

# 粘土の微視構造の定量化に関する研究

児玉 潤<sup>1</sup>・足立 格一郎<sup>2</sup>

<sup>1</sup>学生会員 工修 芝浦工業大学大学院博士後期課程 工学研究科地域環境システム専攻  
(〒108-8548 東京都港区芝浦3-9-14)

<sup>2</sup>フェロー会員 Ph.D. 芝浦工業大学教授 工学部土木工学科 (〒108-8548 東京都港区芝浦3-9-14)

粘土の微視構造と力学挙動との関連性を定量的に示すことは重要なテーマである。本研究では粒子サイズの異なるイライトおよびDL粉碎土の2つの試料を用いて圧密試験を行い、圧密による微視構造の変化を粒子サイズに着目して定量的な解釈を試みた。微視構造を直接測定することが可能な超深度形状測定顕微鏡を用いて様々な測定倍率で断面形状の測定を行い、Sm値、フラクタル次元および二次元フーリエ変換の3つの手法を用いて定量化を行った。各解析手法は測定倍率などの測定条件により粗さの評価が異なる点に留意すべきものの、粒子サイズの違いによる特徴を明確に示すことが確認され、圧密前後の微視構造の変化を定量的に解釈することが可能であることがわかった。

**Key Words :** clay, micro-structure, fractal dimension, fourier transformation, Sm-value

## 1. はじめに

粘土の微視構造の研究は、粘土の様々な力学挙動を解明する上で重要なテーマとなっており、これまで圧密試験やせん断試験といった様々な力学的試験からその構造をモデル化によって推定し、間接的に捉えてきた。しかしながら、粘土の様々な力学的挙動の中でも、二次圧密や年代効果といった現象は、このようなモデル化やテルツァギの一次元圧密理論といった既往の理論では説明が難しい場合が多い。

その一方で、近年の電子顕微鏡の発達により、粘土の微視構造を直接観察することが可能になった。これにより、電子顕微鏡による微視構造の解明が、粘土の力学挙動の研究になくてはならない要素となっている。

電子顕微鏡を用いた微視構造の解明は、洪積粘土のような硬質粘土、あるいは珪藻土といった特殊土に対しても用いられている。重松<sup>1)</sup>は、これら2つの自然堆積土とそれらを練り返した再構成試料を用いて様々な室内試験を行うとともに、電子顕微鏡により得られた画像を元に微視的な観点から検討を行っている。その結果、圧密やせん断といった力学挙動に与える微視構造の影響が試料組成の面から詳細に解明されており、粘性土の成分組成や年代によって応力履歴とセメンテーション作用が与える影響の度合いに差があることが定性的に示されている。また、海外ではYong<sup>2)</sup>、Puschら<sup>3)</sup>の研究がある。

このいわばミクロ的な挙動からマクロ的な挙動を推

定する試みについて研究が進む一方で、圧密やせん断によってその構造がどの程度変化するのか、といった定量的な解釈を示すことが重要な課題となっている。

森脇、和田<sup>4)</sup>は、電子顕微鏡により得られた断面画像を白黒の濃度(グレースケール)としてデータ化し、その濃淡の分布を一種の波と見なした上でパワースペクトル解析を行っている。この解析手法では、波形を周波数ごとに分解することが可能で、粘土粒子の粒径と波長を対応させて見ることができる。これを不攪乱試料と室温再構成試料、高温再構成試料の水平断面と鉛直断面に適用し、試料ごとにパワースペクトル分布が異なることを示すとともに、水平断面と鉛直断面のスペクトル分布の違いから室温再構成試料の配向性を示すなど、断面構造の違いを定量的に評価している。

また風間<sup>5)</sup>は、粘性土の土粒子およびペッドが扁平な形状で、配向性が進むとこのペッドが平行に配列することに着目し、電子顕微鏡写真を元にペッドの端部を選定した後、配向分布や配向度をこのペッドの長軸方向の傾き $\theta$ や長さ、厚さなどの変化によって求めている。これにより、圧密圧力が大きくなるにしたがって配向性が高まる様子が定量的に示されている。

一方、湊<sup>6)</sup>は土の電気的性質の一種である比抵抗値が土の組成や構造特性、温度条件などに依存する点に着目し、比抵抗値から粘土の微視的な構造変化を推定するとともに、力学的性質との関連性を検討している。これは間隙の分布の度合いや連続性に対する比抵抗値の関係を

表-1 試料の物理特性

試料名	イライト	DL粉砕土
液性限界 $w_L$ (%)	47.3	NP
塑性限界 $w_p$ (%)	27.9	NP
塑性指数 $I_p$	19.4	NP
土粒子密度 $\rho_s$ ( $\text{g/cm}^3$ )	2.82	2.64
D10 ( $\mu\text{m}$ )	-	11
D30 ( $\mu\text{m}$ )	-	17
平均粒径(D50) ( $\mu\text{m}$ )	3.3	23
D60 ( $\mu\text{m}$ )	4.2	27
D90 ( $\mu\text{m}$ )	7.8	45

示すことで、圧密過程における構造変化を捉える手法で、自然試料と再構成試料とで明確に異なる結果を得ている。また、非抵抗値が吸着水層を含む間隙水の電解質濃度などに関連することに着目し、セメンテーション作用の影響の度合いなど土の構造特性に対して定量的な解釈が示されている。

このように、電子顕微鏡によって得られるSEM画像をもとに定量的な解釈を行う一方、微視構造の凹凸を直接測定し、断面そのものに対して定量化を行う研究は少ない。そこで、本研究では超深度形状測定顕微鏡と呼ばれる光学式顕微鏡を用いて微視構造断面を観察・測定した。この方式の顕微鏡では、粘土の微視構造の観察と同時に光の反射時間によって粘土断面の凹凸を直接測定することができ、三次元で断面形状を視覚化することもできる。また、得られた断面形状をすぐさまデジタルデータ化して処理できるのが大きな特徴で、これにより顕微鏡から得られるデータを直接パソコンで解析することが可能となる。

これまでに、有楽町層粘土とその再構成試料の微視構造断面の定量化にSm値およびフラクタル次元と呼ばれる2つの定量化手法を取り入れた。その結果、これらの手法が断面の凹凸の度合いを表現するのに適した手法であることが示されている<sup>7)・8)</sup>。Sm値は断面曲線の凹凸の平均間隔を用いて断面の粗さの度合いを表すパラメータで一次的な解析手法、フラクタル次元はある範囲の表面形状をフラクタルと呼ばれる相似性を示すパラメータを用いて次元値で断面の凹凸の度合いを表す二次元的な手法で、いずれも様々な分野で実際に形状分析およびその定量化に用いられている手法である。

本研究では、さらに各定量化手法の特性と粒子サイズが定量化データに与える影響について詳細な検討を行った。その方法として、粒子サイズの異なるイライトおよびDL粉砕土の2種類の試料を用意し、それらの試料に対して微視構造の定量化を行うことで、粒子サイズが各定量化手法に与える影響を調べた。同時に、顕微鏡による測定および定量化を行う際の条件を様々に変化させ、その影響を調べることを目的としている。すなわち、顕微鏡の測定倍率や解析の範囲などを変化させることにより、定量化された値にどのような変化が生じるかを検討する。

また、第3の定量化手法として二次元フーリエ変換の手法を導入した。これはある断面の凹凸を一種の波形とみなし、周波数変換を行うフーリエ変換の手法を二次元に拡張したもので、断面形状の特徴を見出す手法である。多くは画像解析などに用いられており、これを工学的に利用した例としては、コンクリート表面の汚れの違いを定量的に分析したものがある<sup>9)</sup>。また断面の粗さそのも

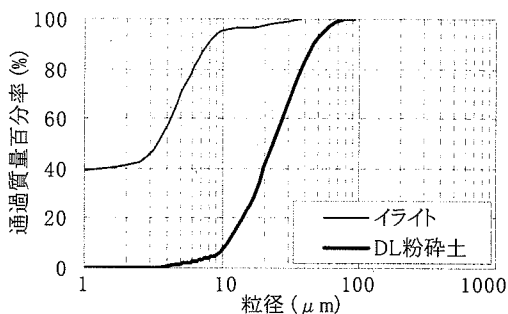


図-1 試料の粒径加積曲線

のに対して適用されたものとして、老化による皮膚表面の断面形状の変化を二次元フーリエ変換の手法を用いて定量的に評価したものがある<sup>10)</sup>。

これらの定量化手法をもとに、各粒子サイズに最適な測定条件および解析条件の導出を試みる。

## 2. 試料の作成

### (1) 試料の作成方法

本研究では粒子サイズに着目し、中国浙江省産のイライト、および群馬県と福島県の鉾山の原石（珪石と石英）を粉砕後ブレンドし10  $\mu\text{m}$ 以下の粒子を分級したDL粉砕土（昭和DLクレア：昭和鉱業製）の2つの粉末状の試料を用いた。DLとはドリフトレスの略で、もともとは農薬の飛散防止に用いられる材料である。表-1にはそれぞれの主な物理特性を、図-1には粒径加積曲線を示している。イライトは粒径1~10  $\mu\text{m}$ 程度の粘土サイズ粒子が大部分を占める比較的粒径の小さい粘土試料であることがわかる。一方のDL粉砕土は粒径10~100  $\mu\text{m}$ 程度の粒子で占められており、シルト土となっている。イライトとDL粉砕土では粒子サイズが10倍程度異なっており、全体としてDL粉砕土の方が粒径の大きい粗い試料となっ

ている。また、DL粉碎土の液性限界、および塑性限界は試料と水分との吸着が弱く、測定不能につきNPとしてある。このことからDL粉碎土は粘土というよりも砂に近い挙動を示す状態であることが伺われる。これらの粉末試料をもとに試料を作成し、同時に圧密圧力の違いによる構造の変化を定量的に評価するため、1試料につき2つの圧密試験機を用いて、以下の要領で試料の作成と圧密試験を同時に行った。

粉末状態の試料に蒸留水を加えスラリー状にした後（イライトは液性限界の1.7倍程度になるように、またDL粉碎土は液状になる程度とした）、2つの圧密試験機に流し込み同時に载荷を行った。载荷荷重はまずどちらも9.8、19.6、39.2、78.4、156.8、280kPaの順で载荷を行い一旦9.8kPaまで除荷を行った。その後片方を解体し（室内構成試料）、もう一方は再び荷重増分比1で1256kPaまで圧密して除荷を行い（圧密後試料）、280kPaと1256kPaの応力履歴を持つ2つの試料を同時に作成し、比較した。载荷時間は最終荷重のみ3t線に到達した時点で圧密を打ち切り、その他の荷重段階は基本的に各荷重とも15分とした。

図-2には、イライト、DL粉碎土の室内構成試料に対する圧密試験結果を $e-\log p$ 曲線で示している。全般的に、DL粉碎土の間隙比はイライトに比べて小さく、圧密前後の間隙比の変化も小さい。

## (2) 顕微鏡の測定方法

本研究では、土の微視構造の観察および測定に超深度形状測定顕微鏡と呼ばれる光学式顕微鏡を用いた。理論上ではモニター画面上で倍率8000倍程度まで見ることが可能である。

本顕微鏡で使用可能なレンズと測定条件は表-2のとおりである。測定倍率は顕微鏡のレンズ倍率を示すが、倍率200倍と400倍はレンズ倍率100倍の光学ズームによる倍率を示している。本顕微鏡の測定倍率100倍は走査型電子顕微鏡（SEM）の約800倍に相当する。倍率10倍のレンズで測定後、その箇所を移動させることなく次の倍率のレンズに切り替える形で測定しており、測定場所はすべての倍率でほぼ共通させている。断面形状をデジタルデータに変換した際のデータ数はどの倍率においても1024×768（個）であり、x方向、y方向の測定間隔も測定倍率に応じて変化する。測定ピッチとは高さ方向（z方向）のデータを測定する際の高さ方向の測定間隔である。また、高さ方向の測定精度は0.03 $\mu\text{m}$ 程度で、レンズ倍率100倍でおおよそ100 $\mu\text{m}$ 程度の深さまで測定できるが、深度の極めて深い部分がノイズとして測定される場合があるため留意する必要がある。

顕微鏡を用いた観察および測定は室内構成試料および

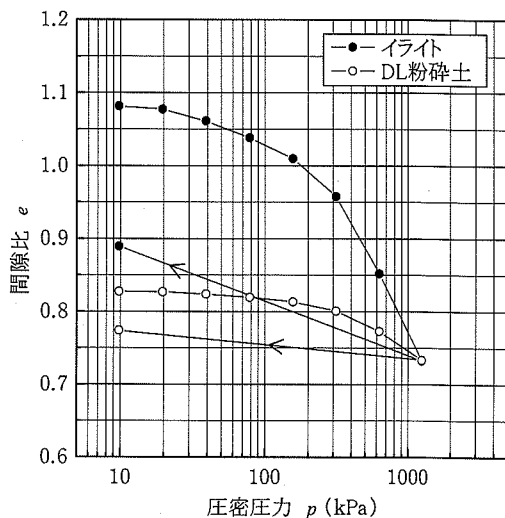


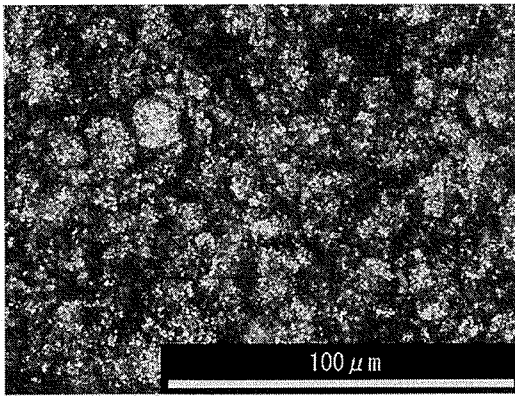
図-2  $e - \log p$  曲線

表-2 顕微鏡の測定条件

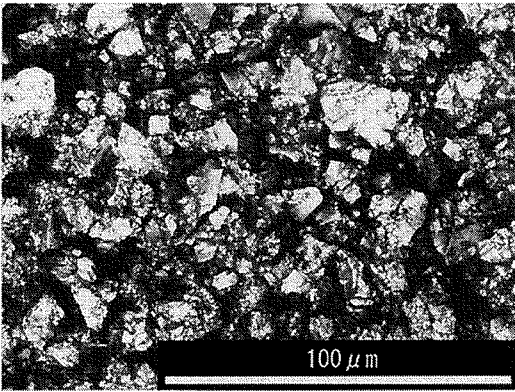
測定倍率 (倍)	測定範囲		測定ピッチ ( $\mu\text{m}$ )	測定間隔 ( $\mu\text{m}$ )
	縦( $\mu\text{m}$ )	横( $\mu\text{m}$ )		
10	1479	1109	0.5	1.457
20	739	554	0.2	0.728
50	295	221	0.1	0.291
100	147	110	0.05	0.146
200	73	55	0.05	0.073
400	37	28	0.05	0.036

圧密後試料について行った。測定の際、試料はなるべく中心部分を切り出した後、あらかじめ10mm×10mm×20mmほどの大きさの直方体に整形し、真ん中に切れ目を入れ、3日から7日ほど常温で含水比が5%以下になるまで空気乾燥させる。そして、顕微鏡による観察・測定を行う際に試料を切れ目から手で割り、その断面を観察・測定する。各試料ごとに圧密方向に対して直角な方向の断面（水平断面：H断面）と、圧密方向に対して平行な方向の断面（鉛直断面：V断面）の2つの断面を測定し、その形状の変化を比較するものとした<sup>11)</sup>。なお、測定断面数は、各試料、各断面ごとに5つずつ測定した。測定された断面データは、多変数最小二乗法による断面の傾き補正とノイズの除去を行った後解析に用いた。

図-3は、イライトおよびDL粉碎土の再構成直後（圧密前）の水平断面を顕微鏡により観察し、それらを光量画面（グレースケールにより表現した断面写真）で示したものである（測定倍率100倍、写真の幅は横約150 $\mu\text{m}$ 、縦約110 $\mu\text{m}$ ）。イライトは細かい粒子で断面形状が構成されており、この測定倍率でも粒子の形状まで確認することはできない。細かい土粒子が塊状にまとまった状



(a) イライト



(b) DL粉砕土

図-3 各試料の断面写真

態で数多く存在しており、それらが様々なサイズで分布している。また、空気乾燥法では試料にある程度の乾燥収縮が生じるため、イライト粒子のサイズを上回る大きさの凹凸が断面に見受けられる。一方、DL粉砕土はイライトに比べて粒子サイズが大きく、表面が平滑で角の尖った結晶のような粒子で構成されており、ごつごつした粗い印象を受ける断面であるのがわかる。所々に土粒子間に大きな空間が存在し、粒子同士の結合力が弱い状態であることが伺われる。

### 3. 解析手法

#### (1) $S_m$ 値

表面性状を示す指標について、JIS規格では断面曲線に対して様々なパラメータが定められており、そのうちの凹凸の平均間隔を用いて表したものが $S_m$ 値である<sup>12)</sup>。一般には、断面の凹凸データの中からある一定の長さ(基準長さと呼ぶ)の直線部分を任意に取り出し、その

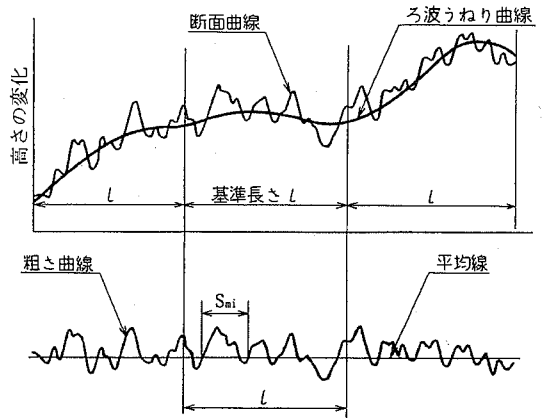
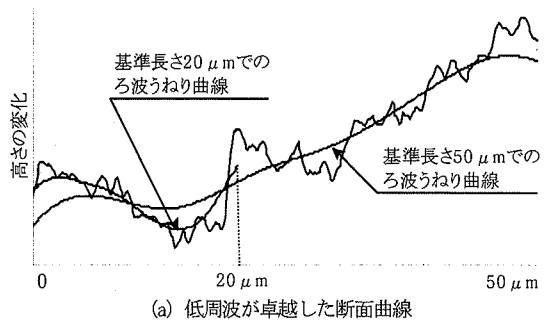
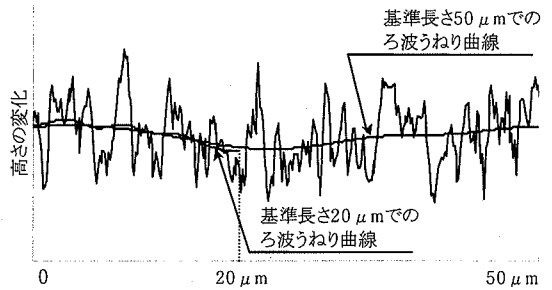


図-4 粗さ曲線の求め方<sup>12)</sup>



(a) 低周波が卓越した断面曲線



(b) 高周波が卓越した断面曲線

図-5 断面曲線とろ波うねり曲線の関係

凹凸の度合いを凹凸の間隔によって測るものである。その手順としては、まず任意に取り出した断面曲線をガウシアンフィルタ(正規分布と同型)と呼ばれる重み関数で端から順に移動平均値を求め、ろ波うねり曲線を得る。これを平均線とし断面曲線とこの平均線との偏差を次々に求め、粗さ曲線を得る(図-4)。この粗さ曲線において、平均線をまたぐかたちで一つの山と谷とが隣り合う部分に相当する平均線の長さの和、すなわち凹凸の間隔を求める。これを基準長さの範囲で繰り返す行い、それぞれの凹凸の間隔の算術平均値を求めたのが $S_m$ 値である。式では以下のように表わされる。

$$S_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_{mi} \quad (1)$$

ここに、 $S_{mi}$  : 凹凸の間隔、  
 $n$  : 基準長さ内の凹凸の間隔の個数

したがって、例えば $S_m$ 値が大きい場合には凹凸が大きい幅で存在することから平坦な断面であると判定され、小さい場合には凹凸が多数存在することから粗い断面であると判定される。

また、 $S_m$ 値を求める際の基準長さが長くなるほど、粗さ曲線に含まれる低周波成分も大きくなるため、 $S_m$ 値は増加していくことになる(図-5(a))。その傾向はうねりの多い断面ほど大きい。逆に、基準長さを短くすると、除去できる低周波成分が大きくなり $S_m$ 値が小さくなる傾向があるが、評価する長さが短いことによる誤差が大きくなる。ただし、高周波成分の振幅が大きい断面の場合には、基準長さの長短はほとんど $S_m$ 値に影響しない(図-5(b))。

$S_m$ 値を求める際の基準長さの選定については、規格においても明確に定められていないため、これまでは粘土の粒子サイズに合わせて任意に定めてきた<sup>7)・8)</sup>。しかしながら、今回のイライトとDL粉碎土のように粒子サイズの著しく異なる場合には、同一の基準長さであっても、得られる断面曲線が粒子表面の凹凸か、それともベッドによって形成される凹凸か、など示すものが異なる可能性がある。

そこで、各基準長さに応じてる波うねり曲線が求められるように解析プログラムを作成し、 $S_m$ 値を求めることにした。また、 $S_m$ 値を求める際の基準長さは試料の粒子サイズに合わせて2.5, 5, 10, 20, 30, 40, 50 $\mu\text{m}$ の7種類とし、基準長さが変化することによる $S_m$ 値への影響を調べた。測定には倍率100倍で測定した断面データを用いた。粗さ曲線を求める際に必要なデータ幅は基準長さの2倍であり、この測定断面でこれ以上の長さはプログラム範囲の都合上不可能であるので今回は行っていない。断面曲線は1断面につき縦、横方向に50個ずつ断面全体にわたって均等に抽出した。したがって結果として示される値は500個のデータを平均したものである。

ここで、 $S_m$ 値の特性をみるため、最も平坦な断面の例としてカミソリ刃(刃厚0.1mm)の表面と、最も粗い例としてそれを複数枚重ねた時の側面とを顕微鏡で測定したデータを用いて解析を行った。図-6に断面写真を示す。測定倍率100倍でのカミソリ刃側面は刃と刃の間隔が大きいため(刃厚と同じ0.1mm程度)、測定倍率20倍で測定したデータを倍率100倍でのデータに変換して

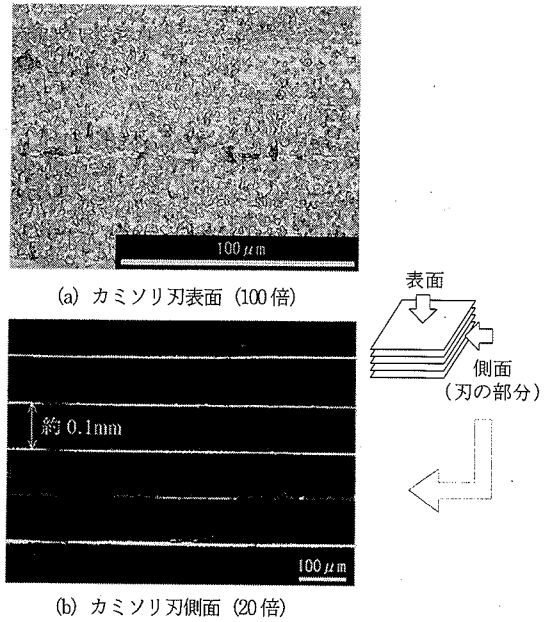


図-6 カミソリ刃の断面写真と概念図

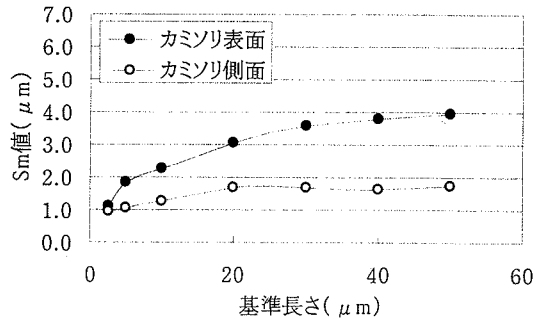


図-7 カミソリ刃の $S_m$ 値

用いた(縦横の測定データの数はどの倍率でも同じであるため、データ間隔を100倍の0.14565 $\mu\text{m}$ とする)。ただし、隙間部分がノイズとして表れるため(図-5(b))、厳密にはカミソリ刃の側面とはいえないが、粗い例としては適切なことから検討対象として用いるものとした。また、カミソリ刃側面については図の縦方向の $S_m$ 値のみを求めている。

図-7にその結果を示す。多少の細かい凹凸があるもののカミソリ刃表面は平坦であるので、粗い側面よりも $S_m$ 値は大きくなる。しかし、ある程度の基準長さになるとその増加傾向も頭打ちになる。これはカミソリ刃表面がうねりの少ない極端に平らな断面であるため、ある程度の基準長さになるとうねりの影響がほとんど現れず、値の増加が小さくなるものと考えられる。一方、極端に

粗い側面は全体としてあまり変化がない。これは断面の細かい凹凸がうねりに対して極端に大きいためほとんどうねりの影響が出てこないためである。刃と刃の間隔は測定倍率20倍では約0.1mm (100 μm) で、これを倍率100倍に置き換えると1/5の約20 μmとなるが、得られるSm値は1~2 μm程度であるため、このカミソリ刃の間隔とは関連がない。おそらく、隙間部分の測定ノイズをSm値として捉えているものと考えられる。したがって、極端に粗い側面は、画面上での評価はできるがSm値評価の対象にはできないと判断される。

イライト、DL粉碎土のSm値の基準長さに対する変化を、圧密前後でそれぞれ図-8、図-9に示している。どの試料も基準長さが長くなるに従ってSm値が漸増しており、減少する傾向はほとんど見られない。圧密前の結果を見ると、イライト、DL粉碎土とも水平断面と鉛直断面とであまり有意な差はみられない。逆に圧密後のSm値ではイライト、DL粉碎土とも水平断面の値が鉛直断面の値よりも大きくなっており、特にイライトでその傾向が大きい。これは水平断面が鉛直断面に比べて平坦な傾向が強いことを意味している。圧密前後で比較して考えると、圧密前には圧密圧力が弱く、配向性が小さかったためSm値に明確な差は見られなかったが、圧密圧力が増加することにより、圧密前よりも配向性が高まり、結果として明確にその傾向が強く現れたものと考えられる。

図-10には基準長さ50 μmでのイライト、DL粉碎土の代表的な断面曲線の高さの変化を示している。イライトが比較的うねりが小さくほぼ均等に凹凸が分布しているのに対して、DL粉碎土は凹凸の少ない比較的平坦な部分と局所的に凹凸の変動が激しい部分が存在する。このDL粉碎土の平坦な部分は粒子サイズからみて、粒子表面の凹凸を示しているものと考えられる。このような凹凸の不均一性と断面のうねりが、DL粉碎土のSm値がイライトに比して大きくなる原因になっているものと思われる。

以上のことから、粘土の場合、Sm値を各粘土に固有な値として粗さの評価に用いることは難しいものの、基準長さなどの条件が同じであれば、各試料の相対的な粗さの比較に用いることはほぼ可能であり、粒子サイズの影響も明確に表されることが確認された。

## (2) フラクタル次元

フラクタル次元とは、大雑把に言えば断面全体の複雑さを定量的に表すパラメータである。ここでいう「フラクタル」とは、部分と全体が相似な関係を持っているような関係（自己相似性）を有するような構造のことを指し、これに「次元」の概念を当てはめることで、その断面の複雑さを表すものである。フラクタル次元を直線に当てはめると1(一次元)、まったく凹凸のない平面で

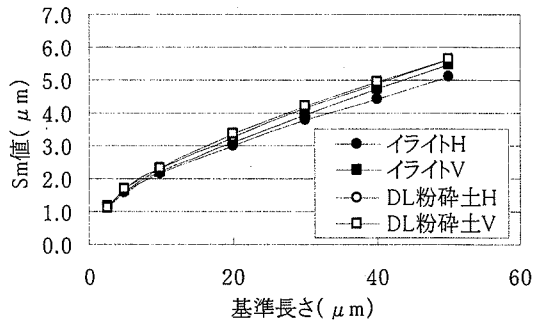


図-8 構成試料のSm値 (イライト、DL粉碎土)

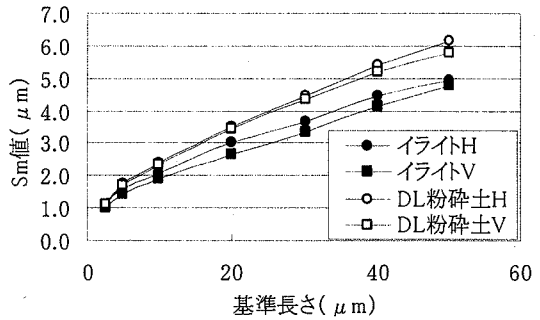


図-9 圧密後のSm値 (イライト、DL粉碎土)

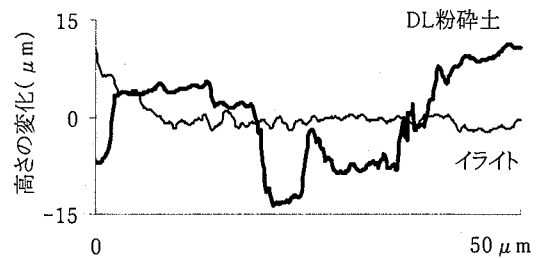


図-10 イライト、DL粉碎土の断面曲線

は2(二次元)になる。これを基準として、複雑な形状を持つ線ほど1以上2未満で大きくなり、面の場合も同様に複雑なほど2以上3未満で大きくなる。凹凸のまったく完全な平面を平坦であるとするならば、凹凸が多くなるほど複雑であると解釈できるので、測定断面のフラクタル次元が大きいほど断面の凹凸が複雑、すなわち粗い断面であると判断できる。

面を扱う場合のフラクタル次元を求める式は対数式で以下のように表わされる。

$$\log(\eta^2) = \log S_0 - \left(\frac{D}{2} - 1\right) \log \eta^2 \quad (2)$$

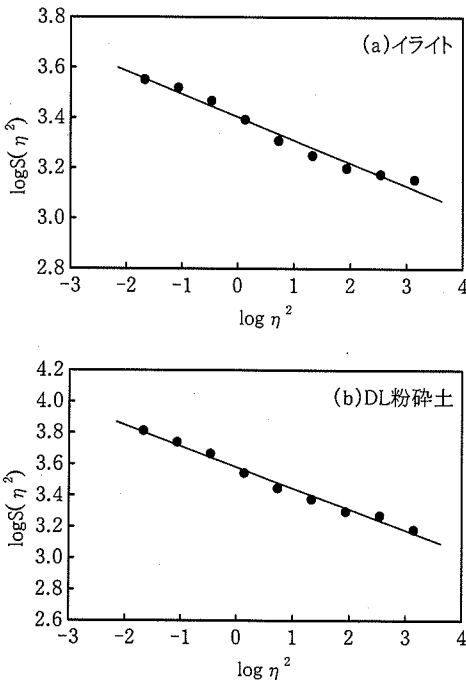


図-11 各試料の自己相似性 (測定倍率 100 倍)

ここで、 $\eta$  はメッシュ間隔、 $S(\eta^2)$  はメッシュ間隔  $\eta$  で測定した場合の測定断面積、 $S_0$  は定数、そして  $D$  が求めるフラクタル次元である。この式に従い、求めたい断面についてメッシュ間隔  $\eta$  で高さデータを計測し、そのときの断面全体の表面積を求める。このメッシュ間隔を何段階かに変化させ、そのときの面積  $S(\eta^2)$  を測定すれば  $\log S(\eta^2)$  と  $\log \eta^2$  の間に線形関係が認められる。その勾配  $k$  を最少2乗法によって求め、以下の式によりフラクタル次元  $D$  が得られる<sup>13)</sup>。

$$k = -\frac{D-2}{2} \quad (3)$$

断面データは1024×768個のデータで得られるため、解析を行う際は測定範囲を各測定倍率共通でデータ数で256×256の領域で12分割し、1断面ごとに12個のフラクタル値を求めた。したがって、5断面で60個の値を平均したものを結果として用いている。フラクタル次元を求める際のメッシュ間隔  $\eta$  はデータ数で1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128, 256個の9段階とした。なお、本解析では表面積はヘロンの公式を用いて求めており、フラクタル次元は小数点3桁まで求めた。

図-11に測定倍率100倍でのイライト、DL粉砕土の

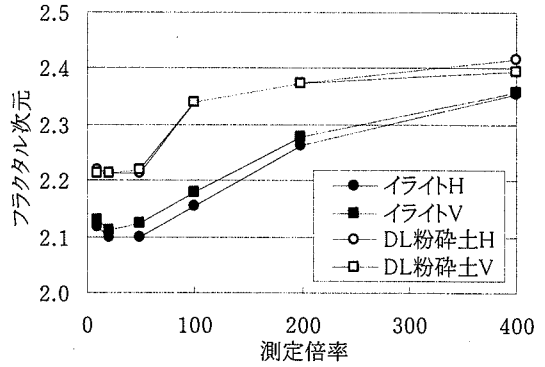


図-12 フラクタル次元 (圧密前)

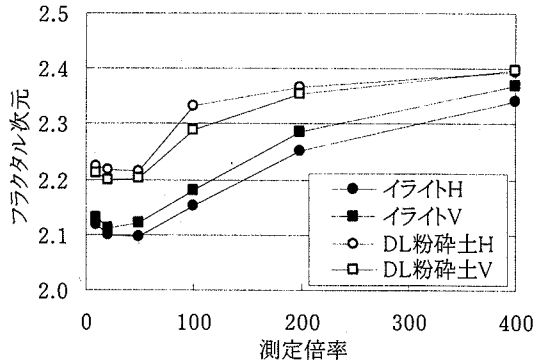


図-13 フラクタル次元 (圧密後)

$\log S(\eta^2) - \log \eta^2$  の関係を示す。土試料の断面においても直線関係が得られており、ある程度の自己相似性を有しているのがわかる。

圧密前後のイライト、DL粉砕土の測定倍率によるフラクタル次元の変化を図-12および図-13に示す。どちらの試料も圧密前後に共通して、測定倍率50倍までフラクタル次元はほぼ一定であるが、100倍以降は倍率が上がっていくにしたがって、フラクタル次元も急激に増加していくのがわかる。また、どの測定倍率においてもイライトとDL粉砕土とは明確に異なっている。

イライトはどの倍率においても鉛直断面の値が水平断面に比べて大きくなっており、水平方向に平坦な配向的な構造であることが示されている。圧密後は、水平断面の値が減少し、鉛直断面の値は増加する傾向にあり、とくに測定倍率200倍で最もその傾向が現れている。したがって、イライトは圧密圧力が上がることにより、水平断面はより平坦に、鉛直断面はより粗くなっていく様子が表現されており、圧密により配向性が高まっているといえる。一方、圧密前のDL粉砕土の水平断面と鉛直断面のフラクタル次元はほぼ同じで、構造にあまり違いがないことがわかる。圧密後は全体的に鉛直断面の値が減少しているものの、粒子サイズを考慮すると、ほぼ変化

していないものと判断できる。

DL粉碎土のフラクタル次元は粒子サイズとほぼ同程度の波長と振幅を持った凹凸が卓越しているため、イライトに比べて大きくなっている。また、DL粉碎土は測定倍率200倍以上での増加傾向が若干鈍くなる。測定倍率200倍における測定範囲は50 $\mu\text{m}$ 程度で(表-2)、DL粉碎土の平均粒径に近い幅であるため、むしろ粒子表面の細かい凹凸を捉えることが多くなるものと考えられる。イライトとの差も測定倍率が上がるにつれて小さくなっており、凹凸の度合いがイライトのそれに近づいていることが伺われる。

図-14には各測定倍率で測定された断面曲線を示している。ただし、各倍率毎に測定条件や精度等が異なるため、得られた高さデータを測定間隔で割って、測定間隔に対する高さの変動度合いで示してある。測定倍率が上がることによって断面のうねりも大きくなり、とくに倍率100倍ではかなり変動の度合いが大きくなっているのがわかる。フラクタル次元もほぼこれに則した形で増加しており、その値にうねりの度合いが大きくなっているといえる。これは、肉眼では平らな紙の表面でも、顕微鏡で見ると凹凸を持った面が現れることから考えても容易に理解しやすい。

フラクタル次元において粒子サイズの影響はどの倍率においても明確に現れており、どの倍率においても相対的な評価に用いることが可能であるといえる。とくにイライトのような細粒土の場合には、倍率50~200倍程度で水平断面と鉛直断面との差が最も明確に現れる傾向にあり、圧密前後における構造変化の定量的な評価も可能である。これは、この倍率で比較的細粒土のペッド構造がはっきりと捉えられていることによるものと考えられる。また、DL粉碎土のようなシルト程度の粒子サイズでは、粘土のような特別な構造を有しておらず、砂のようにほぼ粒子によって構造が成り立っているため、今回行ったような応力レベルでは構造に変化がなく、定量化解析には適さないことがわかった。

### (3) 二次元フーリエ変換

二次元フーリエ変換とは、一定間隔で刻まれる変動波形を低周波から高周波まである範囲の周波数毎に分解してそれぞれの強度(パワースペクトル)を求め、その周波数分布から与えられた波形の特徴を見出すフーリエ変換の解析手法を、二次元すなわち平面に対して拡張したものである。

表面形状の値は座標 $f(x, y)$ で与えられているが、実際の $f(x, y)$ は $x, y$ 方向に一定間隔で与えられた離散量であるため、この場合の求める二次元離散フーリエ変換の係数 $C(m, n)$ は次式で与えられる。

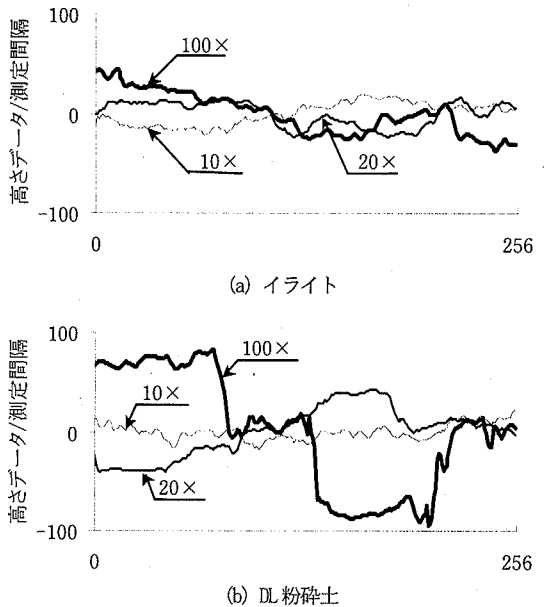


図-14 測定間隔に対する高さの変動度合い  
(横幅は解析時のデータ範囲)

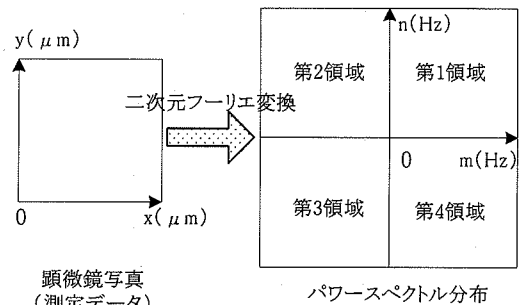


図-15 二次元フーリエ変換の概念図

$$C(m, n) = \frac{1}{MN} \sum_{k=0}^{K-1} \sum_{l=0}^{L-1} \left\{ f(kdx, ldy) e^{-2\pi j \left( \frac{mkdx}{M} + \frac{nldy}{N} \right)} \right\} dx dy \quad (4)$$

- ここに、 $m$  :  $x$  軸方向の空間周波数
- $n$  :  $y$  軸方向の空間周波数
- $M$  :  $x$  軸方向の測定範囲
- $N$  :  $y$  軸方向の測定範囲
- $dx$  :  $x$  軸方向の測定間隔
- $dy$  :  $y$  軸方向の測定間隔
- $K$  :  $x$  軸方向の測定点数
- $L$  :  $y$  軸方向の測定点数
- $k$  : 測定データの  $x$  軸方向の測定番号



$$(kdx = x)$$

$l$  : 測定データの  $y$  軸方向の測定番号  
( $ldy = y$ )

二次元フーリエ変換では図-15に示されるようなパワースペクトル分布に変換され、断面の傾きやうねりといった波長の長い緩やかな変化は低周波、それよりもかなり波長の短い細かい凹凸の変化は高周波として、各空間周波数ごとに表現される。例えば、 $x$  方向に5Hz、 $y$  方向に10Hzの波長を有する断面にこの二次元フーリエ変換を行った場合には、空間周波数  $m = 5\text{Hz}$ 、 $n = 10\text{Hz}$  の部分をピークとするスペクトル分布が得られる。ただし、ここでいう空間周波数1Hzとは、例えば、解析範囲が  $5\mu\text{m}$  の場合には  $5\mu\text{m}$  を1周期とする正弦波を表している。

二次元フーリエ変換には、文献10) で用いられた解析ソフトを使用し、解析範囲はフラクタル次元と同様に各倍率共通でデータ数で  $256 \times 256$  個とした。この解析ソフトを用いて得られる解析結果は、このデータ範囲の場合には両軸とも  $0 \sim 25.5\text{Hz}$  の空間周波数分布として  $0.1\text{Hz}$  刻みで得ることができる。これを  $y$  軸方向について正方向 ( $0 \sim 25.5\text{Hz}$  : 第1領域) と負方向 ( $0$  から  $-25.5\text{Hz}$  : 第4領域) に対して行った。空間座標系の第2領域は第4領域と、第3領域は第1領域と対称で、全く同じデータが得られるので、得られた値を等倍している。また、フラクタル次元と同様に、このデータ範囲では1断面につき12個のデータが得られるので、各試料5断面より60個のデータが得られ、それらを平均した値を最終的な結果とした。

例として、図-3で示したイライトの断面に対してこの二次元フーリエ変換を行い、パワースペクトル分布で示したものが図-16である(ただし、図は第1領域のみで、図の奥に原点がある)。一般的に粗さ曲線に対して二次元フーリエ変換を適用すると、このような原点付近にピークを持ち、高周波部分にいくほどスペクトル値も小さくなるという結果が得られる。これは、波長が短くなるほど振幅も小さくなることを示している。

得られたパワースペクトル分布はそのままでは定量化解析に用いることができない。そこで、この二次元フーリエ変換によって得られるパワースペクトル分布を用いて以下の2つの方法で定量化を行った。

図-17にその概念図を示す。二次元フーリエ変換によって得られるパワースペクトル分布は原点から遠くなるほど高周波であることを示している。方法1とは、この特性を利用して原点からの距離を  $r$  とし、その距離でのパワースペクトルの総和を求めるものである。その際の周波数の刻みについては、事前の解析により  $1\text{Hz}$  刻みでよい結果が得られたため、 $1\text{Hz}$  間隔でパワースペクトルの総和を求めることとした。

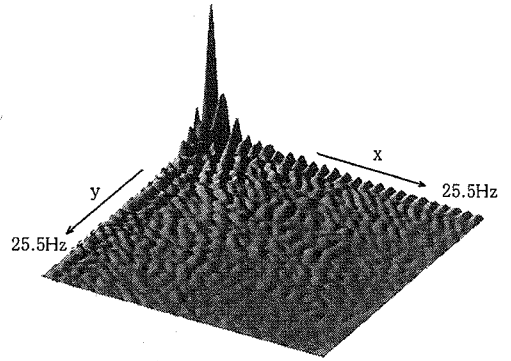


図-16 イライトのパワースペクトル分布  
(図-15の第1領域部分)

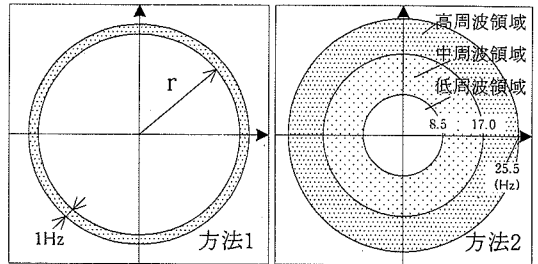


図-17 定量化手法の概念図

方法1によるイライト、DL粉砕土の圧密前後のパワースペクトル曲線を図-18に示す。図は周波数を各測定倍率における波長に変換し、1つの図に合成したものを示している。測定倍率100倍の  $1\text{Hz}$  の場合、解析範囲(データ数)  $\times 100$  倍での測定間隔  $= 255 \text{個} \times 0.14565 \mu\text{m} = 37.1 \mu\text{m}$  で計算される。粗さ断面のパワースペクトルは支配的な波長成分が現れることは稀で、一般的に高周波側へ行くにしたがって、指数関数的に減少し、両対数グラフではほぼ右下がりの曲線となる。イライトとDL粉砕土もこの傾向にしたがって右下がりの曲線となっており、全般的にDL粉砕土のパワースペクトルの値がイライトを大きく上回っている。このパワースペクトルは大きくなるほどその周波数の度合いが強いことを示しており、同じ周波数でも振幅が大きく変動が激しいと判断できる。したがって、どの倍率においてもDL粉砕土の断面が変動が大きく粗い断面であるといえる。

また、イライトについてみると水平断面の値が鉛直断面の値より低く、比較的平坦な断面であることがわかる。圧密後は、特に測定倍率  $100 \sim 400$  倍で水平断面の値が低く、鉛直断面の値が高くなる傾向にあり、圧密によって構造の配向性がより高まっていることが読み取れる。一方のDL粉砕土は、水平断面と鉛直断面のパワースペクトルがほぼ同程度か、あるいは水平断面の値が鉛直断面の

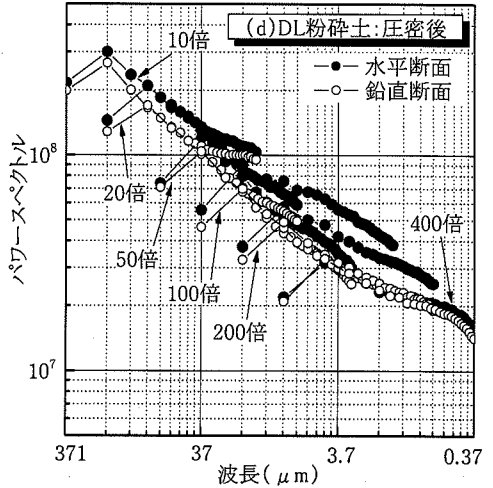
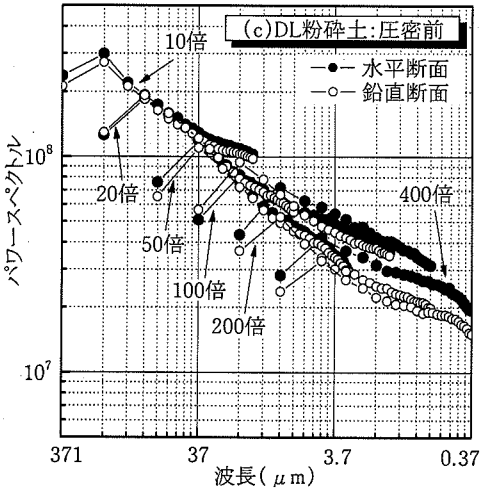
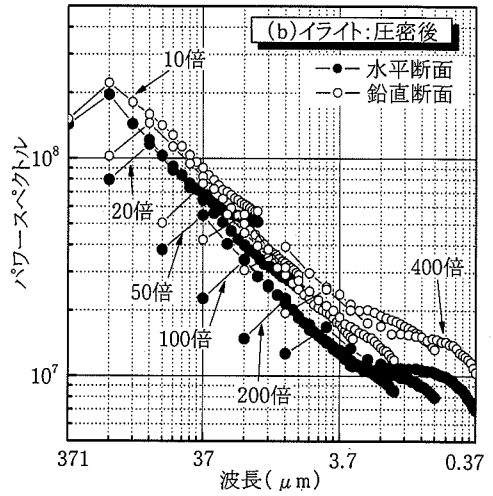
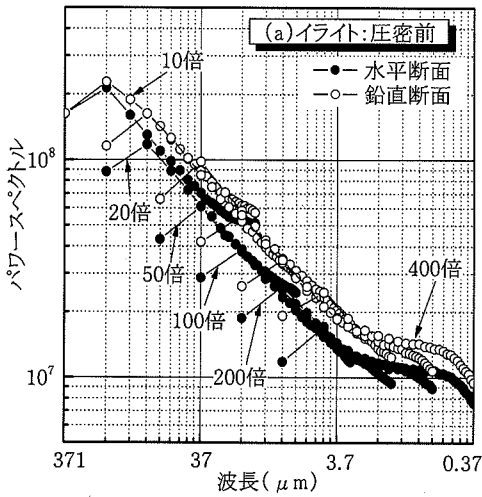
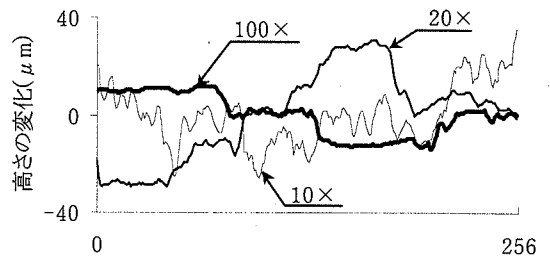
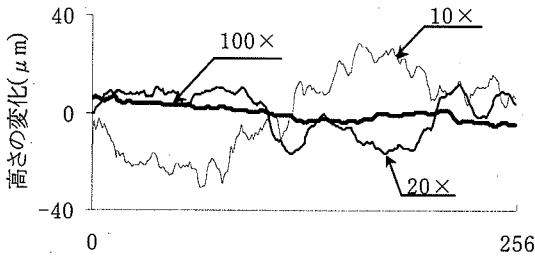


図-18 各試料の方法1による二次元フーリエ解析結果



(a) イライト

(b) DL粉砕土

図-19 各測定倍率における断面曲線 (横幅は解析時のデータ範囲)

値を上回る傾向にあり、圧密前後の変化もまちまちで、その構造の変化を読み取ることが難しい。

測定倍率の影響をみると、倍率が上がるにしたがって、徐々にパワースペクトルが減少していくのがわかる。こ

れは図-19に示されるように、倍率が上がるにしたがって、高さの変化そのものが相対的に小さくなっているためであると考えられる。また、さらに図-18を検証すると、測定倍率が上がるにしたがって、徐々にパワースペ

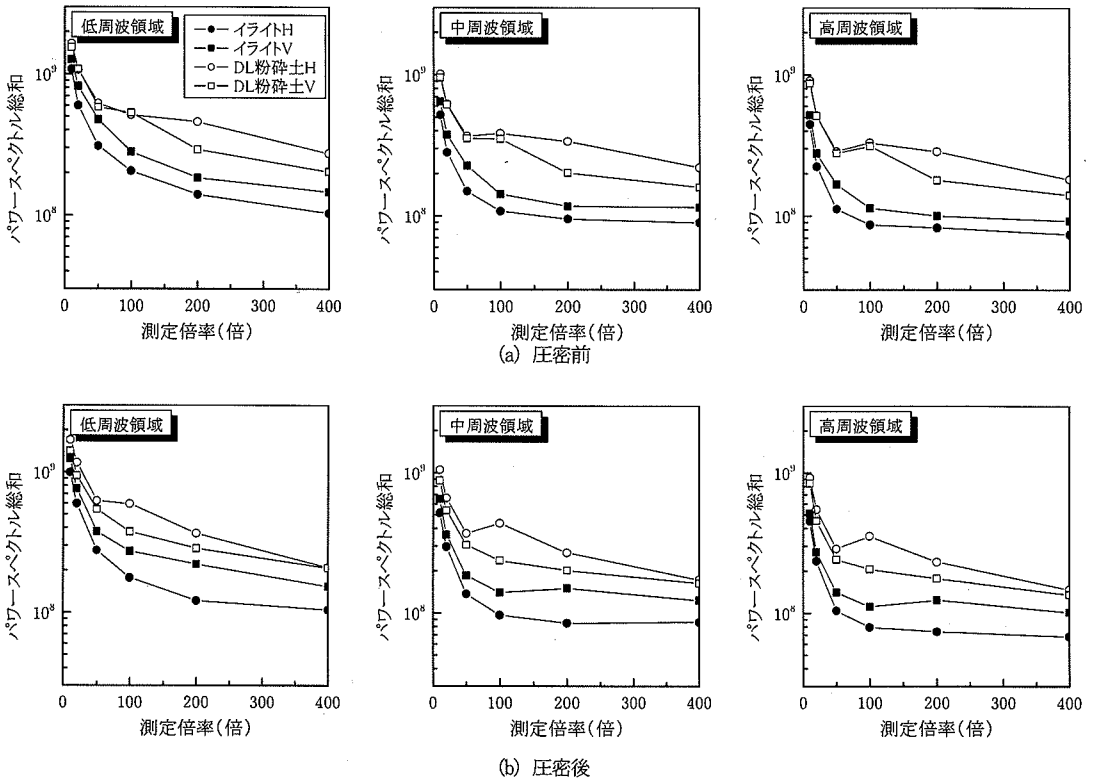


図-20 各周波数領域におけるパワースペクトルの総和と測定倍率の関係

クトルの曲線の傾きが緩やかになっている。そこで、再度図-19をみると、測定倍率が上がるにしたがって徐々に断面全体の低周波的なうねりが減少し、細かい凹凸の変動しか見られなくなるのがわかる。ゆえに、このパワースペクトルの曲線の変化は、測定倍率が上がるにしたがって断面全体の変動が緩やかになり、徐々に測定断面に占める細かい凹凸の割合が大きくなっていることを示していると考えられる。このような傾向はとくにイライトでははっきりと読み取ることができる。

方法1では粗い断面ほどパワースペクトルの値も大きくなることから、方法2としてパワースペクトル強度そのものに着目し、得られた空間周波数分布を周波数毎に領域で分割して、その領域でのパワースペクトルの総和を求めた。パワースペクトルの総和は高周波になるにしたがって、指数関数的に減少しており、全体の総和を求めるよりも周波数領域ごとに総和を求めて検討するのが適当と考えられるため、単純に測定範囲を、低周波領域(0~8.5Hz)、中周波領域(8.5~17.0Hz)、高周波領域(17.0~25.5Hz)の3つの領域に3等分し、それぞれのパワースペクトルの総和を求めるものとした(図-17)。

圧密前後におけるそれぞれの周波数領域ごとの結果

を図-20に示す。イライトとDL粉碎土のパワースペクトルは測定倍率が上がるにしたがって徐々に減少していく傾向にあり、とくにイライトの減少度合いが大きいため、測定倍率が上がるほどその差もより明瞭に現れてくるのがわかる。どの測定倍率においてもDL粉碎土のパワースペクトルがイライトに比べ高い値を示す傾向にあり、測定倍率100倍程度でその傾向が最も明確に現れる結果となっている。したがって、DL粉碎土は全体的に断面形状の変化が激しく、イライトに比べて粗い断面であることがこの結果からも読み取れる。

イライトは、圧密前後とも鉛直断面に比べて水平断面の値が小さくなっており、鉛直断面に比べて水平断面の方がやや粗さの度合いが低い平坦な断面であることが示されている。特に測定倍率100倍と200倍では、圧密後は水平断面の値が減少し、鉛直断面の値が増加するため、圧密前よりもその傾向がいつそう強くなる。一方のDL粉碎土は、圧密前後ともに水平断面の値が鉛直断面を上回る傾向にあり、圧密前後の変化もイライトに比べて工学的な解釈が難しい。これはDL粉碎土の粒子サイズがイライトに比べて極端に大きく、砂のような単粒構造的な試料であるために、今回行った程度の応力レベルではその

粒子配列に変化を生じにくく、定量化評価には適さない試料であると判断される。

以上より、方法1では、パワースペクトル曲線の上下関係が各断面の粗さの度合いを示すとともに、測定倍率が上がるにしたがって測定断面全体の変動が小さくなることが示された。方法2では、定量化により得られたパワースペクトルの値から、かなりわかりやすく構造の変化を捉えることが可能であることが確認された。

また、イライトのような細粒土であれば、圧密前後の構造変化や配向性をほぼ明確に示しており、測定倍率を100程度以上にすると方法1、方法2とも良い傾向の結果が得られる。これは、細粒土ではペッドサイズ程度の凹凸が得られる倍率であると考えられる。この倍率ではフラクタル次元も大きく、断面構造がよりはっきりと捉えられており、粘土の微視構造の評価に最適な倍率であると考えられる。また、二次元フーリエ変換とフラクタル次元とは結果がある程度一致し、よい相関性を持つといえる。

#### 4. まとめ

$S_m$ 値、フラクタル次元、二次元フーリエ変換の3つの定量化手法を用いて、粒子サイズおよび測定倍率に着目して微視構造の定量化解析を行った。本研究により、以下のことが明らかになった。

- ①  $S_m$ 値では基準長さが長くなるにつれて得られる値もほぼ漸増的に大きくなり、粒子サイズが大きくなるとの大きい断面を持つDL粉碎土の $S_m$ 値がイライトに比べて大きくなる傾向を示した。
- ②  $S_m$ 値は、基準長さなどの条件を揃えた上で各試料の粗さを相対的には評価できるが、各試料に固有な値として捉えることは難しい。
- ③ 測定倍率が上がるにしたがって、断面全体のうねりの度合いが大きくなることにより、フラクタル次元は大きくなる。また、粒子サイズの大きいDL粉碎土ほどの倍率においてもイライトに比べて高い値を示した。
- ④ フラクタル次元および二次元フーリエ変換の方法1、方法2とも、イライトのような細粒土であれば圧密前後の構造の変化をほぼ定量的に評価できる。とくに、二次元フーリエ変換の方法2による定量化手法は、細粒土の微視構造を定量化して評価するのに適した手法であることが示された。
- ⑤ イライト程度の細粒土の場合、細粒土のペッドサイズの凹凸が良く捉えられる測定倍率100倍以上でよい傾向の結果が得られ、粘土の圧密前後の構造変化

の評価に最適な倍率であるものと考えられる。また、この倍率ではフラクタル次元と二次元フーリエ変換とも一致した評価ができ、よい相関が見られる。

- ⑥ 一方で、今回用いたDL粉碎土では、どの定量化手法においても圧密前後の構造の変化を示すことができなかった。これは、今回用いたDL粉碎土が単粒構造の砂に近い構造であったため、粘土のような特別な構造を持たず、圧密による構造の変化が小さかったものと考えられる。ゆえに、今回用いた定量化手法は、イライトや自然粘土など、微視構造を有した細粒土程度の粒子サイズの土に適したものであるといえる。

今後さらに研究を進めることによって、粘土試料の水平断面と鉛直断面とを比較し、定量化した微視構造指数と $C_c$ 、 $m_v$ といった粘土の圧縮特性およびその他の力学特性との相関性についての評価を行うことが可能になるものと考えられる。

#### 参考文献

- 1) 重松宏明：年代効果を受けた自然堆積土の微視的構造と力学挙動の解明、岐阜大学博士論文、2002。
- 2) Yong, R.N. :Interactions in clays in relation to geoenvironmental engineering, *Clay Science for Engineering*, pp.13-28,2001.
- 3) Pusch, R., Moreno, L., and Neretnieks, L:Microstructural modeling of transport in smectitic clay buffer, *Clay Science for Engineering*, pp.47-51,2001.
- 4) 森脇武夫, 和田陽子：圧密時の温度環境が粘土の微視的構造と力学特性に及ぼす影響、粘土地盤における最新の研究と実際—微視的構造の観察から長軟弱埋立て地盤対策技術まで—に関するシンポジウム, pp.41-46, 2002.
- 5) 風間秀彦：粘性土の微視的構造と圧密・せん断特性に関する研究、埼玉大学博士論文、1996.
- 6) 湊太郎：土の電気的性質と微視的構造および変形挙動に関する研究、東海大学博士論文、2001.
- 7) 足立格一郎, 小熊真吾, 京野功他：粘土の微視構造の $S_m$ 値による解析とその力学挙動への影響に関する研究、土木学会第56回年次学術講演概要集, III-A149, pp.298-299, 2001.
- 8) 足立格一郎, 宮永慎也他：粘土の微視構造のフラクタル次元解析、土木学会第56回年次学術講演概要集, III-A165, pp.330-331, 2001.
- 9) 兼松学, 北垣亮馬, 野口貴文, 友澤史紀：二次元フーリエ変換によるコンクリートの汚れの評価手法に関する基礎的研究、コンクリート工学年次論文集, Vol.22-1, pp.211-216, 2000.
- 10) 大栗基樹：皮膚形状計測と皮膚の老化に関する研究、芝浦工業大学博士論文、2000.

- 11) 八嶋厚, 重松宏明: 土の構造とメカニクス—マイクロから  
マクロへ— 2. 土の微視的構造を探索するための実験的研究 (そ  
の2), 土と基礎, 講座, Vol. 50, No. 3, pp. 62-67, 2002. に関する基礎的研究, 日本建築学会構造系論文報告集, 第  
445号, pp. 19-24, 1993.
- 12) JIS B0601 表面粗さ— 定義および表示, 1994. (2003.9.18 受付)
- 13) 三橋博三, 梅岡俊治, 三浦悟: セメント硬化体の破面解析

## STUDY ON THE QUANTITATIVE ANALYSIS OF THE MICRO-STRUCTURE OF CLAY

Jun KODAMA and Kakuichiro ADACHI

It is important to analyze quantitatively the micro-structure of clay and to correlate the results with the mechanical behavior of clay. Studies are conducted on consolidated Illite and DL-soil samples, and the Color Laser 3D Profile Microscope is used.  $S_m$ -value, Fractal dimension and Fourier transformation are employed for the analysis. The results from these quantifications show some influence of measurement conditions. Thus, the measurement conditions must be carefully selected. The results of the analysis indicate the difference of the particle size of the samples and the change of the micro-structure of the samples before and after the consolidation, especially by Fractal and Fourier methods.