の水平断面の濃度分布

図-2.4.1、図-2.4.2より、室温再圧密粘土では、水平断面のX方向とY方向による違いは特に見受けられないが、鉛直断面のY方向の方が、山の間隔が密になっている。これは、粘土粒子が配向性を持っているためと思われる。

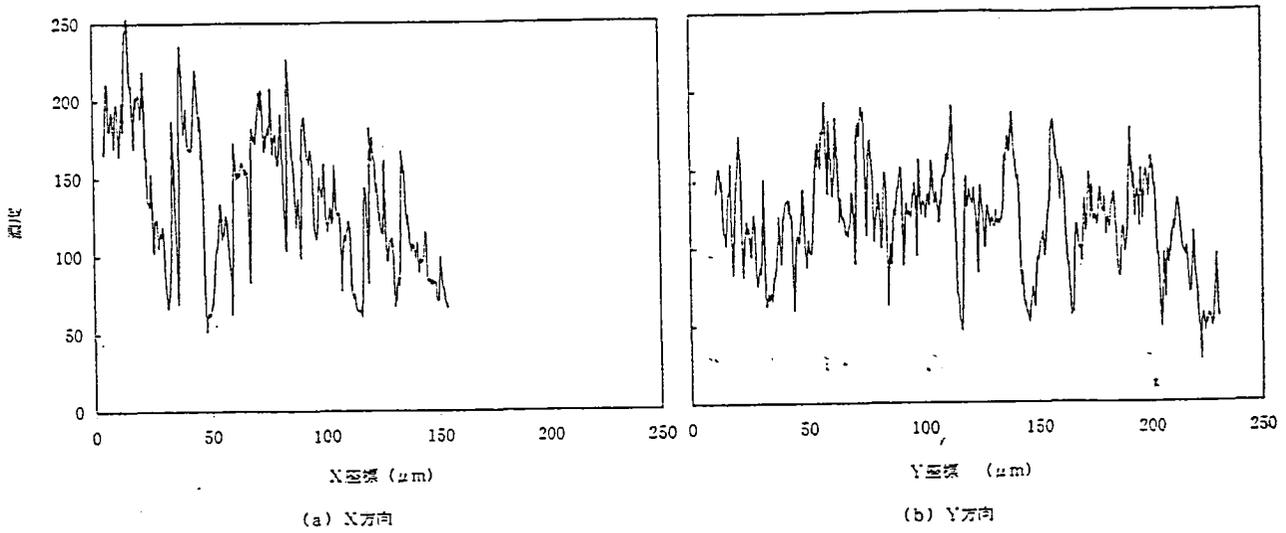


図-2.4.3 高温再圧密粘土の鉛直断面の濃度分布

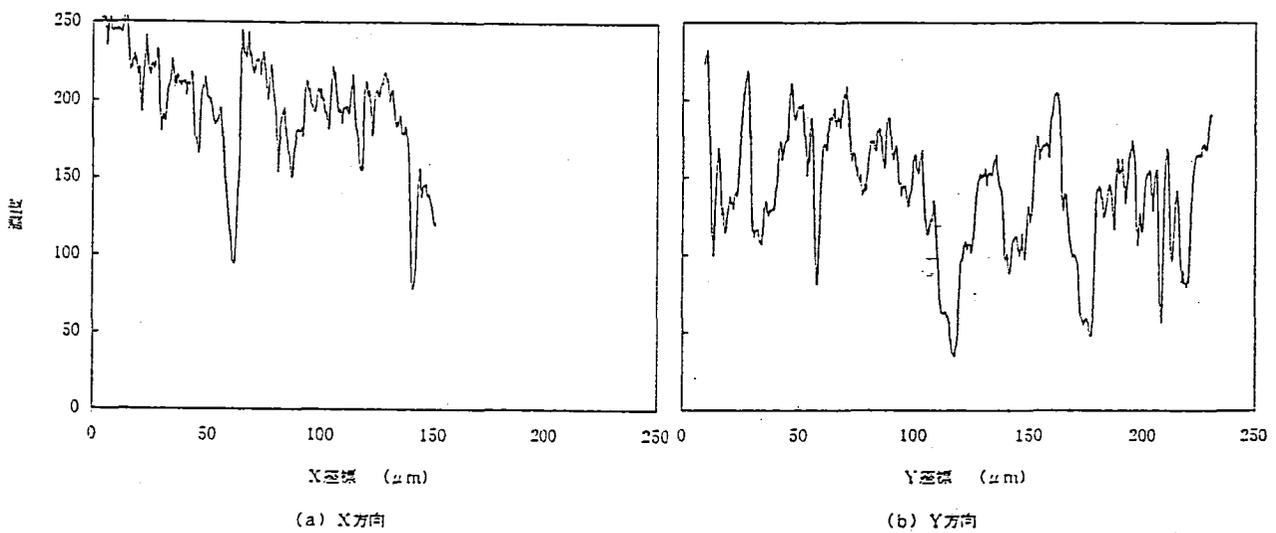


図-2.4.4 高温再圧密粘土の水平断面の濃度分布

図-2.4.3、図-2.4.4より、高温再圧密粘土では、室温試料の鉛直断面に見られたような、X方向とY方向による違いはないが、水平断面と鉛直断面の間にはかなりの違いが見られる。

しかし、これらの考察は、濃度分布の単純な比較にすぎず、粘土構造の違いを定量的に示すまでには至っていない。

第3章 解析方法

3.1 概要

非常に粒径の小さな粘土粒子の撮影を行うため、高倍率の画像が得られる走査型電子顕微鏡を使用する。まず、試料を水平および鉛直方向に、注意深く手で分割する。分割断面から微量の試料を、乱さないように試料台にのせる。そして、試料の表面に極薄く金属（白金パラジウム;PtPd）を真空蒸着させ、走査型電子顕微鏡で粘土粒子の水平および鉛直断面の撮影を行う。撮影した写真をスキャナーを用いてコンピューターに取り込む。画像解析ソフト（MacSCOPE.Ver.2.17（三谷商事(株)製））で、水平および鉛直断面の顕微鏡写真上に、直交する X 方向と Y 方向の線を数本引き、その直線上の濃度を計測する。その濃度分布を波とみなしてスペクトル解析を行い、卓越する波長から粒子構造の違いを明らかにする。

3.2 解析装置

1) イオンスパッター装置（(株)日立製作所 E-1030）

導電性の無い試料を走査型電子顕微鏡で観察するとき、試料表面の帯電による像障害を防止する目的で、金属（白金パラジウム;PtPd）を真空蒸着するのに使用する。

試料を注意深く分割した後、極微量の試料を試料台にのせ、イオンスパッター装置にセッティングし、真空状態にする。その後、300秒間白金パラジウム（PtPd）を蒸着させる。

2) 走査型電子顕微鏡 (徧日立製作所 S-4100)

連続 X 線電子線を試料に照射すると、試料より二次電子、反射電子、X 線等が発生する。走査型電子顕微鏡は、主に二次電子を映像信号として用い、試料の拡大像を得る装置である。電子銃から放出された一次電子を電子レンズで細く絞り試料に照射し、試料表面上を二次元的に走査する。試料から発生した二次電子を検出、増幅し、ブラウン管に輝度変調信号として入力しする。ブラウン管の走査は、一次電子線の走査と同期しているため、ブラウン管上に試料の拡大像が表示される。倍率は、ブラウン管と試料上での一次電子線の走査幅の比になる。

この走査型電子顕微鏡の性能を以下に示す。

- ・二次電子分解能 : 1.5 nm (15 Å)
- ・倍率 : 20 ~ 300000 倍
- ・一次電子線加速電圧 : 0.5 ~ 30 kV
- ・試料移動範囲 X : 0 ~ 25 mm
Y : 0 ~ 25 mm
Z : 5 ~ 35 mm
傾斜 : -5 ~ +45°
回転 : 360°

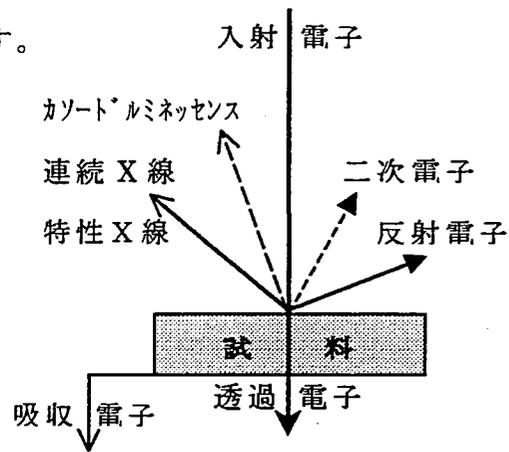


図-3.2.1 電子と物質の相互作用

イオン Sputter 装置で金属を真空蒸着させたことにより、導電性を持った試料を走査型電子顕微鏡で観察する。ブラウン管上に試料の拡大像が表示され、その画像を写真撮影する。この時、図-3.2.2 のように、水平断面においては特定の方向を意味していないが、鉛直断面においては写真の鉛直方向が、粘土の堆積方向とおなじになるようにする。

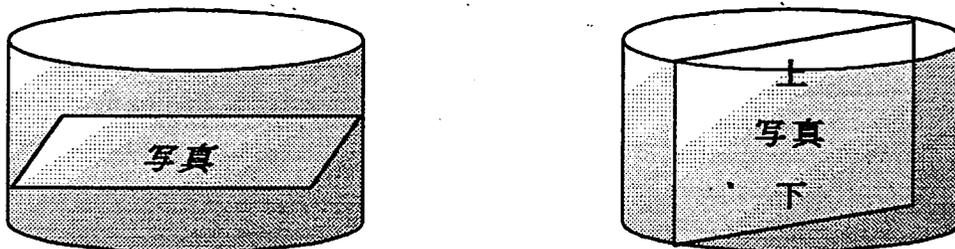


図-3.2.2 水平断面と鉛直断面の写真の方向

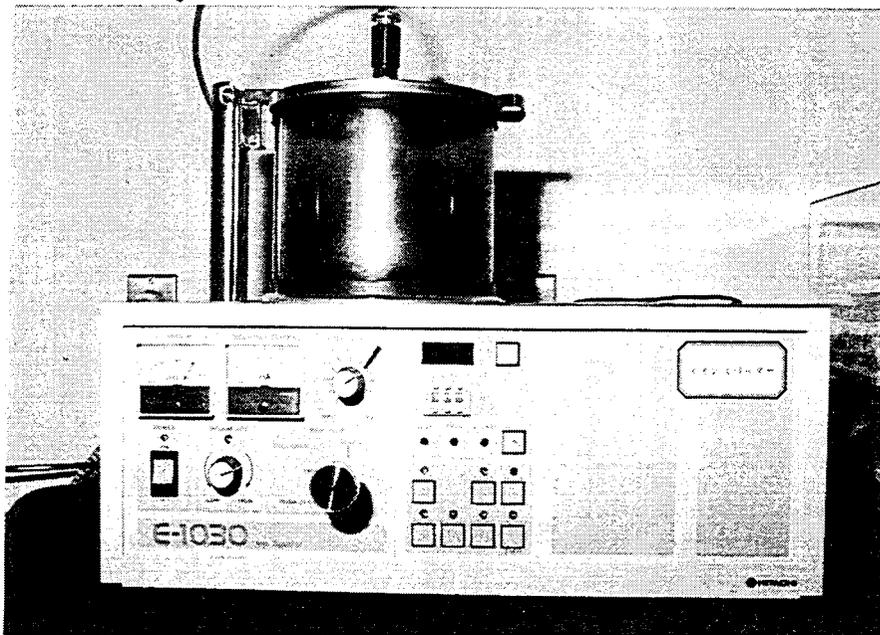


写真-3.2.1 イオンスパッター装置

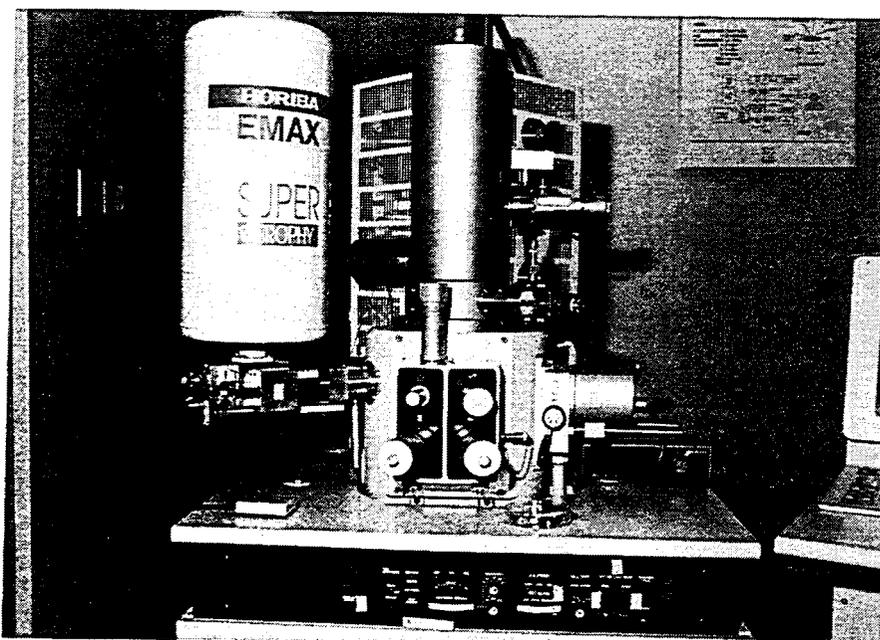


写真-3.2.2 走査型電子顕微鏡

3.3 解析方法

1) 濃度解析

画像解析ソフト (MacSCOPE.Ver.2.17 (三谷商事(株)製)) を使用して解析を行った。供試体の水平および鉛直断面を撮影した顕微鏡写真に、直交する X 方向と Y 方向の線を数本引き、その直線上の濃度を計測した。濃度は黒から白を 0 ~ 255 までの 256 段階に分割して表示され、測定する直線上の 1pixel ごとの値が計測される。1pixel とは、画像情報の最小単位で、この解析における画像解像度は 150dpi である。また、図-3.3.1 のように、水平断面においては X 方向と Y 方向は特定の方向を意味していないが、鉛直断面においては X 方向を水平方向に、Y 方向を鉛直方向となるように決めてある。

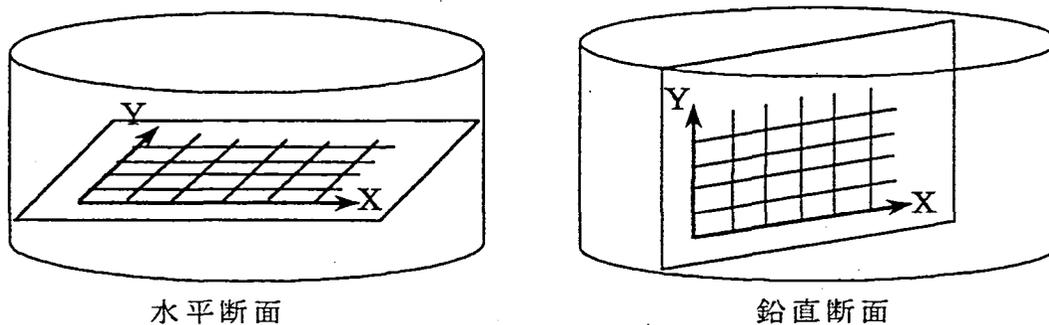


図-3.3.1 顕微鏡写真の濃度解析方向

2) スペクトル解析¹³⁾

一般に地震動の解析に使用されているパワースペクトル解析を行う。まず始めに、パワースペクトルについての説明をする。たくさんの波が集まってできた地震波の関数の標本値 x_m の 2 乗和の平均

$$\frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} x_m^2 \quad (1)$$

は、平均パワーと呼ばれている。この式(1)の x_m のところに、 x_m を有限フーリエ級数で表した、

$$x_m = \frac{A_0}{2} + \sum_{k=1}^{N/2-1} \left[A_k \cos \frac{2\pi km}{N} + B_k \sin \frac{2\pi km}{N} \right] + \frac{A_{N/2}}{2} \cos \frac{2\pi(N/2)m}{N} \quad (2)$$

を代入する。この式(2)の右辺を便宜上 { } で表す。すると、

$$x_m^2 = \{ \} \cdot \{ \} \quad (3)$$

となる。式(3)は三角関数系の選点直交性より、0になる項があり、式(1)は、

$$\sum_{m=0}^{N-1} x_m^2 = N \left(\frac{A_0}{2} \right)^2 + \frac{N}{2} \sum_{k=1}^{N/2-1} (A_k^2 + B_k^2) + N \left(\frac{A_{N/2}}{2} \right)^2 \quad (4)$$

となる。さらに、各成分波の振幅 X_k を用いて、式(4)の右辺は、

$$\frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} x_m^2 = \frac{1}{2} \left(\frac{X_0^2}{2} + \sum_{k=1}^{N/2-1} X_k^2 + \frac{X_{N/2}^2}{2} \right) \quad (5)$$

と表される。この式(5)の関係を離散的な標本値についてのパーセヴァル(Parseval)の定理という。これは、波の平均パワーを、各成分波の寄与に分解したものである。これを、各成分波の振動数に対して図を描くと、平均パワーのうち、どの成分が卓越しているかが分かる。この図を、パワースペクトルと呼んでいる。

本研究では、濃度解析で得られた濃度分布曲線をたくさんの波の集まりとみなし、どのような振動成分の波から成り立っているのか、どのような成分の波が卓越しているのかをパワースペクトル解析により定量的に評価する。

まず、濃度分布の一次回帰直線が波の中心になるように波形変換を行う。そして、図-3.3.2にあるように、濃度分布曲線が黒から白そして黒になる部分が粒子の粒径にあたり、濃度分布曲線を粒径の2倍が波長となる波の集まりと見なす。そして、この波をスペクトル解析してパワースペクトル図を描く。この図を濃度スペクトルという。濃度スペクトルのX軸には波数を、Y軸には各振動数成分の振幅の2乗和であるパワースペクトルを表している。波数とは波長の逆数、つまり、粒径の2倍の逆数である。したがって、パワースペクトルの卓越する波数から逆算することにより、どれくらいの大さきの粒径が卓越しているのかが分かる。

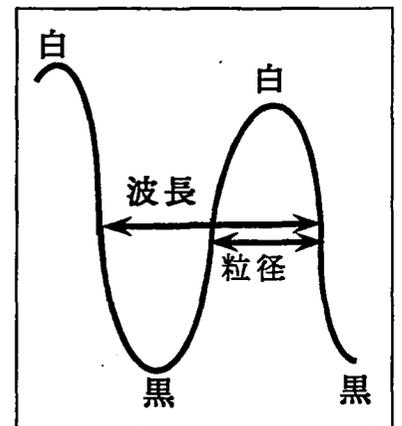


図-3.3.2

波長と粒径の関係

3. 4 解析精度

スペクトル解析の精度を確かめるために、10mm 間隔の白黒の縞模様（図-3.4.1）を作り、解析を行った。図-3.4.2 は、縞模様に対して垂直に直線を引き、その直線上の濃度分布を計測したものである。座標軸 10mm 毎に白と黒の濃度が交互に表れている。それを、スペクトル解析したものが図-3.4.3 である。波数が 0.05 で明らかなピークがある。波数とは周期の逆数、つまり、粒径の 2 倍の逆数であるので、波数は $0.05 = \frac{1}{20} = \frac{1}{2 \times 10}$ となり、10mm 毎の白黒模様であることが確認される。

次に、直径 10mm の円をランダムにいくつか描き（図-3.4.4）、数本の直線を引き、その直線上の濃度分布を計測した。図-3.4.5 は、各濃度分布をそれぞれスペクトル解析したものであり、波数が 0.05 から 0.07 の間にパワースペクトルのピークが表れている。波数は $0.05 = \frac{1}{20} = \frac{1}{2 \times 10}$ 、 $0.07 = \frac{1}{14.28} = \frac{1}{2 \times 7.14}$ となり、この結果は直径 7.14~10mm の円が卓越していることを示している。濃度計測を行った直線は、必ずしも円の中心を通過していないことを考慮すると、この結果は妥当なものであると考えられる。

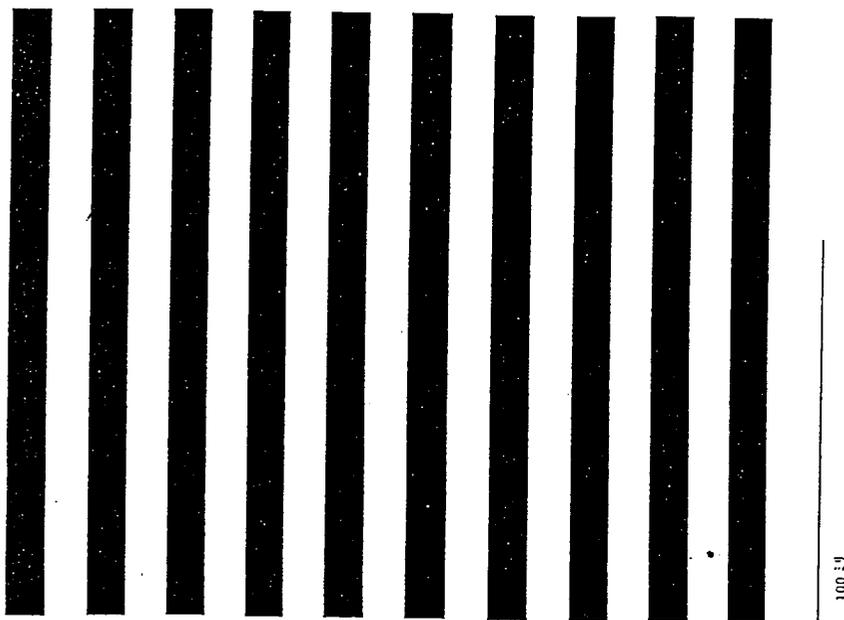


図-3.4.1 10mm 間隔の白黒の縞模様

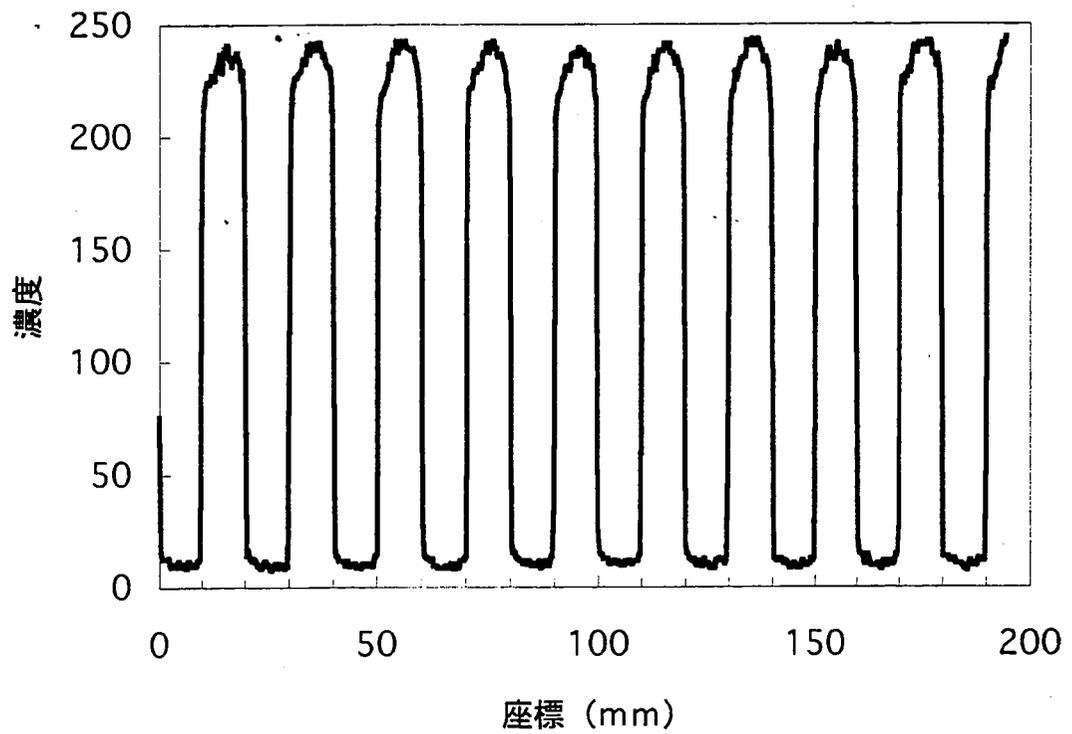


図-3.4.2 10mm間隔の縞模様の濃度分布

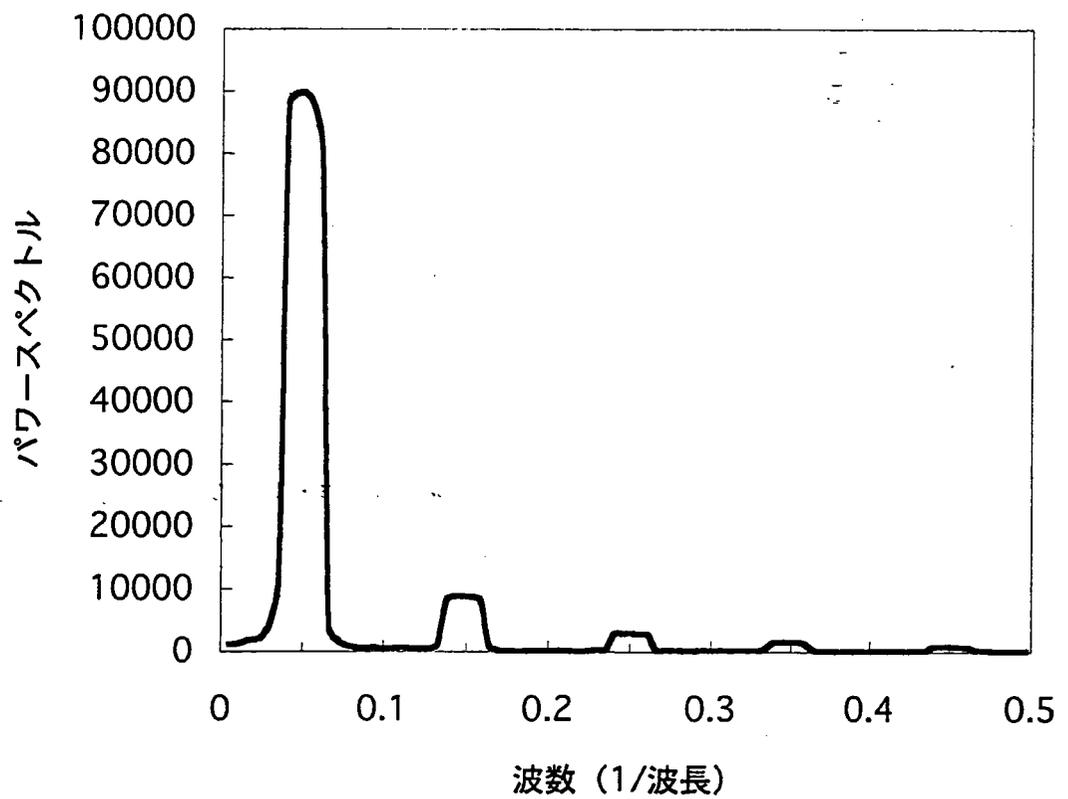


図-3.4.3 10mm間隔の縞模様の濃度スペクトル

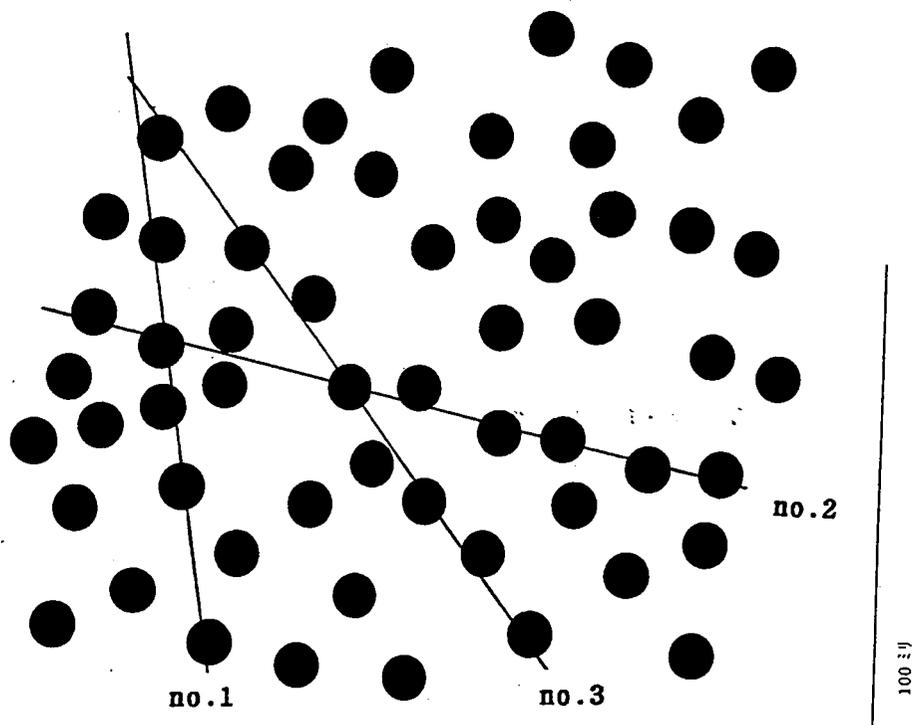


図-3.4.4 直径 10mm の円

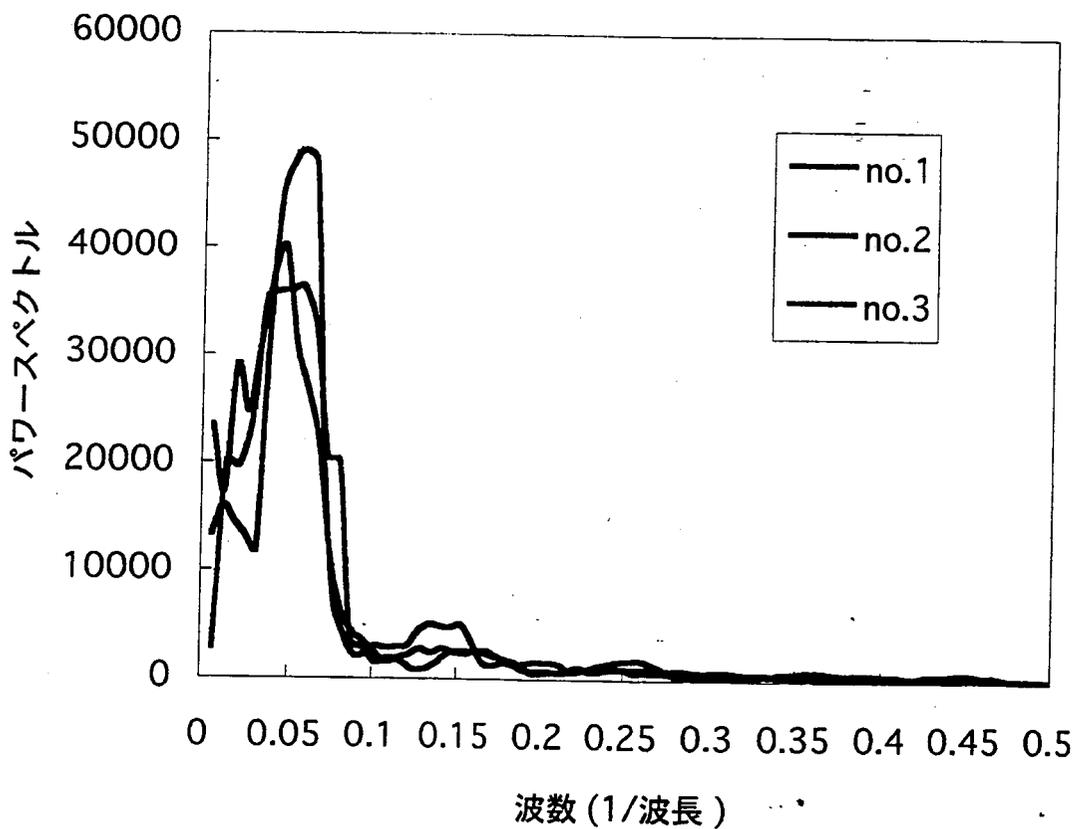


図-3.4.5 直径 10mm の円の濃度スペクトル

第4章 解析結果と実験結果および考察

4.1 試料および再圧密方法

試料は、山口県柳井上関線単独道路改良工事に伴う地質調査で採取した通称「柳井粘土」を使用した。採取深度は G.L. 9.40~9.80m である。物理特性は表-4.1.1 に示す。

表-4.1.1 柳井粘土の物理特性

液性限界 W_L	塑性限界 W_P	塑性指数 I_P	土粒子の比重 G_s
53.8 (%)	26.4 (%)	27.4 (%)	2.593

上記の柳井粘土から①不攪乱試料②攪乱高温養生試料③攪乱室温養生試料の3種類の試料を作成し、実験および解析を行った。シンウォールチューブ（直径 8 cm、長さ 1m）により採取してきた粘土を、できるだけ乱さないように取り出したものを不攪乱試料として使用した。そして、この粘土を練り返して、再圧密したものを攪乱試料とした。再圧密の方法は、採取した粘土を液性限界の約 2 倍の含水比（ $W=110\%$ ）になるように、ミキサーで十分攪拌し、スラリー状にする。その後、通常は約 6 時間攪拌しながら真空脱気を行うが、本試料においては、試料が少量のため真空脱気槽を使用できなかった。よって、攪拌後すぐに再圧密セルに投入し、両面排水条件で一次的に再圧密した。再圧密セルは、直径 14.4 cm、高さ 20 cm のステンレス製で、復動式ベロフラムシリンダーによって鉛直圧密圧力を載荷できるようにしてある。再圧密は、まず 24 時間室温で自重圧密させた後、 $0.1 \rightarrow 0.25 \rightarrow 0.5 \rightarrow 1.0 \text{ kgf/cm}^2$ の鉛直圧密圧力で段階的に圧密した。各段階の圧力は、不攪乱試料の圧密降伏応力と、最終段階の圧力（ 1.0 kgf/cm^2 ）が等しくなるようにした。各段階の圧密終了の打ち切り時期は、沈下量を測定し、3 t 法を適用して一時圧密の終了を決定した。そして、再圧密セルを 20°C および 70°C の恒温水槽に入れて、4 日間養生させた。 20°C で養生したものを室温養生試料とし、 70°C で養生したものを高温養生試料とした。

4. 2 力学試験結果

1) 標準圧密試験

図-4.2.1 は、不攪乱 (U) 試料と、高温 (H) 養生試料および室温 (R) 養生試料の標準圧密試験で得られた $e \sim \log p$ 曲線を比較したものである。なお、不攪乱試料と高温養生試料はそれぞれ 3 個の標準圧密試験を行い、室温養生試料は試料の残量が少なかったため 2 個の標準圧密試験を行ったが、図-4.2.1 には、そのうちの典型的なものを示した。不攪乱試料および高温養生試料は、それぞれの圧密降伏応力付近での飛び出し現象が見られる。

表-4.2.1 に、圧密降伏応力 p_c と圧縮指数比 r_c を示す。室温養生試料の圧密降伏応力は再圧密応力 (1.0 kgf/cm^2) とほぼ等しいのに対し、高温養生試料の圧密降伏応力 (2.0 kgf/cm^2) は再圧密応力より約 2 倍も大きくなっている。また、年代効果の度合いを示すパラメータである圧縮指数比 r_c を計算すると、一般に自然粘土は $r_c = 1.2 \sim 3.0$ になると言われているが、その範囲内に不攪乱試料および高温養生試料は入っている。室温養生試料の圧縮指数比は、 C_c が最大値を示す圧密圧力の 5 倍の圧密圧力が、標準圧密試験の圧密圧力の範囲を越えてしまったため、計算できなかった。

表-4.2.1 圧密降伏応力 p_c と圧縮指数比 r_c

	不攪乱試料	高温養生試料	室温養生試料
圧密降伏応力 $p_c(\text{kgf/cm}^2)$	0.96	2.0	1.1
圧縮指数比 r_c	1.83	1.70	——

図-4.2.2 は、圧密圧力の増加に伴う $e \sim \log p$ 曲線の傾き (C_c) の変化を表したものである。不攪乱試料および高温養生試料には明瞭なピークがあるのに対し、室温養生試料にはそのピークが見られない。

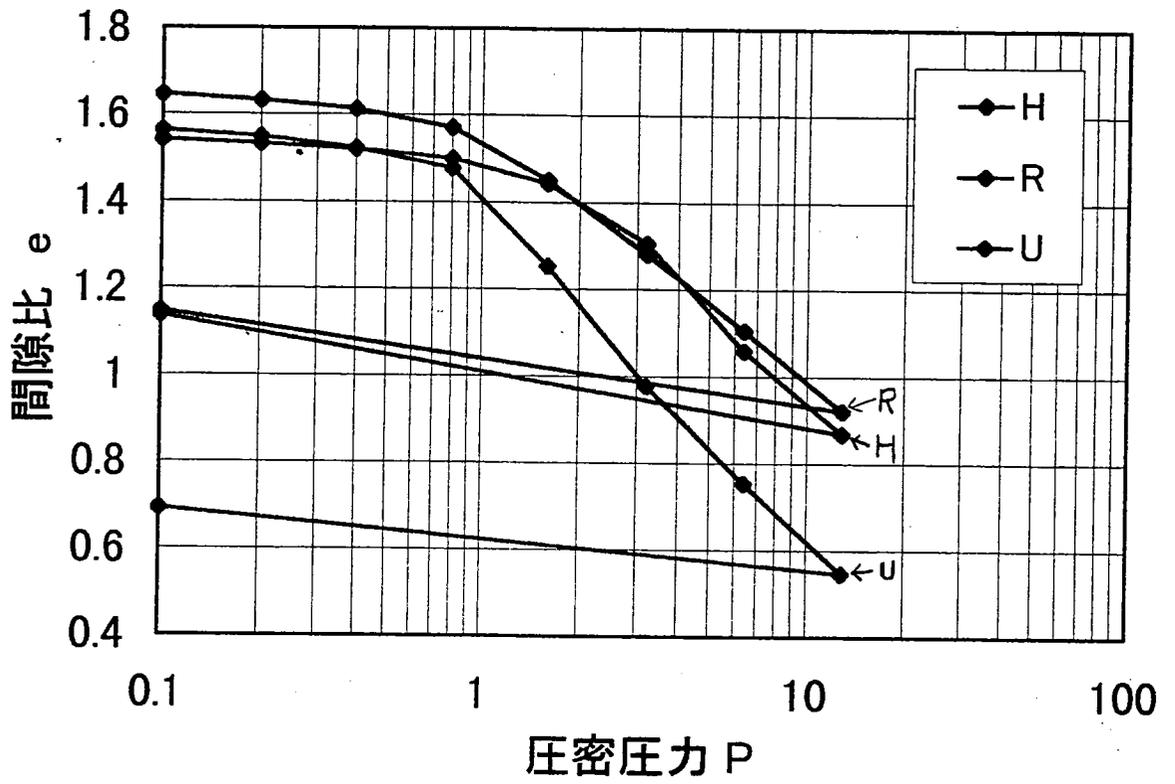


図-4.2.1 標準圧密試験の $e \sim \log p$ 曲線の比較

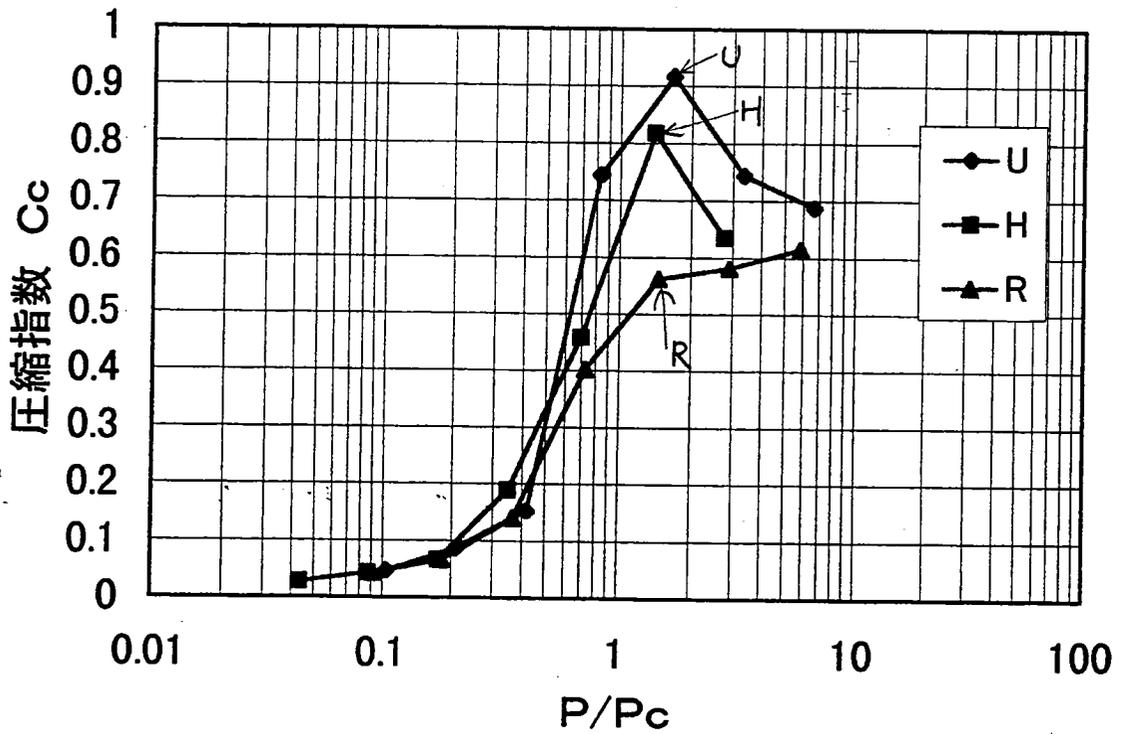


図-4.2.2 標準圧密試験の圧縮指数 C_c の関係

2) 一軸圧縮試験

一軸圧縮試験で得られた不攪乱試料および高温養生試料、室温養生試料の応力～ひずみ曲線を図-4.2.3 に示す。不攪乱試料および高温養生試料は 6 cm の供試体で 4 個の一軸圧縮試験を行い、室温養生試料は試料の残量が少なかったため、4 cm の供試体で 3 個の一軸圧縮試験を行った。図-4.2.3 には、それぞれの試料の中で変形係数 E_{50} が一番大きく、乱れが少ないと考えられるものを示した。

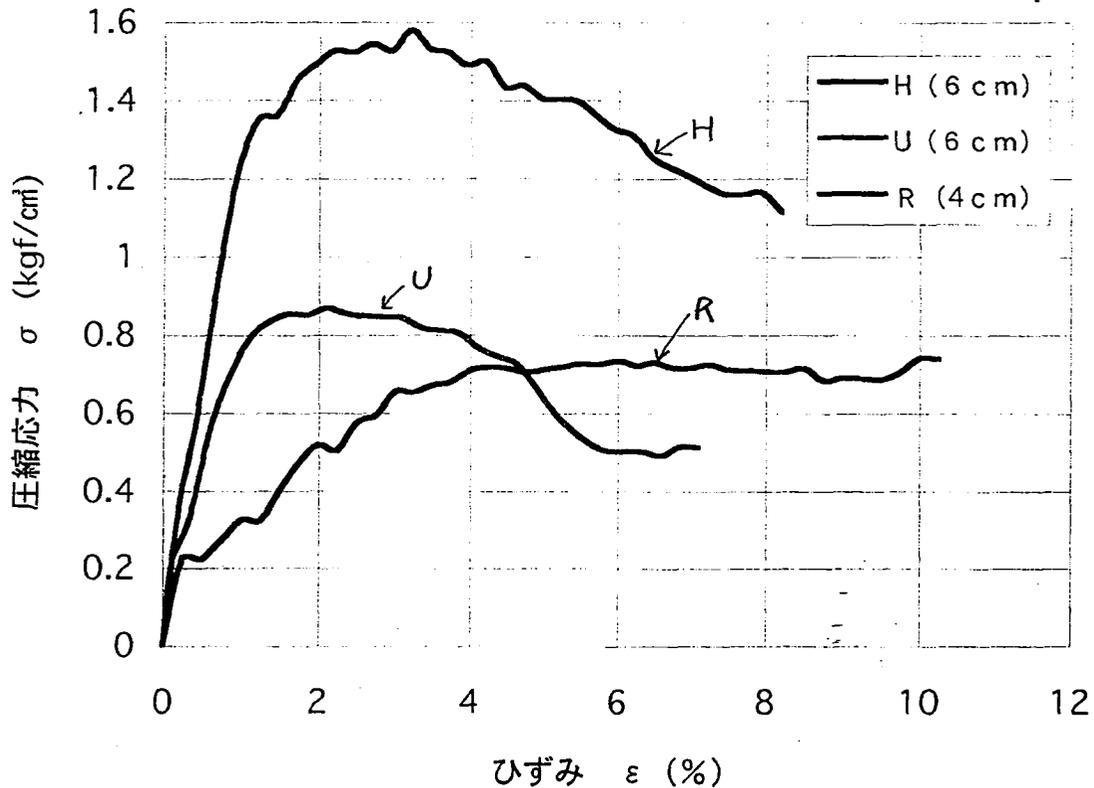


図-4.2.3 一軸圧縮試験における応力～ひずみ曲線

表-4.2.1 一軸圧縮試験結果

	不攪乱試料	高温養生試料	室温養生試料
一軸圧縮強度 q_u (kgf/cm ²)	0.86	1.58	0.70
破壊ひずみ ϵ_f (%)	2.1	3.2	4.8
変形係数 E_{50} (%)	95.55	136.2	70.0

表-4.2.1 に、一軸圧縮試験の結果をまとめている。一軸圧縮強度は、不攪乱試料と室温養生試料は近い値であるが、高温養生試料はその約 2 倍の一軸圧縮強度になっている。また、室温養生試料では明瞭な破壊ひずみが現れず、ひずみが約 5%以上で圧縮応力がほぼ一定になっているが、高温養生試料と不攪乱試料ではひずみが 2~3%で圧縮応力がピークに達し、その後、大幅な強度低下が生じている。変形係数は、乱れの度合いを示すもので、年代効果によって増加し、乱れを受けると低下すると考えられる。高温養生試料の変形係数は、室温養生試料の変形係数より大きく、不攪乱試料と同等以上になっており、高温養生試料の粒子構造は高温養生することによって、剛な構造になったと考えられる。

4. 3 解析結果

解析には、それぞれの粘土試料写真の倍率 500 倍のものを用いた。写真-4.3.2～写真-4.3.7 に、不攪乱試料、高温養生試料および室温養生試料の、水平断面および鉛直断面の電子顕微鏡写真を示し、各断面の X 方向および Y 方向のスペクトル解析の結果を図-4.3.1～図-4.3.12 に示す。全体の顕微鏡写真から、不攪乱試料は粒子の一粒ずつの形がはっきりとしているのに対し、練り返してある高温養生試料および室温養生試料は、粒子の表面の薄片がはがれ非常に細かい粒子がたくさん見られる。写真-4.3.1 に粘土粒子 1 個の写真を示す。これより、粘土粒子が薄片状であることがよく分かる。また、柳井粘土粒子の直径は約 $25\mu\text{m}$ 、厚さは約 $4\mu\text{m}$ である。

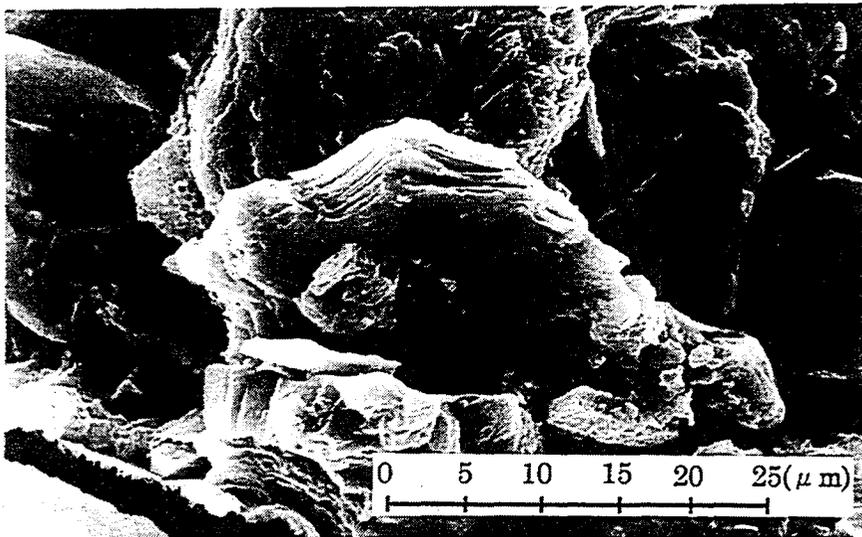


写真-4.3.1 粘土粒子の薄片状 (倍率 2000 倍)

顕微鏡写真の比較をすると、不攪乱試料の水平断面 (写真-4.3.2) と鉛直断面 (写真-4.3.3) に違いは見られないが、室温養生試料の水平断面 (写真-4.3.4) では円形板状の粒子の平坦面が撮影され、鉛直断面 (写真-4.3.5) では円形板状の粒子が平行に積み重なっている層状面が撮影されている。このことより、室温養生試料は配向構造に近い構造になっていることが分かる。高温養生試料 (写真-4.3.6、写真-4.3.7) には、室温養生試料のような配向性は見られず、不攪乱試料に近い構造になっているように思われる。この結果を定量的に表すため、顕微鏡写真の濃度解析およびスペクトル解析を行った。



写真-4.3.2 不攪乱粘土の鉛直断面

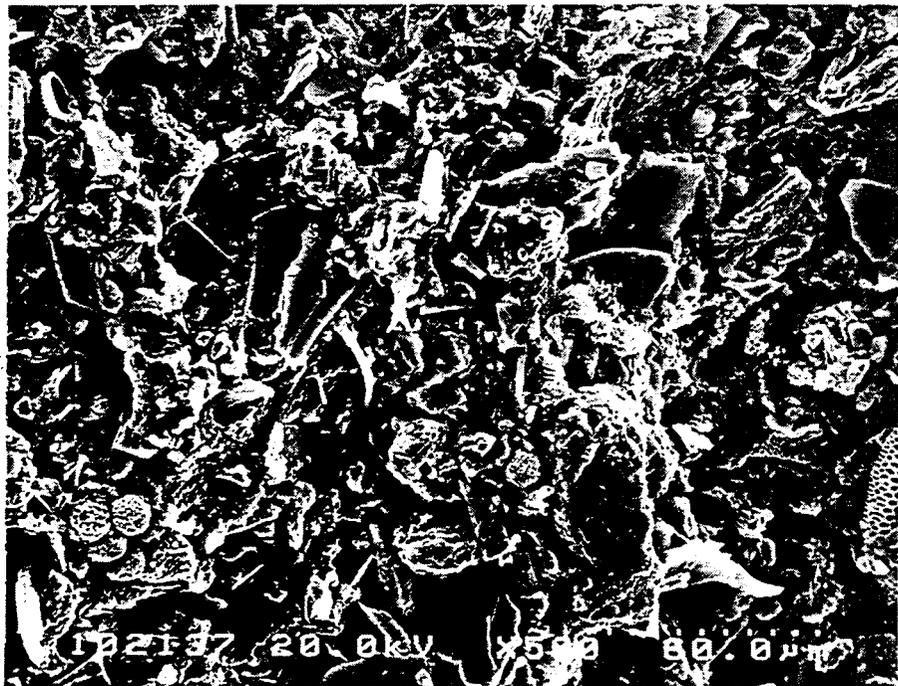


写真-4.3.3 不攪乱粘土の水平断面



写真-4.3.4 高温養生粘土の鉛直断面

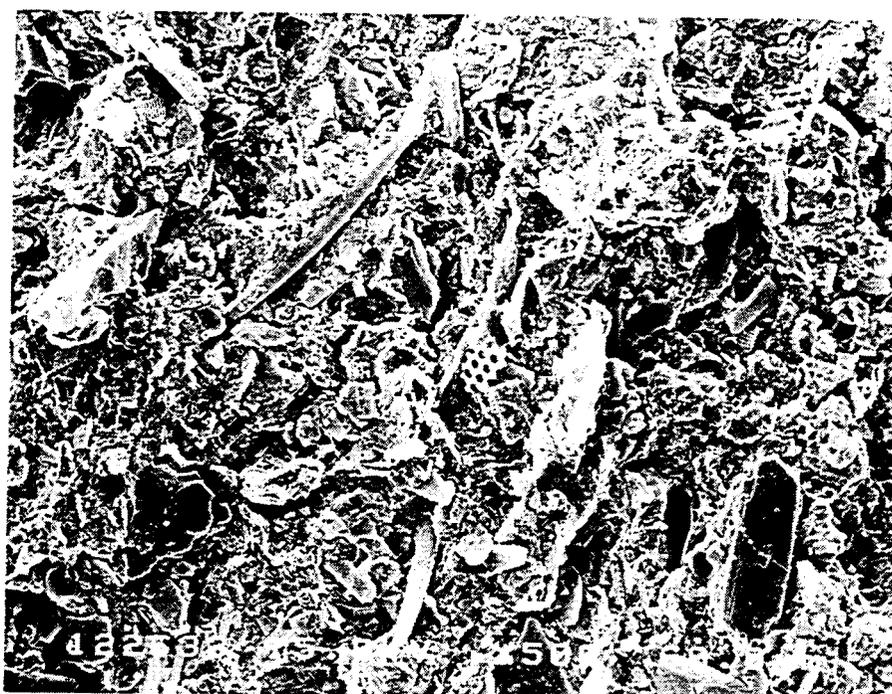


写真-4.3.5 高温養生粘土の水平断面



写真-4.3.6 室温養生粘土の鉛直断面

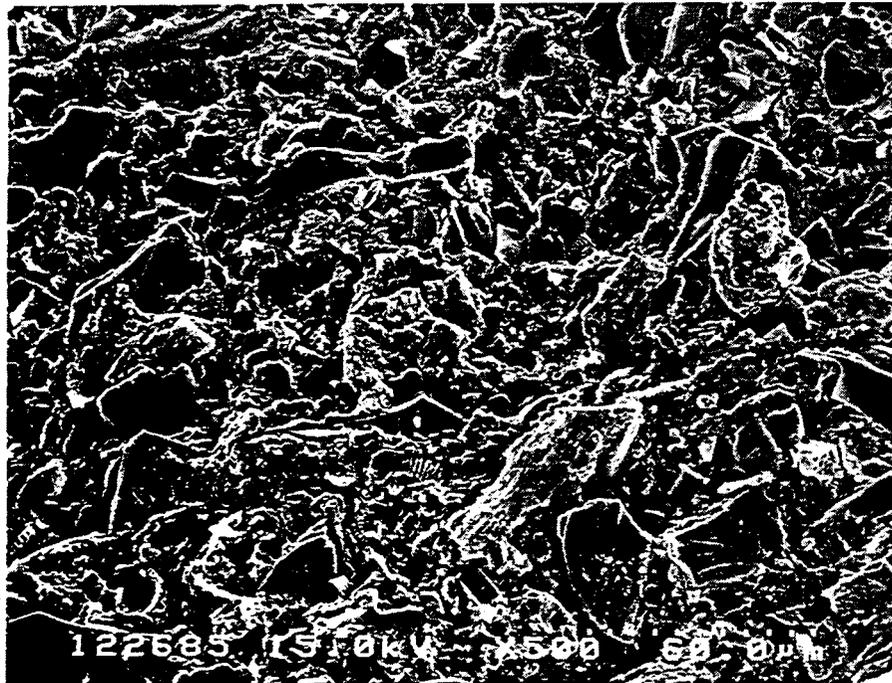


写真-4.3.7 室温養生粘土の水平断面

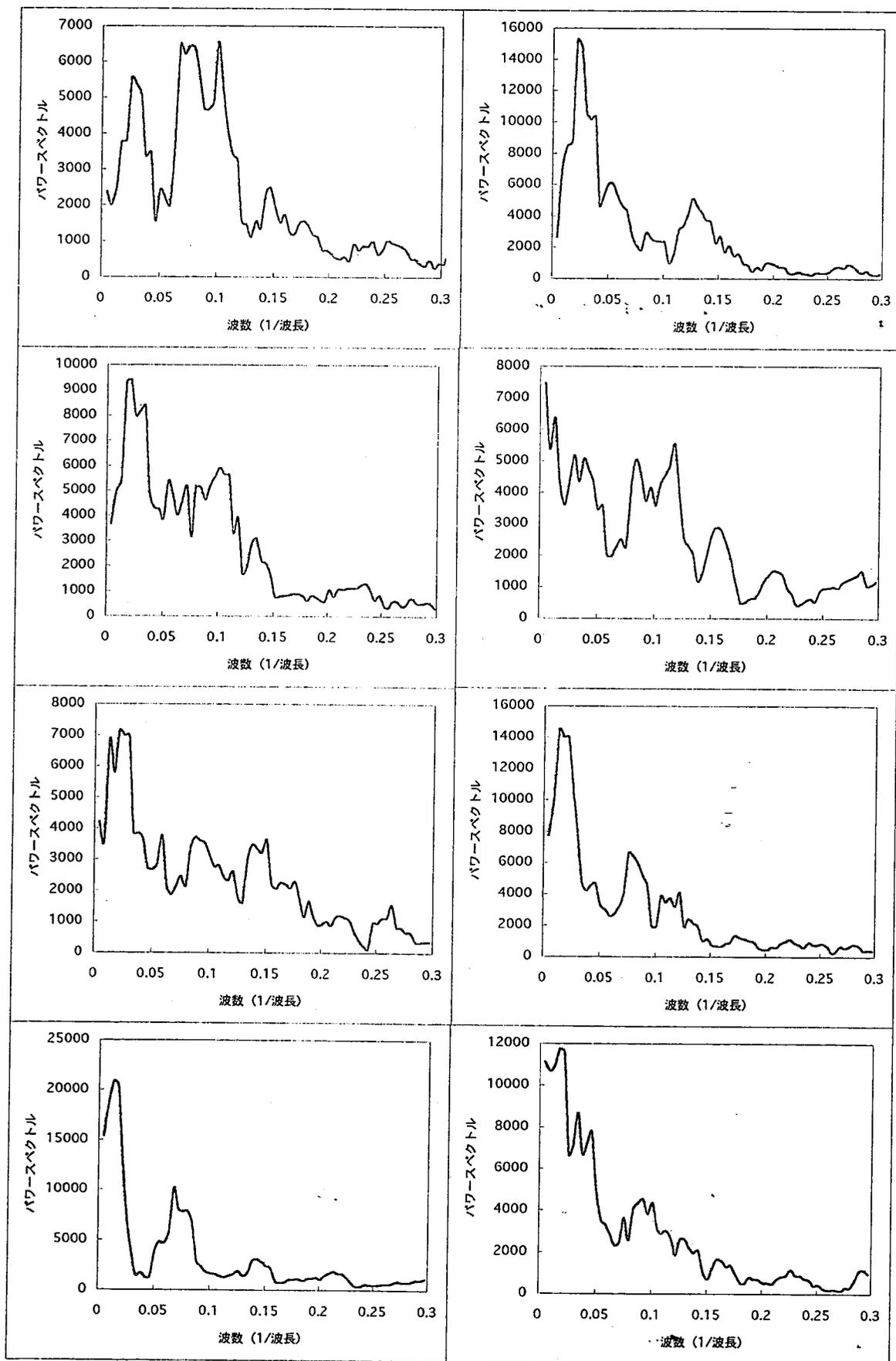


図-4.3.1 不攪乱粘土の水平断面の濃度スペクトル (X方向)

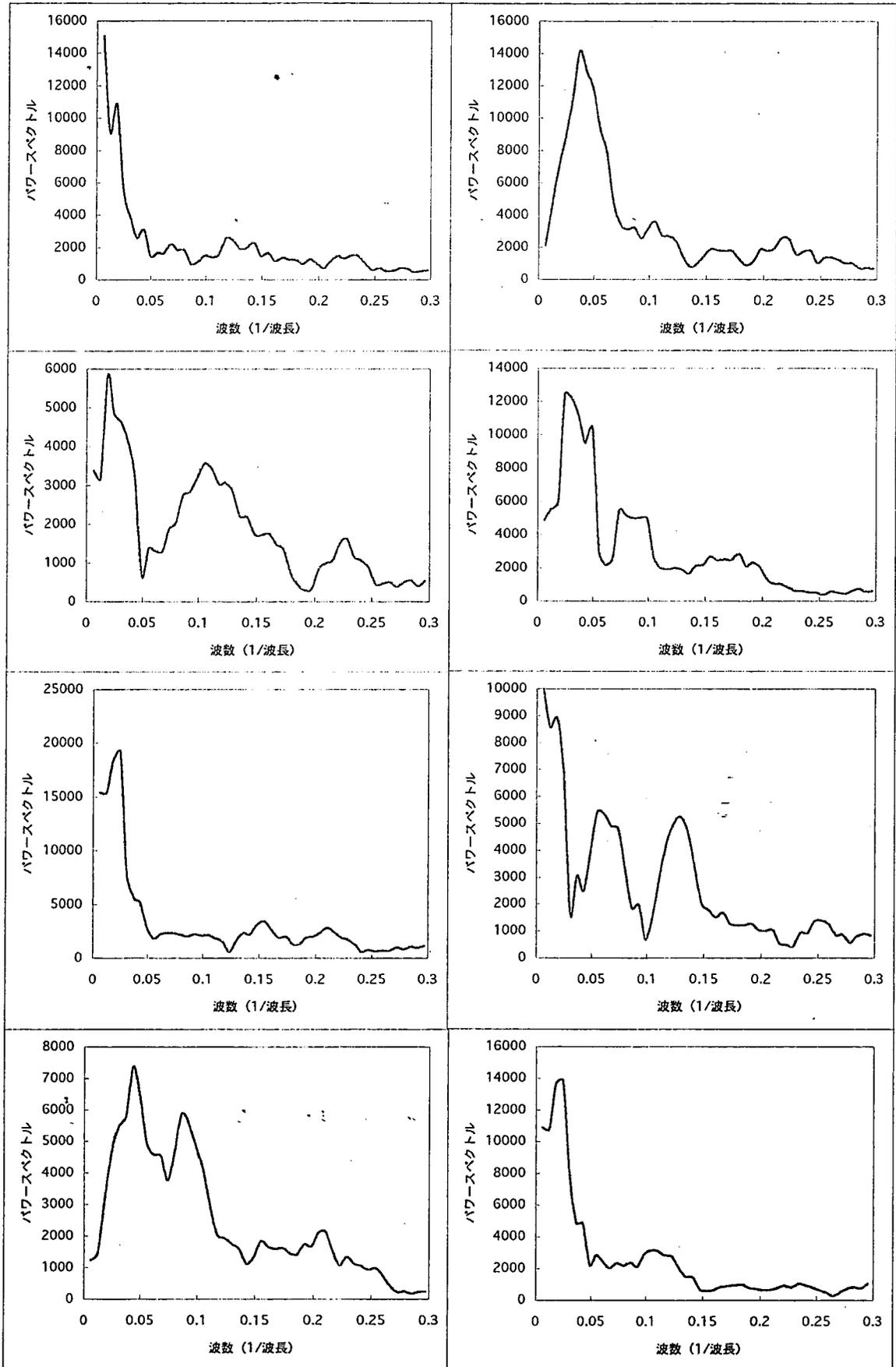


図-4.3.2 不攪乱粘土の水平断面の濃度スペクトル (Y方向)

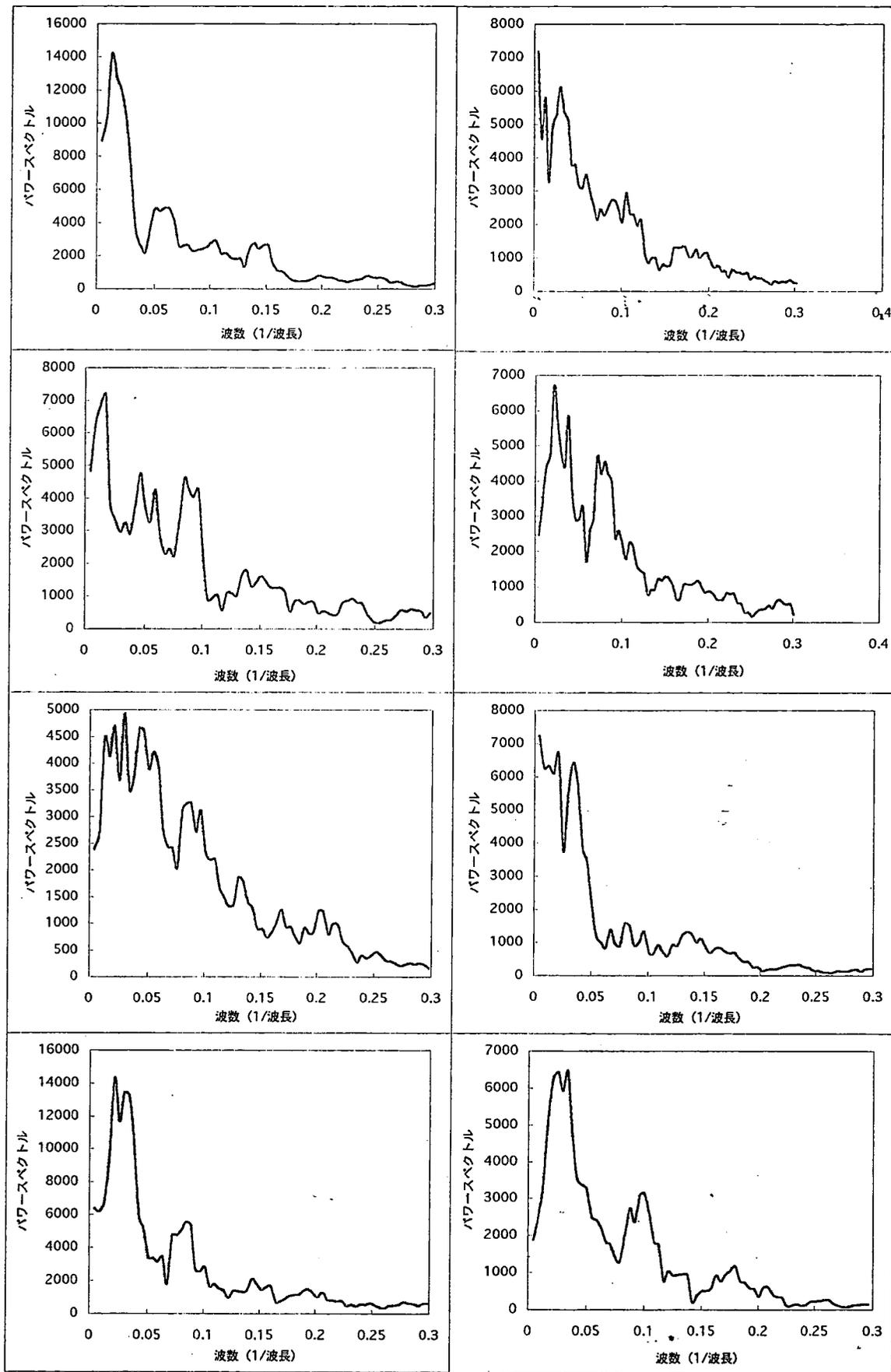


図-4.3.3 不攪乱粘土の鉛直断面の濃度スペクトル (X方向)

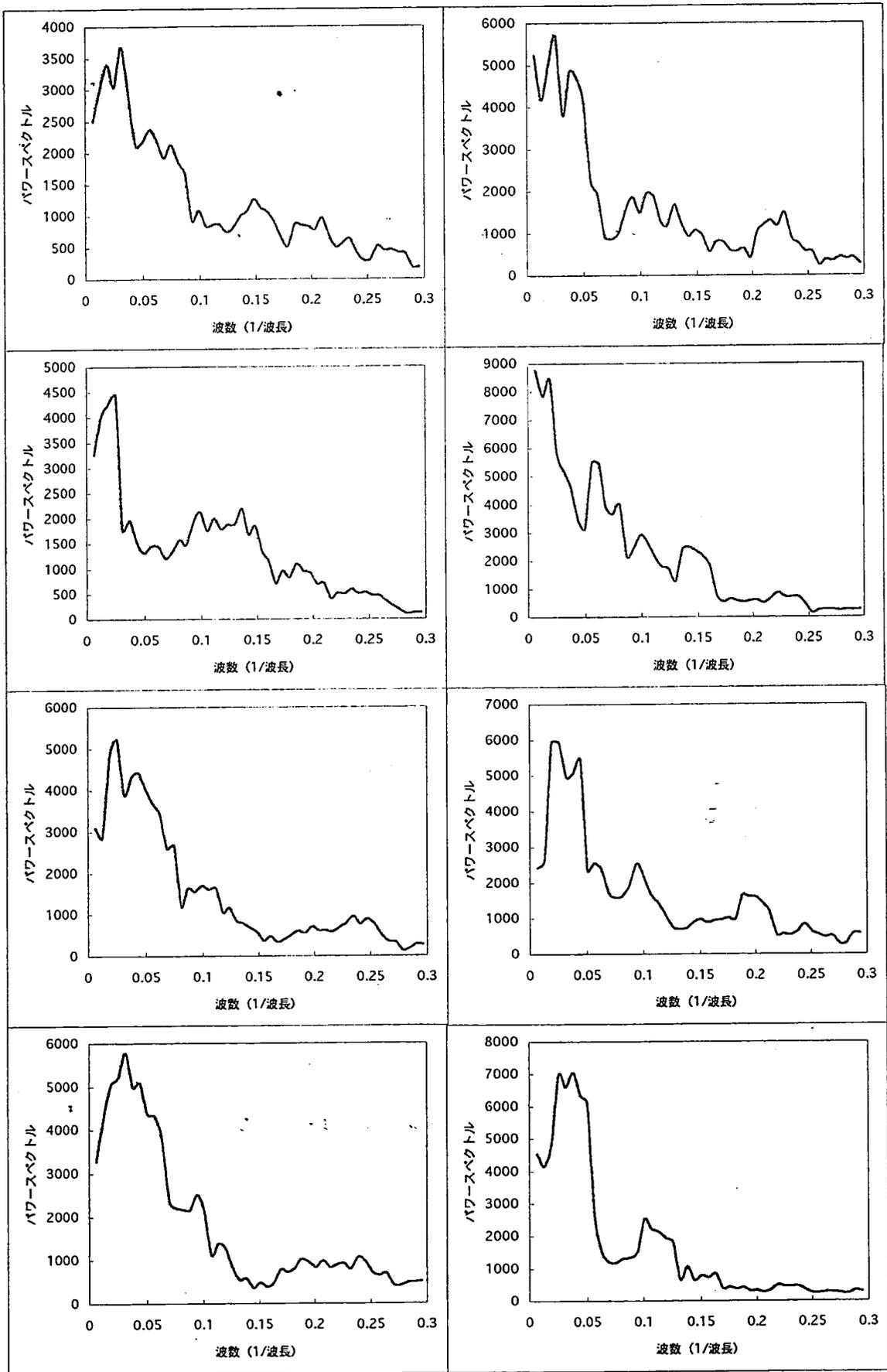


図-4.3.4 不攪乱粘土の鉛直断面の濃度スペクトル (Y方向)

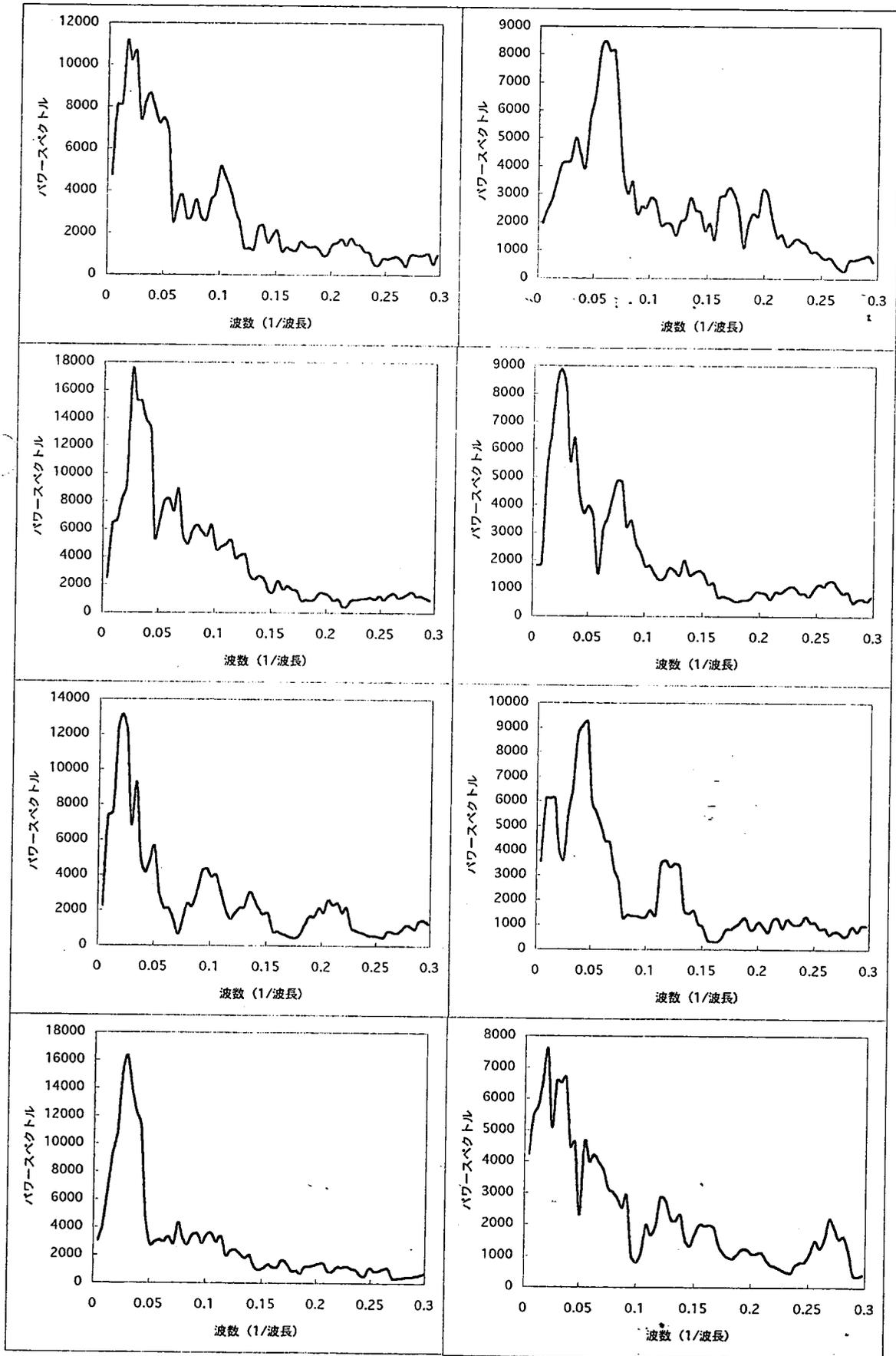


図-4.3.5 高温養生粘土の水平断面の濃度スペクトル (X方向)

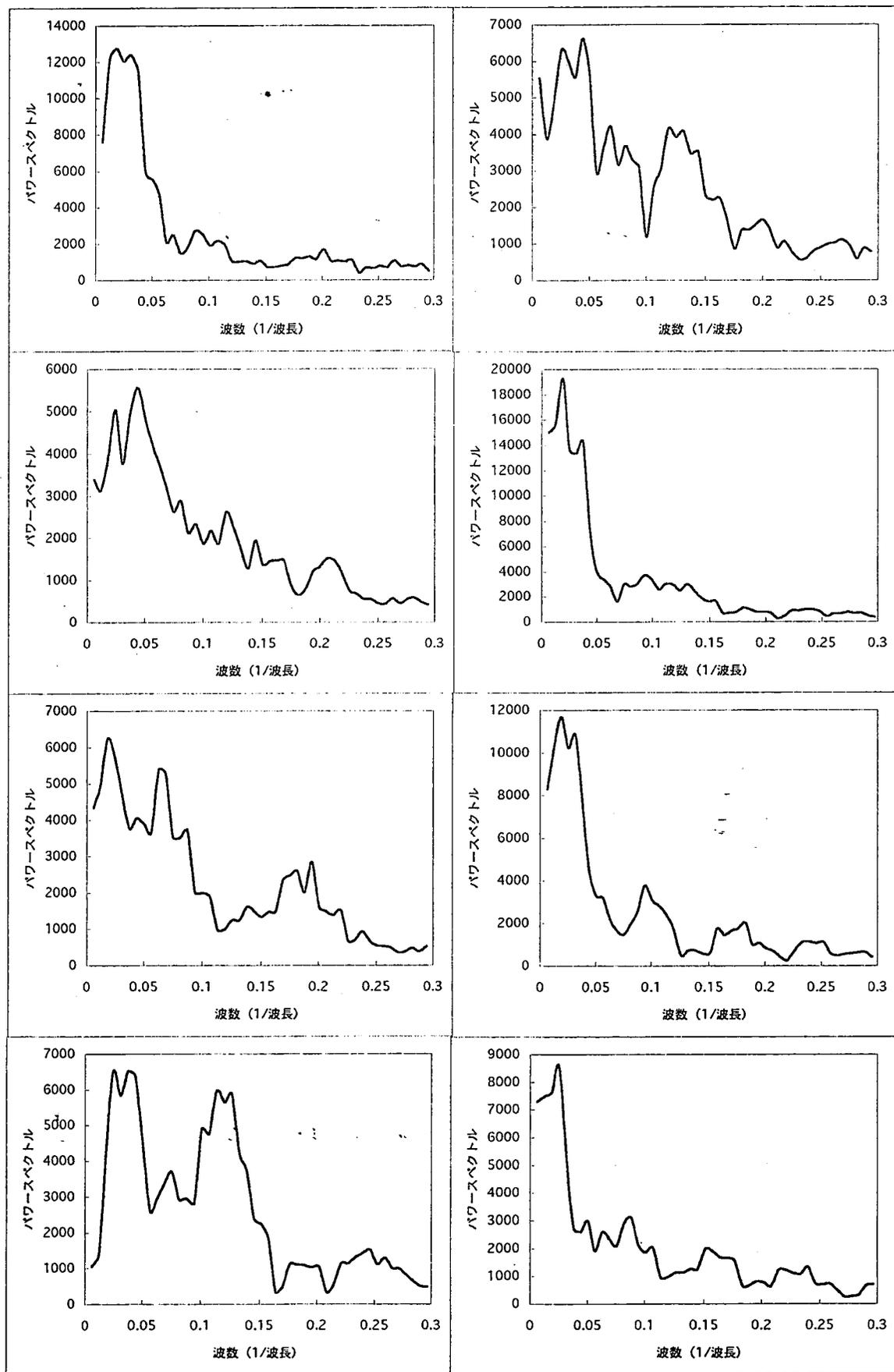


図-4.3.6 高温養生粘土の水平断面の濃度スペクトル (Y方向)

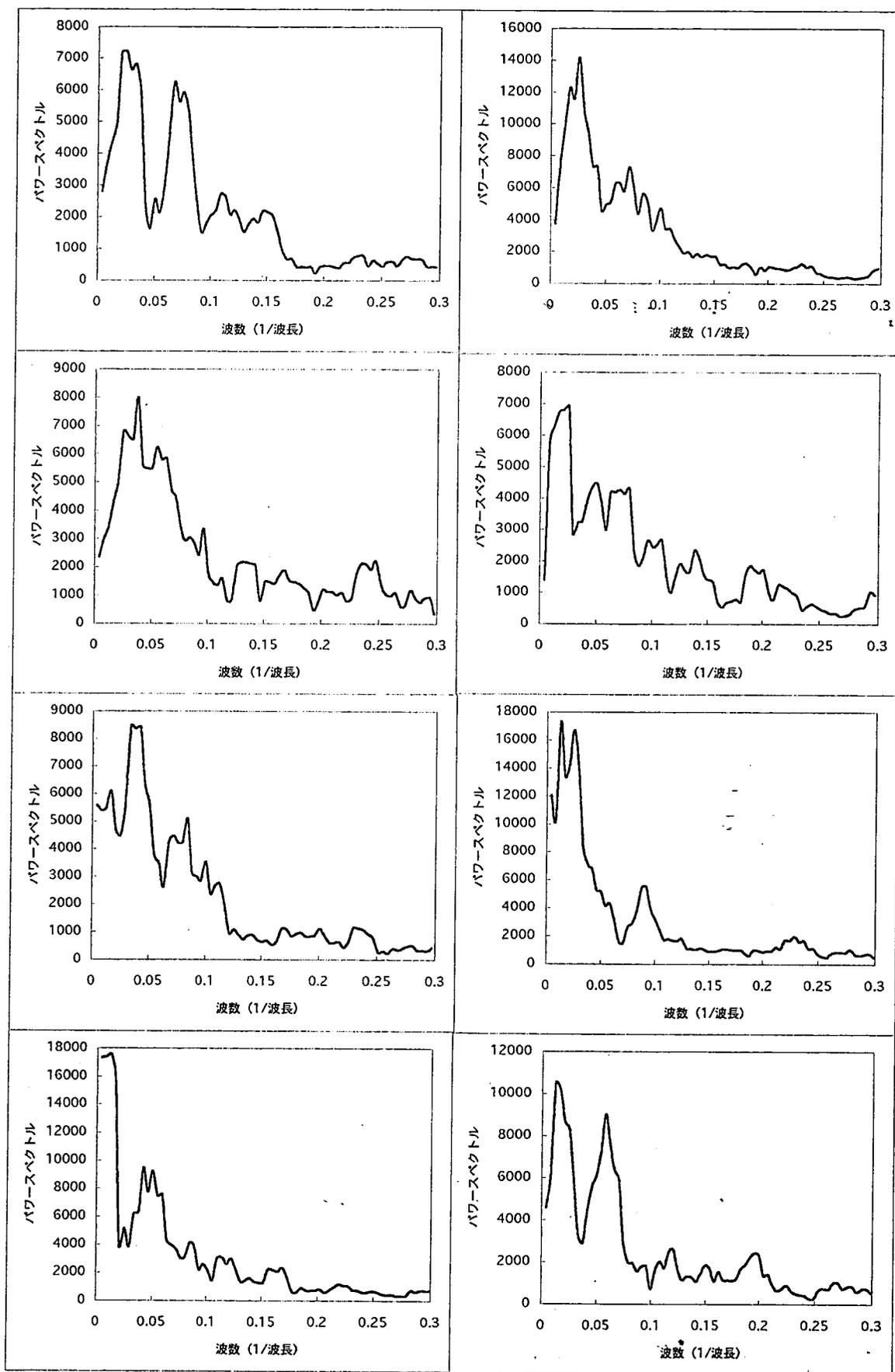


図-4.3.7 高温養生粘土の鉛直断面の濃度スペクトル (X方向)

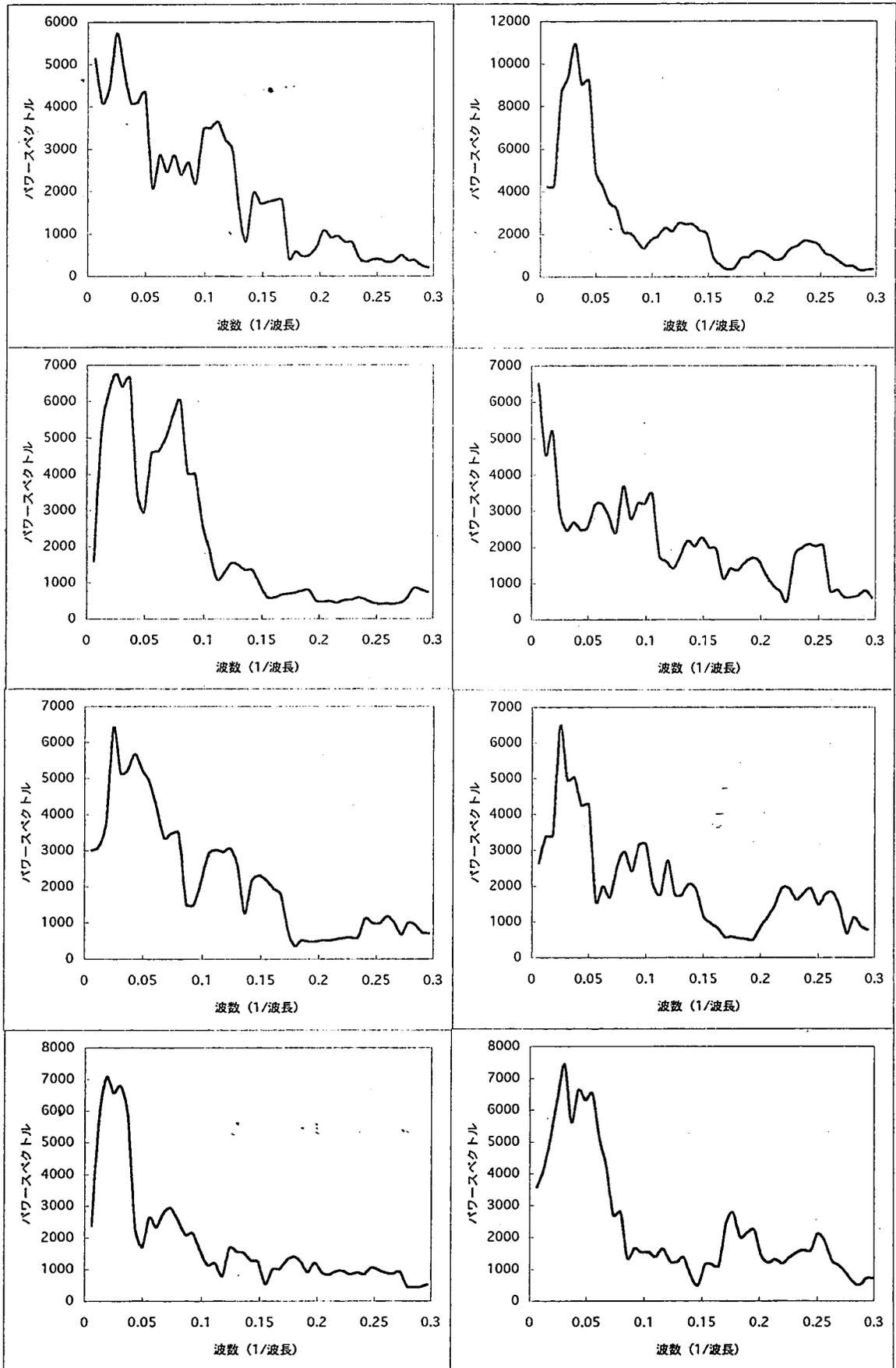


図-4.3.8 高温養生粘土の鉛直断面の濃度スペクトル (Y方向)

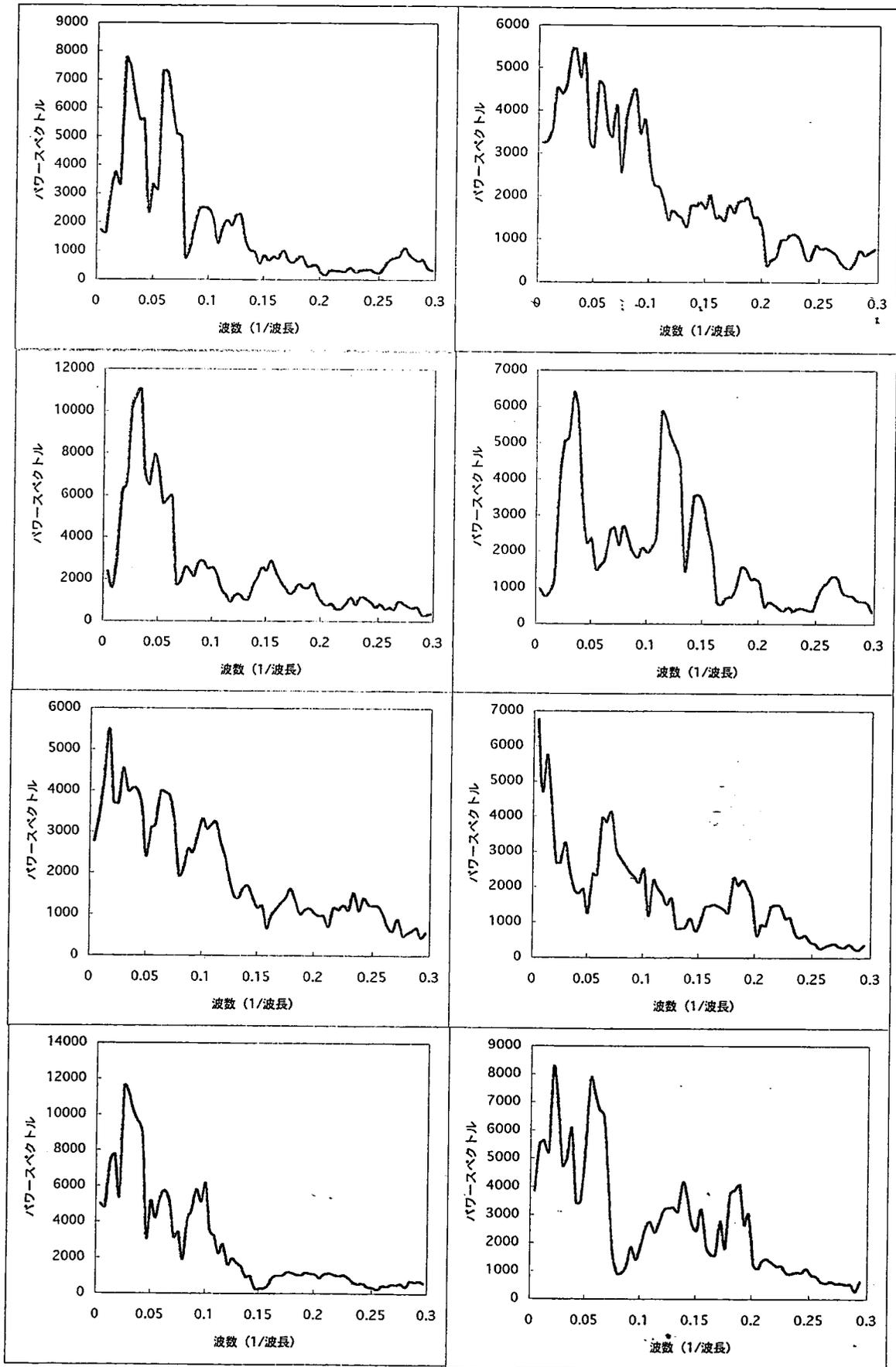


図-4.3.9 室温養生粘土の水平断面の濃度スペクトル (X方向)

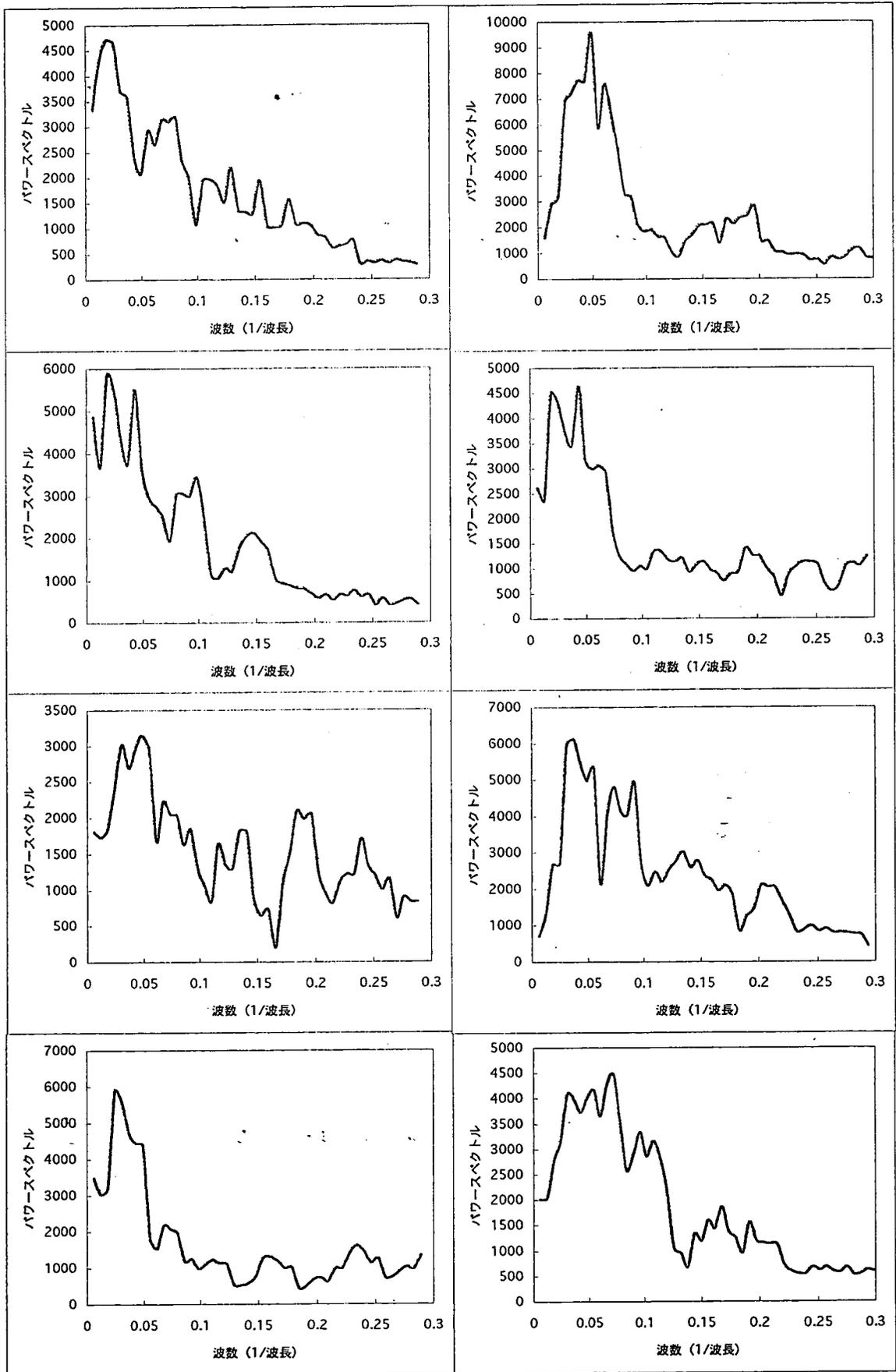


図-4.3.10 室温養生粘土の水平断面の濃度スペクトル (Y方向)

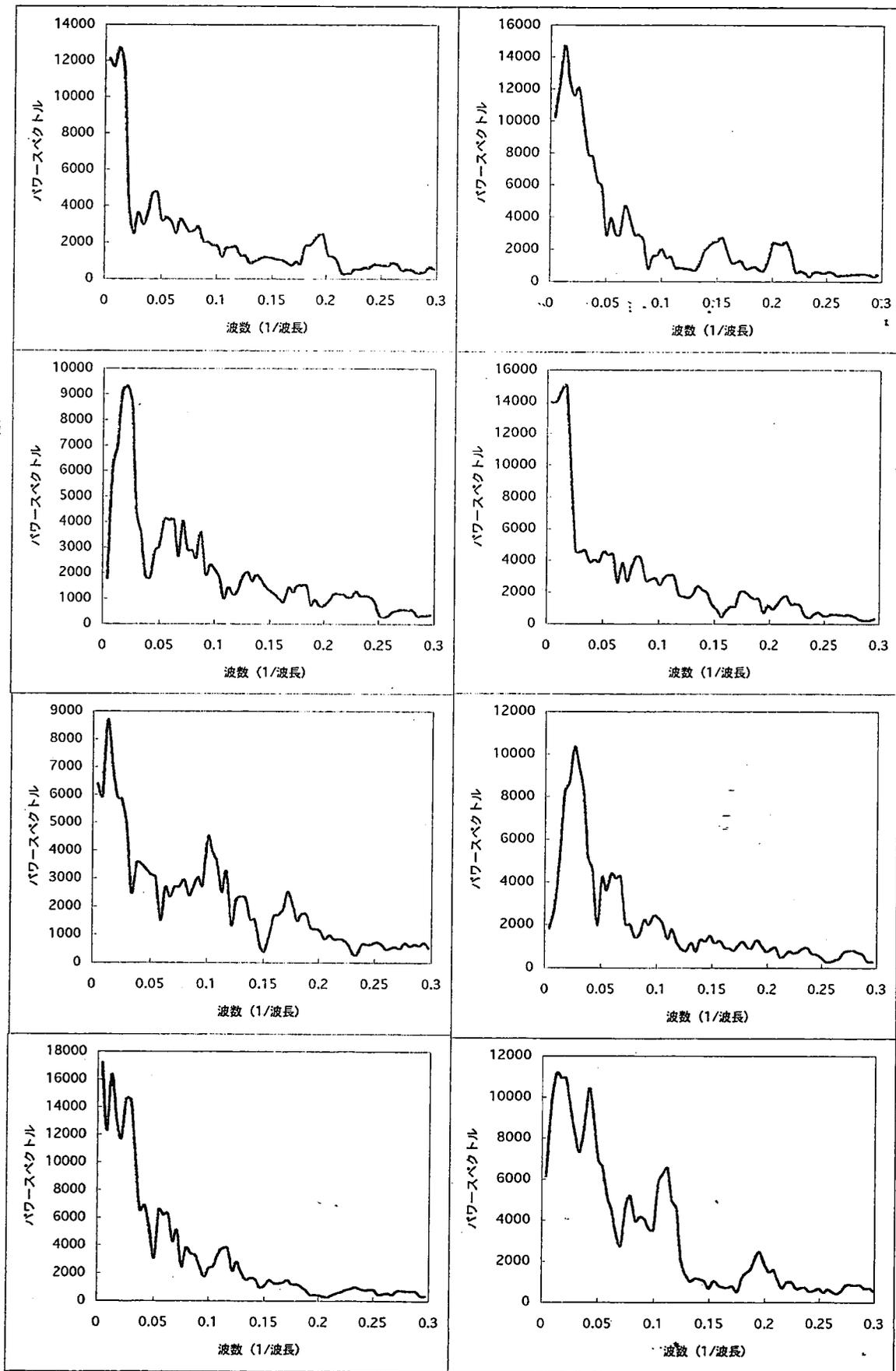


図-4.3.11 室温養生粘土の鉛直断面の濃度スペクトル (X方向)

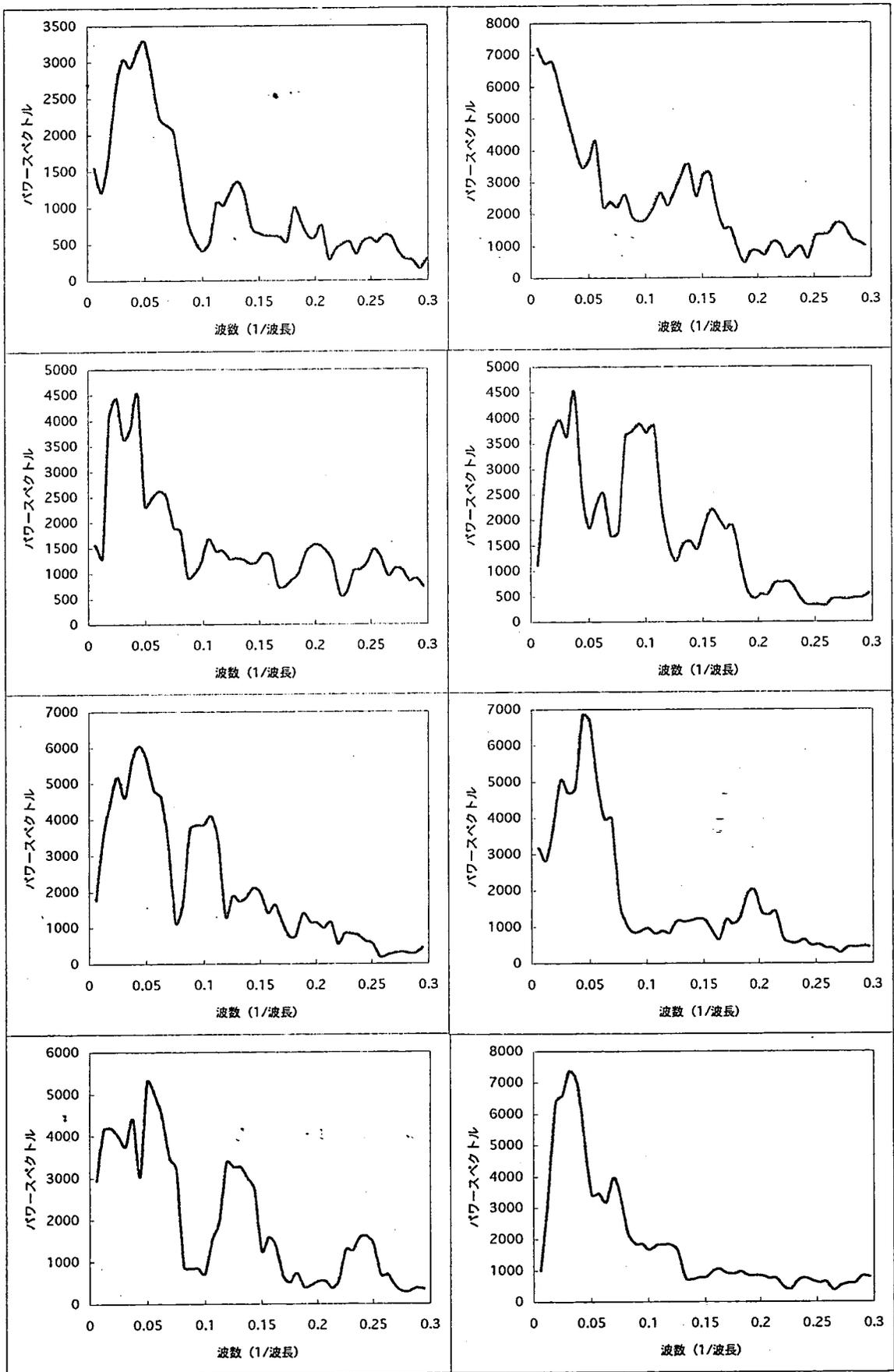


図-4.3.12 室温養生粘土の鉛直断面の濃度スペクトル (Y方向)

4. 4 力学試験結果に対する考察

次に、力学試験結果の考察を行う。標準圧密試験より、室温養生試料の圧密降伏応力 p_c は再圧密応力 (1.0 kgf/cm^2) とほぼ等しいのに対し、高温養生試料の圧密降伏応力 p_c は再圧密応力よりも大きくなっていることから、高温養生試料の粒子構造は、高温養生することにより、剛な構造になることが分かる。また、図-4.2.2 の圧縮指数 C_c の関係からも高温養生試料は、不攪乱試料に類似していることが分かる。また、高温養生試料の圧縮指数比 r_c は、一般的に言われている自然粘土の圧縮指数比 r_c の範囲にあり、高温養生試料は圧密特性の面から見て、不攪乱試料を再現していると言える。

一軸圧縮試験で得られた図-4.2.3 の不攪乱試料および高温養生試料、室温養生試料の応力～ひずみ曲線から、室温養生試料はひずみ硬化型であるが、高温養生試料と不攪乱試料はひずみ軟化型であることが分かる。高温養生試料は不攪乱試料の約 2 倍の一軸圧縮強度になっているが、高温養生試料の破壊ひずみ ϵ_f は不攪乱試料のそれに類似している。乱れの度合いと逆比例の関係にある変形係数は、室温養生試料に比べ高温養生試料ではかなり大きくなり、不攪乱試料と同等以上になっていることから、高温養生によって年代効果が再現されていると考えられる。

4. 5 解析結果に対する考察

1) 解析結果の表示方法

濃度スペクトルの結果から、パワースペクトルが最も卓越している時の波数を見つけ、式 (A) を用いて粒径を算出し、鉛直断面および水平断面において、最も卓越する粒径の分布を X 方向および Y 方向について示す。

$$\text{粒径} = \frac{1}{2} \times \text{波長} = \frac{1}{2} \times \frac{1}{\text{波数}} \quad (\text{A})$$

2) 鉛直断面 (X 方向) の特徴

図-4.4.2 に、鉛直断面 (X 方向) で最も卓越する粒径の分布を示す。最も卓越する粒径は、不攪乱試料および高温養生試料では 15~25 μm 付近に集中している。これは、粘土粒子が傾いていることや、濃度計測を行った直線が粘土粒子の中心を必ずしも通っていないことを考慮すると、粘土粒子の平坦面の大きさを表していると考えられる。一方、室温養生試料では粘土粒子の直径よりも大きな 36~40 μm 付近が最も卓越している。これは、板状粒子が水平面と平行に積み重なって形成されたペッドの水平方向の長さを表していると考えられる。

図-4.4.3 に、鉛直断面 (X 方向) で二番目に卓越している粒径の分布を示す。これは、図-4.4.1 に示すように一番卓越しているパワースペクトルの値の 3 分の 1 以上で、二番目のパワースペクトルのピークがある場合、式 (A) を用いて、その点の波数から、二番目に卓越している粒径の分布を算出したものである。どの試料においても 6~10 μm 付近が卓越しており、これは、板状粘土粒子の厚さを表していると考えられる。

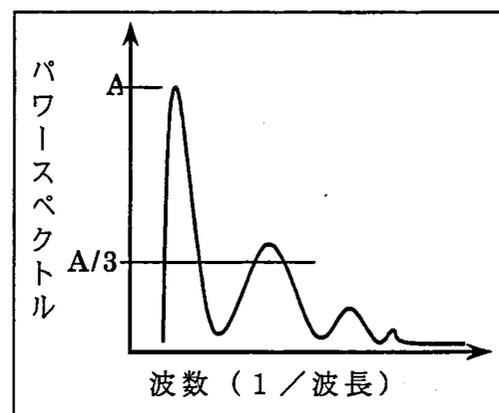


図-4.4.1 二番目に卓越するパワースペクトル

3) 鉛直断面 (Y方向) の特徴

図-4.4.4 に、鉛直断面 (Y方向) で最も卓越する粒径の分布を示す。最も卓越する粒径は、不攪乱試料および高温養生試料では $16\sim 25\mu\text{m}$ 付近であり、これは、粘土粒子の平坦面の大きさを表していると考えられる。一方、室温養生試料では $11\sim 15\mu\text{m}$ 付近に集中している。これは、粘土粒子の平坦面の大きさであると考えするには小さすぎ、板状粒子が水平面と平行に積み重なって形成されたペットの鉛直方向の厚さを表していると考えられる。

鉛直断面 (X方向) と同様に、図-4.4.5 に鉛直断面 (Y方向) で二番目に卓越する粒径の分布を示す。二番目に卓越する粒径は、どの試料も $6\sim 10\mu\text{m}$ 付近に集中している。これらは粘土粒子の厚さを表していると考えられる。また、高温養生試料および室温養生試料の $1\sim 5\mu\text{m}$ 付近に集中しているものは、繰り返したときに粘土粒子の表面が剥離したものを表していると考えられる。

4) 鉛直断面の X方向と Y方向の比較

鉛直断面の X方向と Y方向の比較を行うと、不攪乱試料および高温養生試料では方向による違いほとんどがなく、最も卓越する粒径として粘土粒子の平坦面の大きさが表れており、二番目に卓越する粒径として粘土粒子の厚さが表れている。このことより、不攪乱試料および高温養生試料はランダム構造に近い構造であると考えられる。それに対し、室温養生試料の X方向にはペットの水平方向の長さが、Y方向には粘土粒子の厚さが表れており、配向構造に近い構造であると考えられる。

5) 水平断面 (X方向) の特徴

図-4.4.6 に、水平断面 (X方向) で最も卓越する粒径の分布を示す。不攪乱試料、高温養生試料、室温養生試料ともに、 $11\sim 25\mu\text{m}$ 付近が最も卓越する粒径となっている。これらは、ほぼ同じような値であり、粘土粒子の平坦面の大きさを表していると考えられる。図-4.4.7 の水平断面 (X方向) で二番目に卓越する粒径の分布より、不攪乱試料と室温養生試料は、ほぼ同じような値であり、粘土粒子の厚さを表していると考えられる。

6) 水平断面 (Y方向) の特徴

図-4.4.8 に、水平断面 (Y方向) で最も卓越する粒径の分布を示す。不攪乱試料および高温養生試料、室温養生試料ともに、11~20 μ m 付近および 26~30 μ m 付近が最も卓越する粒径となっている。写真-4.3.3、写真-4.3.5 および写真-4.3.7 より、粒径が 11~20 μ m 付近は小さな粒子が集まってできたベッドの平坦面の大きさであり、粒径が 26~30 μ m 付近は粘土粒子の平坦面の大きさを表していると考えられる。図-4.4.9 の水平断面 (Y方向) で二番目に卓越する粒径の分布より、これらは全て粘土粒子の厚さを表していると考えられる。

7) 水平断面の X方向と Y方向の比較

水平断面の X方向と Y方向の違いはほとんど見られない。どの試料においても、最も卓越する粒径に粘土粒子の平坦面の大きさが表れて、二番目に卓越する粒径に粘土粒子の厚さが表れている。

以上のことより、不攪乱試料および高温養生試料はランダム構造に近い構造であると考えられる。一方、室温養生試料は水平方向に関してはランダム構造と見なすことができるが、鉛直断面に関しては、配向構造であったことを考慮すれば、粒子構造全体としてはランダム構造であるとは考えられない。

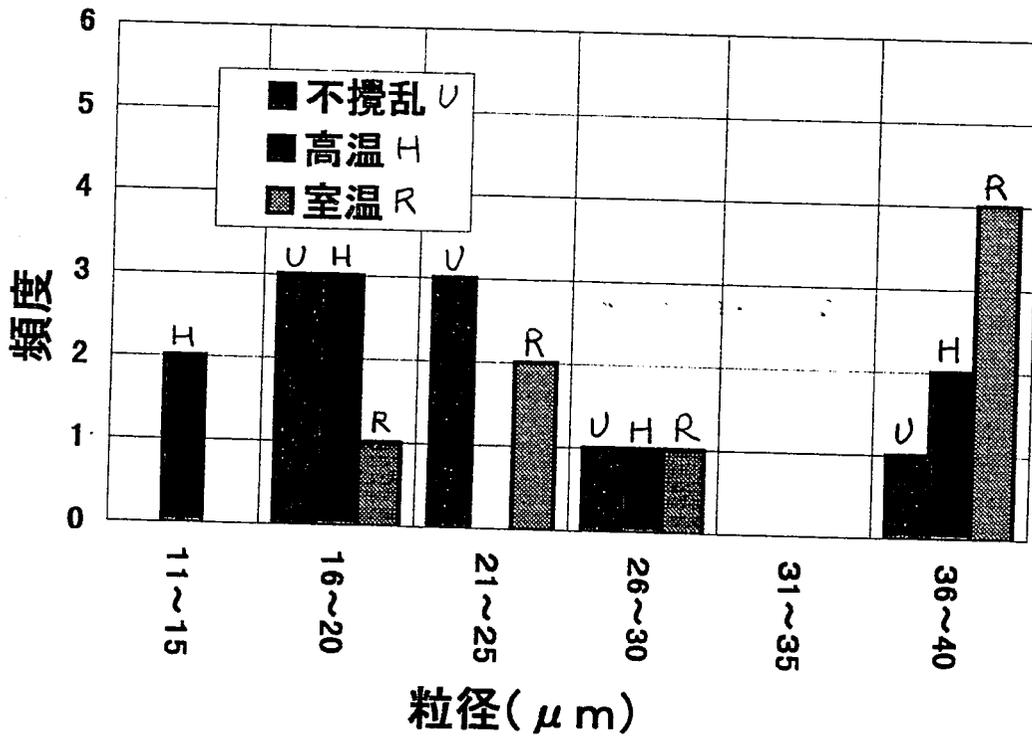


図-4.4.2 鉛直断面 (X方向) の最も卓越する粒径の分布

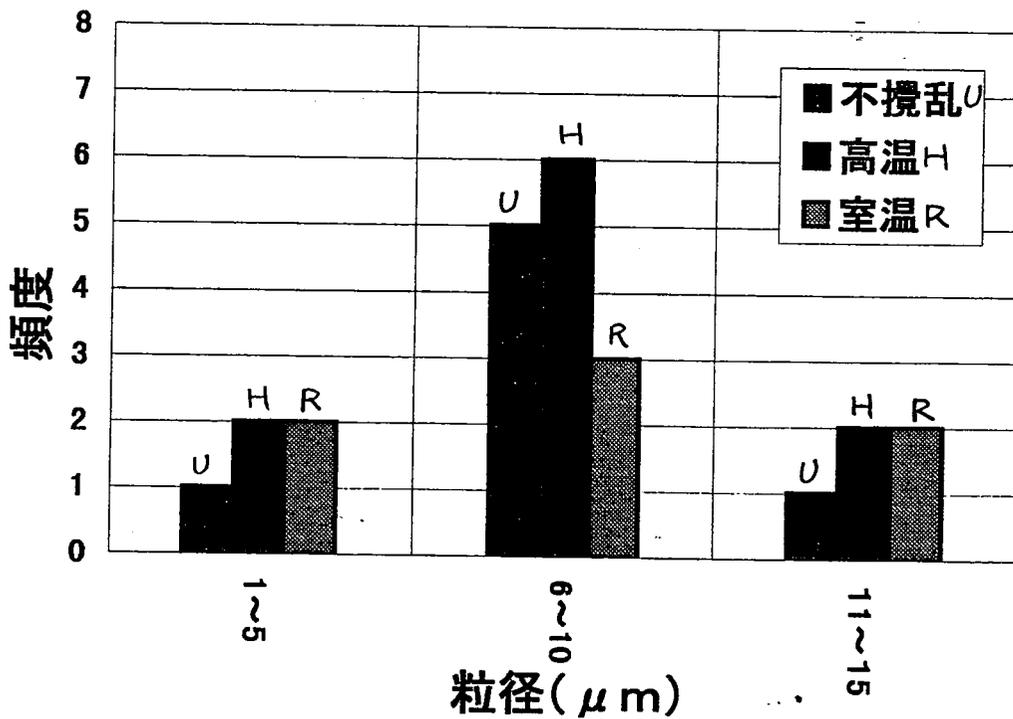


図-4.4.3 鉛直断面 (X方向) の二番目に卓越する粒径の分布

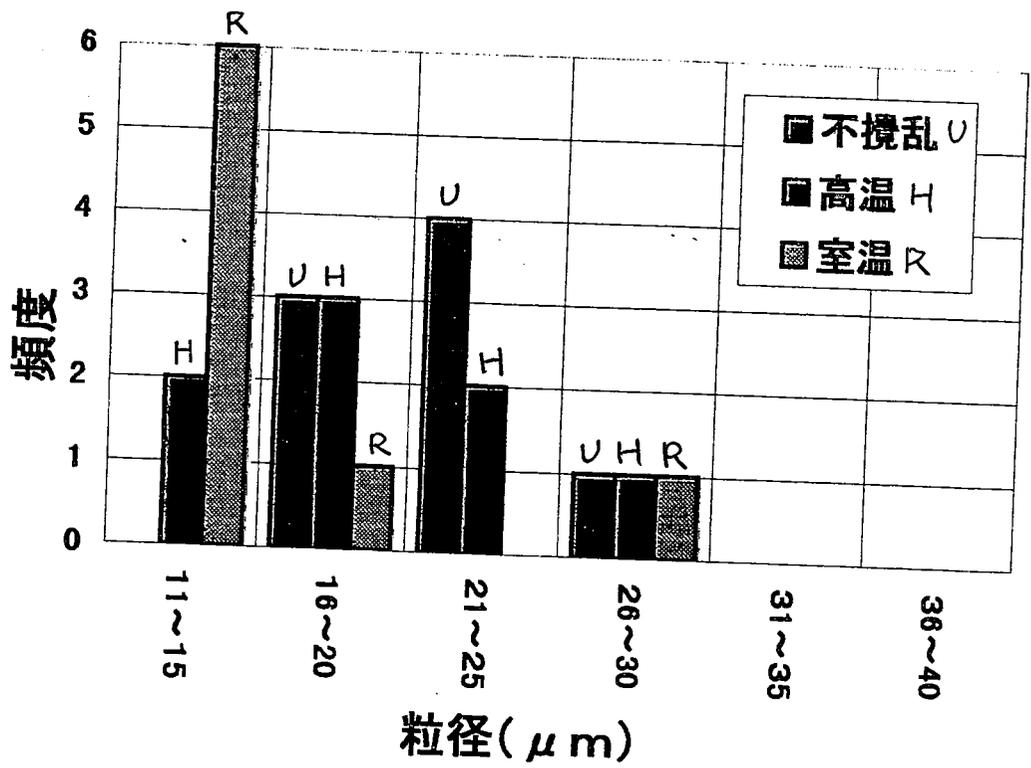


図-4.4.4 鉛直断面 (Y方向) の最も卓越する粒径の分布

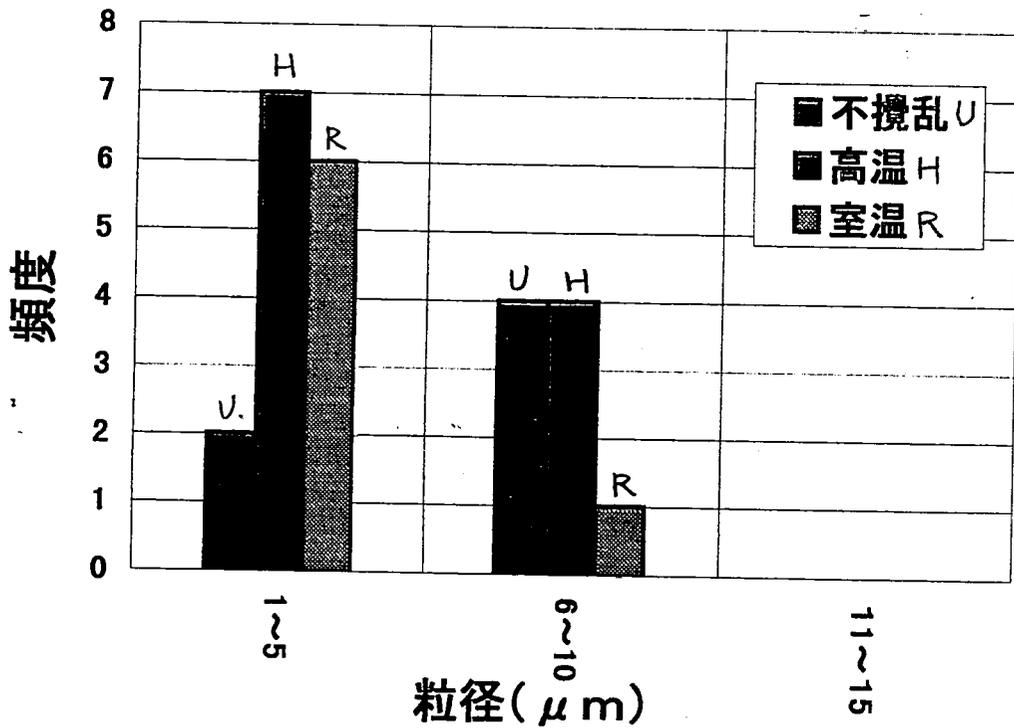


図-4.4.5 鉛直断面 (Y方向) の二番目に卓越する粒径の分布

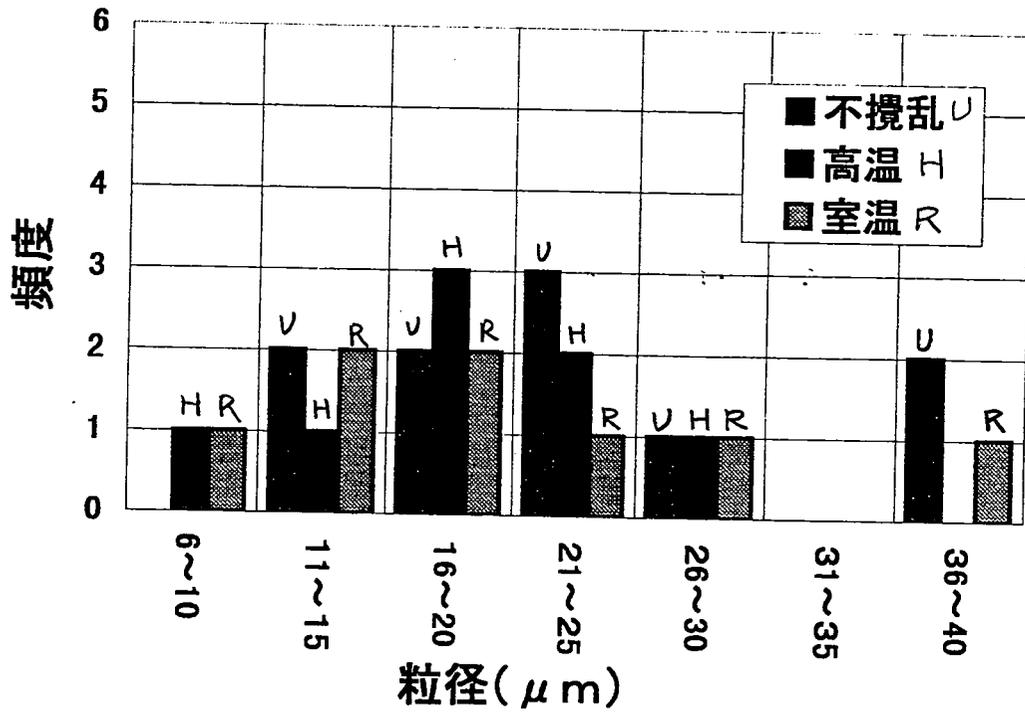


図-4.4.6 水平断面 (X方向) の最も卓越する粒径の分布

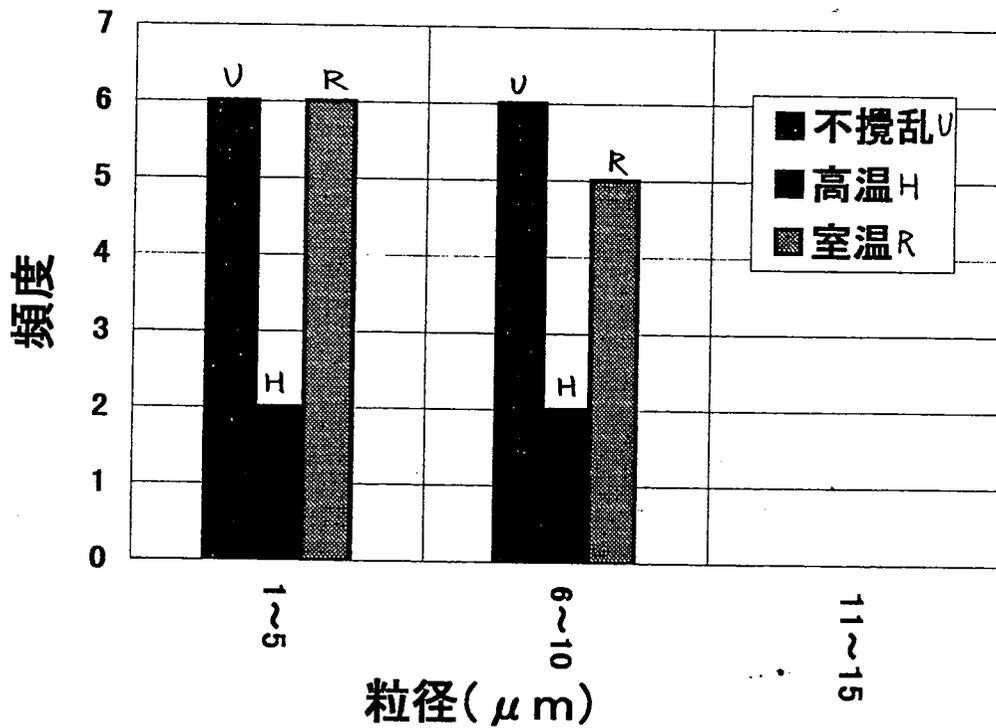


図-4.4.7 水平断面 (X方向) の二番目に卓越する粒径の分布

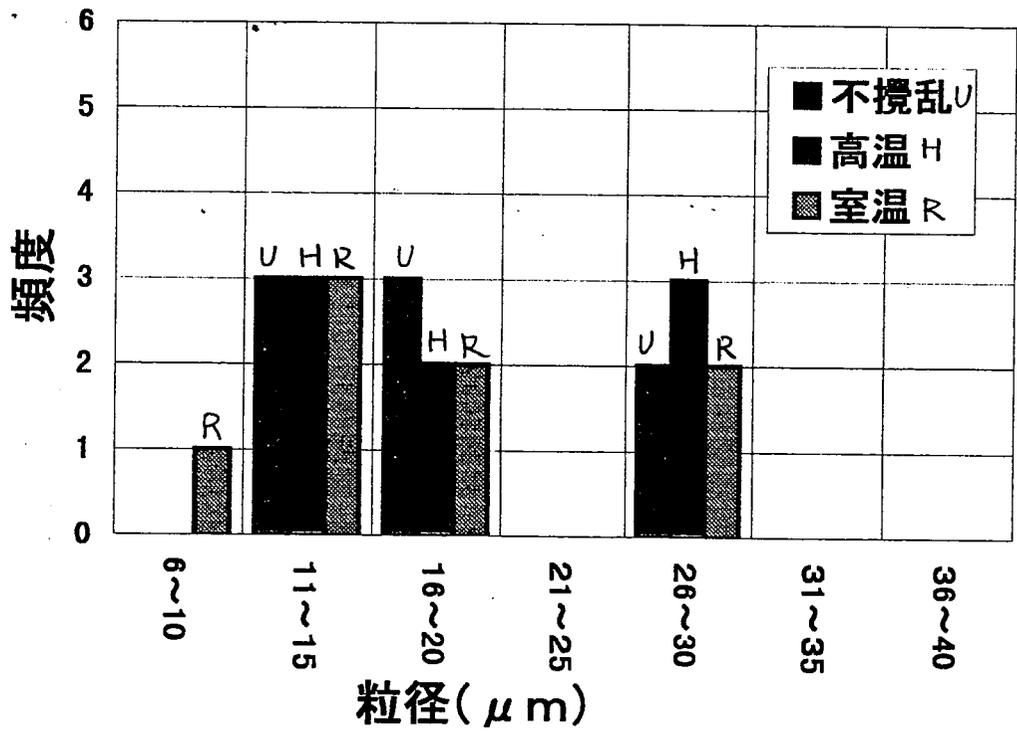


図-4.4.8 水平断面 (Y方向) の最も卓越する粒径の分布

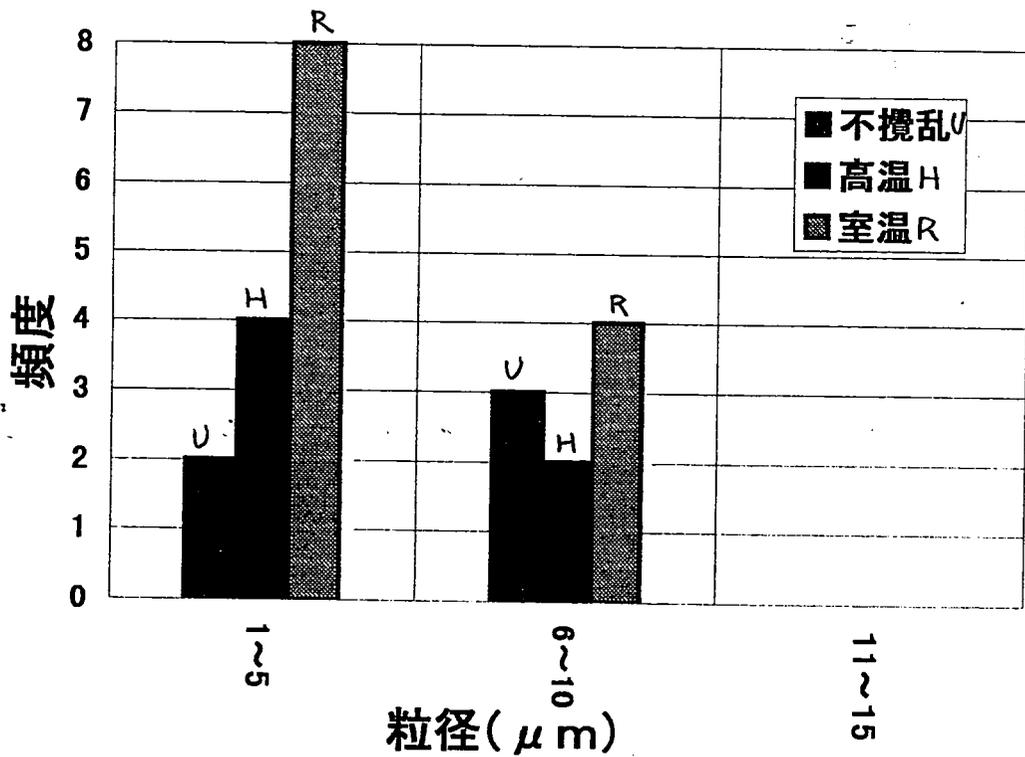


図-4.4.9 水平断面 (Y方向) の二番目に卓越する粒径の分布

第5章 結論

本研究では、走査型電子顕微鏡を用いて粘土粒子構造の写真撮影を行い、撮影した写真の画像解析を行った。そして、画像解析の結果から粘土の粒径分布を推定し、粘土の粒子配列構造を検討した。また、不攪乱粘土、攪乱高温養生粘土、および攪乱室温養生粘土に対して力学特性試験を行い、粘土の粒子配列構造との関連性を調べた。その結果、得られた主な結論を以下に示す。

- 1) 粒子構造を撮影した顕微鏡写真の濃度分布曲線をスペクトル解析することにより、粘土の卓越している粒径の分布を調べることができる。
- 2) 土は自然材料であるので、様々な形状や大きさの粘土粒子が存在する。そのため、粘土の粒子構造を単純に定量化できないが、最も卓越する粒径と二番目に卓越する粒径の分布を比較することによって、粘土の粒子配列構造を定量的に評価することができる。
- 3) 不攪乱粘土、高温養生粘土、および室温養生粘土の水平断面においては、粒子配列構造に違いはないが、鉛直断面において粒子配列構造の違いが表れる。
- 4) 卓越している粒径の分布から、不攪乱粘土および高温養生粘土はランダム構造に近い構造であり、室温養生粘土は配向構造に近い構造であることを定量的に示すことができた。この結果は、粘土の微視的構造から見ても、高温養生粘土では、不攪乱自然粘土の持つ年代効果を再現できている事を示していると考えられる。
- 5) 力学試験の結果から、室温養生粘土より高温養生粘土の方が不攪乱粘土と類似した挙動を示すことが確認された。すなわち、粘土の巨視的挙動から見ても、高温養生粘土は不攪乱自然粘土の年代効果を再現できている事が分かった。

参考文献

- 1) Wahls, H.E. : Analysis of Primary and Secondary Consolidation, Proc. ASCE, SM6, 1962.
- 2) Yong, R.N. and Warkentin, B.P. : Introduction to soil behavior, Macmillan, pp.108-112, 1966.
- 3) Collins, K. and McGown, A. : The form and foundation of microfabric features in a variety of natural soils, Geotechnique, Vol.24, No.2, pp.223-254, 1974.
- 4) 風間秀彦, 竹内信次, 黒崎秀 : 圧密課程における粘土の構造変化, 土と基礎, 第 29, 3 号, pp.11-18, 1981.
- 5) 小泉和広, 岸本弘樹, 坂上麻子, 土田孝 : 高温で再圧密された粘土力学特性と理化学特性について, 第 50 回土木学会年次講演会概要集, pp.276-277, 1995.
- 6) Bjerrum, L. : Engineering geology of Norwegian normally consolidated marine clays as related to settlements of buildings, Geotechnique, Vol.17, 1967.
- 7) 土田孝 : 三軸試験による自然粘土地盤の強度決定法に関する研, 港湾技研資料, No.688, pp.85, 1990.
- 8) Mesri, G. and Godlewski, P.M. : Time and stress compressibility interrelationship, Proc.ASCE, Vol.103, No.GT5, pp.417-430, 1977.
- 9) 土田孝, 小林正樹, 水上純一, 田中正典 : 高温再圧密による海成粘土の年代効果の再現, 港湾技術研究所研報告, 第 28 巻, 第 1 号, pp.121-147, 1989.
- 10) 嘉門雅史, 長尾毅 : 人工的にセメンテーションを与えた粘性土の土質工学的性質について, 第 21 回土質工学研究発表会, pp.389-390, 1986.
- 11) 森脇武夫, 吉国洋, 永井大海, 名合牧人 : 高温再圧密粘土の三軸繰返し圧密挙動, 土木学会論文, No.463/Ⅲ-22, pp.55-63, 1993.
- 12) 重山忠成 : 画像解析による粘土構造の定量化に関する基礎的研究, 広島大学卒業論文, 1996.
- 13) 大崎順彦 : 新・地震動のスペクトル解析入門, 鹿島出版会.

付 録

粘土の微視的構造の定量的評価