HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	埋没黒ボク土の圧密特性におよぼす土壌構造の影響
Author(s)	矢沢, 正士; 池端, 克則; 前田, 隆; 佐々木, 清一
Citation	北海道大学農学部邦文紀要, 11(3), 210-222
Issue Date	1979-05-25
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/11919
Type	bulletin (article)
File Information	11(3)_p210-222.pdf

Instructions for use

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

埋没黒ボク土の圧密特性におよぼす土壌構造の影響

矢沢正士・池端克則
前田　隆・佐々木清一
(北海道大学農学部農業工学科土質改善学教室)
(昭和53年6月25日受理)

The Effect of Soil Structure on the Consolidation Properties of Buried "Kuroboku-soil"

Masao YAZAWA, Katsunori IKEHATA, Takashi MAEDA and Seiichi SASAKI
(Laboratory of Soil Ameriolation, Faculty of Agriculture, Hokkaido University, Sapporo, Japan)

I. 緒　言

一般に黒ボク土と呼称されている有機質火山灰土壌は，近年全国的な視野からの調査研究がなされており，その地質学的・土壌学的・土木工学的な特性が明らかにされつつある。北海道においても火山性の黒ボク土は広い範囲に分布しており，農地土壌として利用されていることはもち論であるが，粗粒火山灰土のような新期の火山性土壌の直下に黒ボク土が存在する（すなわち埋没黒ボク）ような場合には，混層耕・反転客土耕のような土層改良工に利用されることも多く，農業土木的にみても近年注目されている対象の一つである。

このように黒ボク土を直接農地土工の対象として扱う際には，原地盤の土壌を撹乱して利用する場合が多いと思われるので，これらの土壌の理工学的性質を問題にする場合には，土壌の撹乱によってその理工学的性質がどのように変化するのかを検討する必要がある。また同時に黒ボク土の特性を決定的に支配していると思われるその高い有機物（腐植）含量の存在が，土壌の撹乱による土の理工学性の変化にどのような影響をおよぼしているかも問題になろう。

黒ボク土の理工学性の一つとしての圧密特性に関しては，すでに九州の黒ボク[1]や関東ローム[2]についての報告があり，いずれも一般の飽和粘土の圧密挙動とはかなり異った性格を有することが示されている。すなわち，有機物含有量の増加に伴い，圧縮指数は増加するが圧密係数は低下すること，他の粘性土に比較して二次圧密が顕著なことなどが報告されているが，同時にこれらの圧密諸定数値は，供試体の撹乱による土壌構造の変化によっても顕著に影響されることが示され，圧密挙動と土壌構造の相互関係を明確にする必要があることが指摘されている。

本報告では，北海道の黒ボク土の圧密特性の一事例として，道内では典型的な黒ボク地帯である道南地方の駒ケ岳系の埋没黒ボク土を用いて，主として土壌構造との関連で圧密挙動の検討を行った。すなわち，腐植を多量に含む表土（埋没表土）と腐植の少ないその下層土について，供試体の初期状態（撹乱程度）を変化させたマクロな土壌構造の観点からその圧密挙動を比較検討するとともに，表土に関しては，土粒子表面の吸着カチオン種を変化させた場合の土粒子間力に基づくミクロな土壌構造の観点からの検討も行ない，若干の知見を得たのでここに報告する。

II. 供試土および実験方法

1. 供　試　土

供試土として，八雲町落部地区より採取した駒ケ岳f火山灰層に相当する埋没黒ボク土の表土（埋没表土）とその下層土を用いた。供試土の概要を Table 1 に示す。

Table 1 によると，粒度組成では表土と下層土の間に大きな差異は認められないが，有機物（腐植）含有量は表土で28.1%，下層土で2.8%と約10倍の差があり，この有機物含有量の差異が表土と下層土の他の物理性に大きな影響をおよぼしていることが理解される。

Table 1. Physical properties of tested soils

Sample		Surface Soil	Subsoil
*Grain-Size Distribution	Sand (%)	48.9	51.7
	Silt (%)	21.7	23.8
	Clay (%)	29.4	24.3
*Soil Texture		LiC	CL
Organic Content (%)		28.1	2.8
Specific Gravity		2.31	2.75
Dry Density (g/cm³)		0.392	0.895
LL (%)		173.5	60.1
PL (%)		107.3	36.8
PI (%)		66.2	23.3

* International Method

2. 実験方法

圧密実験を行うための供試体としては，不撹乱土・突固め土・練返し土という初期構造の異なる3種類を用い，各2連で実験を行なった。

練返し土は，4.8 mm フルイを通過せしめた生土に注水練返しを行ない，含水比を液性限界 (LL) 付近に調整してから圧密リングに充てんした。突固め土は，2 mm フルイを通過させた自然含水比状態の試料を，内径 10 cm のモールドに JISA-1210-70 に規定されている第一方法 (2.5 kg ランマー使用) に従って突固めたものを使用した。圧密リングに充てんした際の各供試体の特性を Table 2 に示す。

Table 2. Initial properties of undisturbed, remoulded and compacted soils

Sample	Dry Density (g/cm³)	Initial Void Ratio	Degree of Water Saturation (%)
Surface Soil			
Undisturbed	0.394	4.87	69.7
Remoulded	0.452	4.10	100.0
Compacted	0.448	4.15	80.6
Subsoil			
Undisturbed	0.812	2.36	64.5
Remoulded	1.000	1.75	99.6
Compacted	0.947	1.90	80.5

Table 2 のうち，供試体の初期間ゲキ比の値についてみると，表土・下層土ともに3種の供試体中最も初期間ゲキ比が高いのは不撹乱土である。また圧密リング充てん時の水分飽和度は，練返し土ではほぼ100% で飽和状態にあるが，不撹乱土と突固め土のそれは 60～80% であり，不飽和となっている。一般的な Terzaghi の圧密理論は飽和粘性土に対して適用可能であるから，不飽和土の圧密実験を行なってもその解析が困難となる。このため不撹乱土と突固め土については，圧密試験開始前に，ポーラスストーンを通して供試体を蒸留水で毛管飽和させたのち圧密試験を行なった。

圧密試験の方法は，JIS を改訂した土質工学会セン断試験法委員会案[3] に従った。またいわゆる一次圧密と二次圧密を分離するための方法としては，原則的には曲線定規法を用い，曲線定規法をうまく適用できなかった不撹乱土については $\sqrt{t}$ 法を用いた。

III. 実験の結果と考察

1. e～log p 曲線

荷重と間ゲキ比の関係をあらわす表土と下層土の e～log p 曲線を，それぞれ Fig. 1, Fig. 2 に示す。図中の破線は，最終荷重 (12.8 kg/cm²) の沈下終了後，最初の荷重 (0.05 kg/cm²) まで一気に除荷したさいの除荷過程を示している。

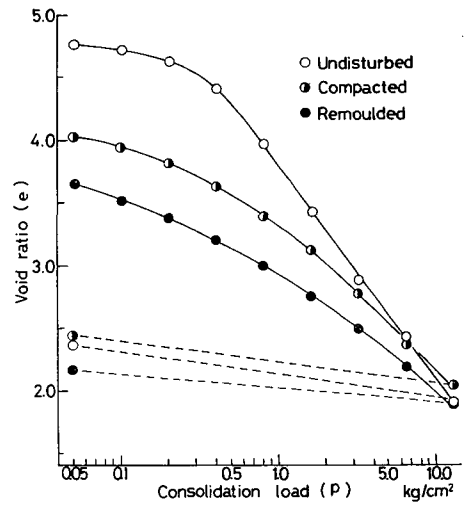

Fig. 1. Comparison of e-log p curves for three samples of surfrce soil (dotted line: unloading process)

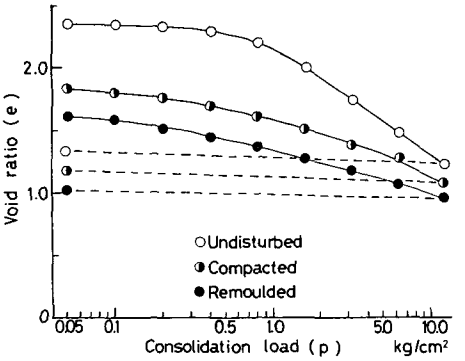

Fig. 2. Comparison of e-log p curves for three samples of subsoil (dotted line: unloading process)

e～log p 曲線において，表土・下層土ともに不撹乱土では，初期の圧密圧力におけるほとんど間ゲキ比の変化しない領域と，その後の急激かつ直線的に間ゲキ比の変化する領域の両段階が明瞭に認められ，前者はいわゆる過圧密領域であり，後者は正規圧密領域であって，とくに下層土で顕著に現われている。これに対して，練返し土と突固め土では，全体として湾曲した形態を示し，不撹乱土のように過圧密・正規圧密の類別をするのは不可能である。

不撹乱土については，その e～log p 曲線の形態からみて，圧密降伏応力 p_y と圧縮指数 C_c を求めることが可能である。p_y の値は，実験結果から表土で 0.410 kg/cm², 下層土では 0.92 kg/cm² と算出され，下層土の方が大きいが，これは現実の土層の構成状態（層序，土カブリ圧など）からみて適当な値と思われる。一方，正規圧密領域の直線のコウ配を示す C_c を求めてみると，表土では 1.807，下層土では 0.852 が得られ，有機物を多量に含む表土の圧縮性は下層土と比べてはるかに大きいことを示している。一般に C_c の大きさは，土の物理的性質のうち液性限界 LL や初期間ゲキ比 e_0 に依存しており，それらの関係を示す実験式もいくつか提出されている[4]が，Table 1 に見られる LL や乾燥密度が表土と下層土で大きく異なることから考えて，これらの C_c の値の差異は容認されうるものと思われる。

初期構造を異にする3つの e～log p 曲線を比較してみると，同一試料であってもその撹乱の程度により，同一圧密圧力における間ゲキ比の値はかなり異なっている。とくに圧密圧力が初期の段階の間ゲキ比の値を比較すると，不撹乱土＞突固め土＞練返し土の順になっている。しかし圧密圧力が最終段階の 12.8 kg/cm² に近づくと，各曲線は接近し，とくに表土の場合には，ほとんど一致した間ゲキ比の値を示すようになる。これらの事実を，各供試体の土粒子の骨組構造の観点から考察してみると，不撹乱土の場合には，自然に形成された土粒子の骨組構造が安定的な状態で存在しており，このため p_y に達するまでの沈下量（すなわち間ゲキ比の変化）は小さく，かつ弾性的な変形が生じていると考えられる。一方，不撹乱土を乱して，練返しや突固めの操作を加えることにより，不撹乱土の安定な骨組構造は破壊され，より不安定な構造状態に変化するため，初期の圧密圧力の段階でも沈下量は大でかつ塑性的な変形が生じていると思われる。練返し土と突固め土の e～log p 曲線の比較から，練返し土が最も不安定な構造状態にあり，突固め土は不撹乱土と練返し土の中間的な構造状態を有していることが推定される。

Schmertman[5]は，種々の撹乱状態の試料を用いて圧密試験を行なった場合，不撹乱土の初期間ゲキ比を e_0 とすると，$0.42e_0$ の点ではすべての e～log p 曲線は一点に会することを報告している。今回のわれわれの実験では，表土の e～log p 曲線においてほぼ同様の結果が得られている。すなわちその状態においては，試料の撹乱程度にかかわらず，変形に抵抗する粒子間の反発力と圧密応力のつり合いの位置がまったく等しくなるような粒子間平均距離に達しており，その段階では不撹乱土の安定な骨組構造は消失したとみなされる。一方，下層土の場合は，各供試体の初期の間ゲキ比の大きさの順位が圧密の最終段階に至るまでそのまま継続して存存しており，表土のようにほとんど一致するには至らない。したがって，下層土の不撹乱土の骨組構造の安定性は表土よりかなり大きいことがわかる。

2. 体積圧縮係数

表土と下層土の体積圧縮係数 m_v と平均圧密圧力 $\bar{p}$ の関係を，それぞれ Fig. 3, Fig. 4 に示す。

Fig. 3, Fig. 4 から，表土・下層土ともに，練返し土と突固め土に関しては，両対数スケールで m_v は $\bar{p}$ の増大に伴いほぼ直線的に減少しているが，不撹乱土については，$\bar{p}$ の変化にかかわらず m_v がほぼ一定の値を示す初期の段階と，その後の $\bar{p}$ の増加とともに直線的に減少する段階の2段階を有している。不撹乱土と乱した試料の間にみられるこのような差異は，前述した e～log p 曲線の形態の差異と直接的に対応している。すなわち，不撹乱土では，圧密降伏応力に達するまでの間ゲキ比の変化はわずかであるため m_v の変化も小さいが，圧密降伏応力をすぎると間ゲキ比の変化が急激に増大するため，練返し土や突固め土と同様に直線的に m_v は減少するよ

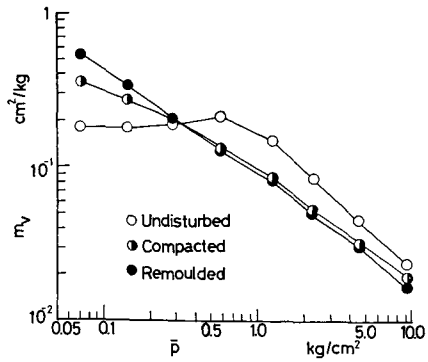

Fig. 3. Relationship between coefficient of volume comperessibility (m_v) and averaged consolidation load ($\bar{p}$) for surface soil.

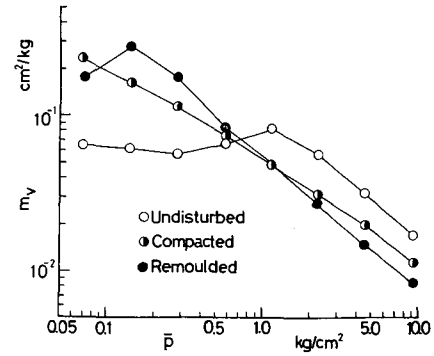

Fig. 4. Relationship between coefficient of volume compressibility (m_v) and averaged consolidation load ($\bar{p}$) for subsoil.

うになるのである。Fig. 3, Fig. 4 において，不撹乱土の m_v が急激に折れ曲がる点の $\bar{p}$ の値を読むと，表層・下層土ともに圧密降伏応力の値よりも高くなる傾向がある。これは，原位置にあった試料の地中拘束圧力がサンプリングする時に解除され，その影響のため折れ点の $\bar{p}$ の値が圧密降伏応力の値よりも高くなったと考えられる[6]。

同一 $\bar{p}$ における不撹乱土・練返し土・突固め土の m_v の値を比較すると，やはり各 e～$\log p$ 曲線の特徴を反映した傾向が得られている。すなわち，$\bar{p}$ が p_y よりも低い初期の段階の m_v は，練返し土>突固め土>不撹乱土の関係にあるが，$\bar{p}$ が p_y 以上になるとこの関係が逆転して，不撹乱土>突固め土>練返し土の順となり，供試体の初期構造，すなわちマクロな土粒子の骨組構造の安定性が，体積圧縮係数に対しても顕著な影響を与えていることを明瞭に示している。

3. 時間・圧密沈下量曲線

圧密特性において，前述した荷重と沈下量の関係は，最終沈下量を推定するために必要であるが，同時に沈下の時間的推移が圧密速度を考えるうえで重要である。時間を対数軸で表示した場合の不撹乱土の時間・圧密沈下量曲線 (d～$\log t$ 曲線) を，Fig. 5 (表土)・Fig. 6 (下層土) に，練返し土のそれを Fig. 7 (表土)・Fig. 8 (下層土) に，突固め土のそれを Fig. 9 (表土)・Fig. 10 (下層土) に示す。

各沈下量曲線を不撹乱土・練返し土・突固め土別に比

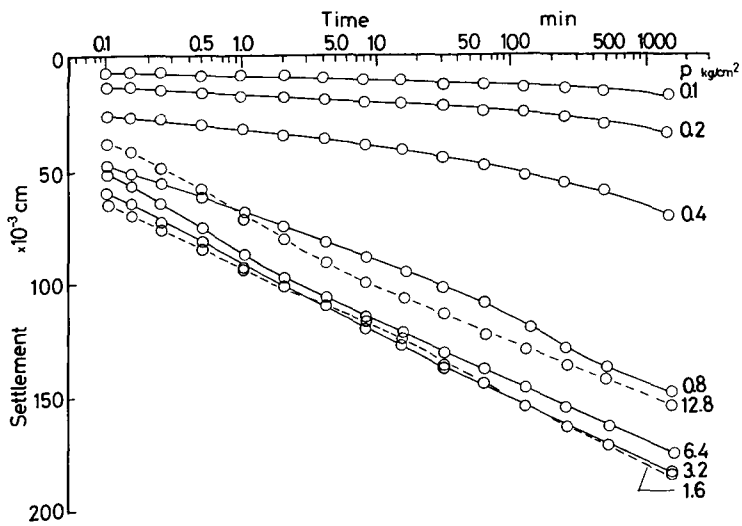

Fig. 5. Time-settlement curve for undisturbed sample of surface soil.

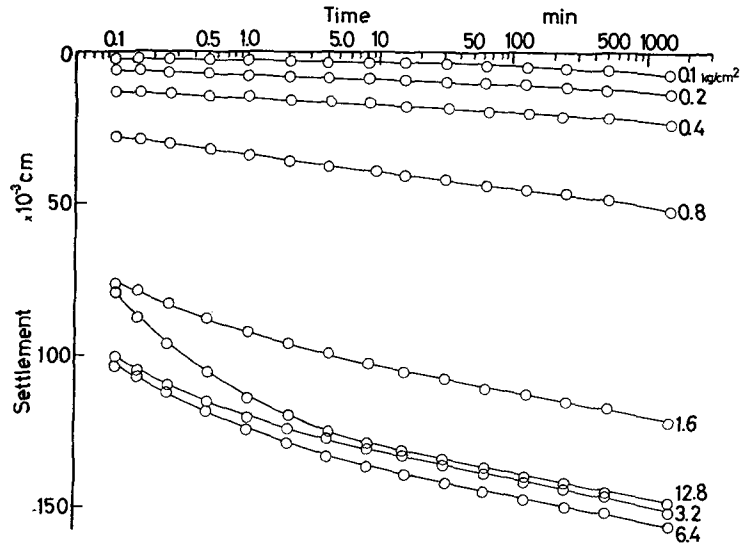

Fig. 6. Time-settlement curve for undisturfed sample of subsoil.

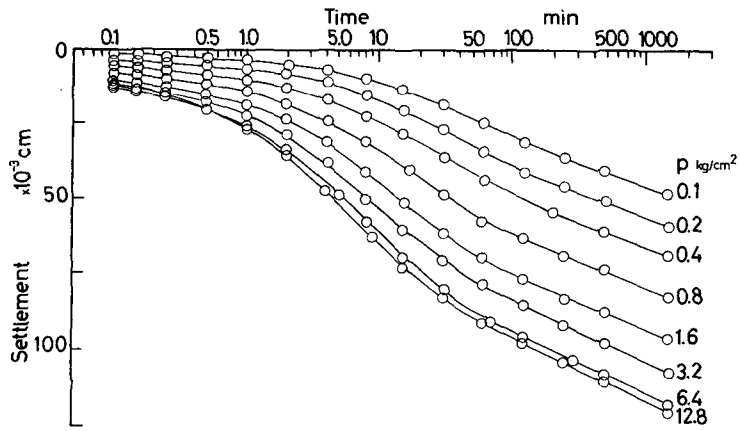

Fig. 7. Time-settlement curve for remoulded sample of surface soil.

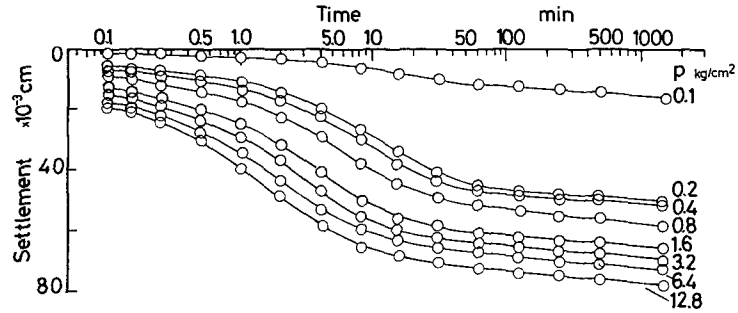

Fig. 8. Time-settlement curve for remoulded sample of subsoil.

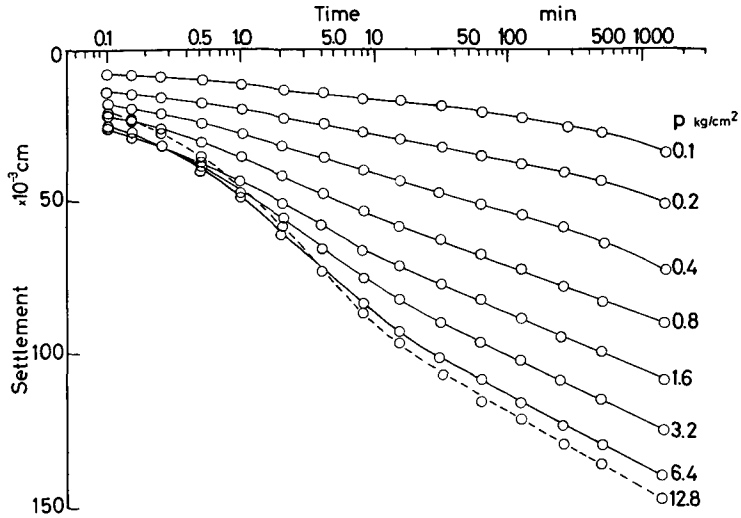

Fig. 9. Time-settlement curve for compacted sample of surface soil.

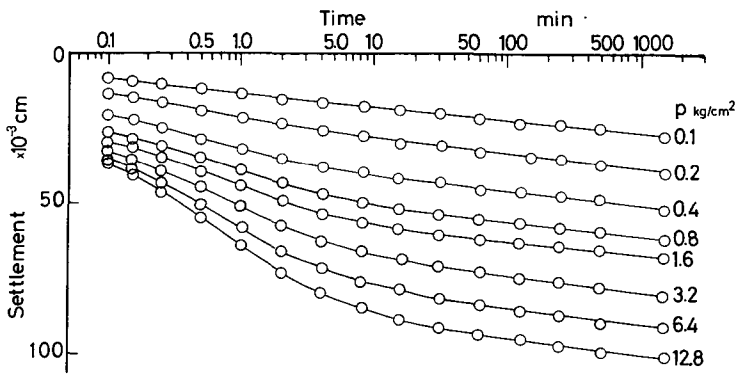

Fig. 10. Time-settlement curve for compacted sample of subsoil.

較してみると，一見してわかるように，その形態上の差異がかなり明確に存在している。一般に，飽和粘土の圧密試験に際して得られる沈下曲線の内容は，載荷直後の即時沈下，Terzaghi の圧密理論に従う一次圧密，およびその後の理論に従わない二次圧密の3段階から成っており，とくに最後の二次圧密段階は $\log t$ 軸に対して直線状となり，いわゆるクリープ型の変形挙動とされている。これらの3段階の沈下過程が，今回得られた各沈下曲線においてどのように現われているのかを検討してみる。まず Fig. 5 の表土の不撹乱土の場合には，観測時間内にかからない即時沈下と，観測時間内では $\log t$ 軸に対してほぼ直線的な二次圧密が存在し，いわゆる Terzaghi 型の一次圧密領域はほとんど認められない。ただし二次圧密的とはいっても，$\log t$ 軸に関して完全な直線状とはならず，圧密圧力が変化するとともにその形状は幾分異なっている。すなわち，表土の圧密降伏応力近傍以下（ここでは $p=0.4$ kg/cm² 以下）の圧密圧力では，沈下量が極めて少ない（前述）が，沈下曲線の形態も，載荷後1時間まではほぼ直線的であるが，それ以後では下側に折れ曲がる傾向を示している。この傾向は，圧密圧力が p_y 以上になり，沈下量が増大する $p=1.6$ kg/cm² までの沈下曲線でも明瞭に認められる。そして $p=3.2$ kg/cm² 以上の圧密圧力になると，今度は上側に折れ曲がる傾向を示し始め，この場合の初期の直線部分は，いわゆる Terzaghi 型の一次圧密部分の最後の部分が現われたとも考えることができる。

同じ不撹乱土でも下層土の場合（Fig. 6）には，載荷直後の即時沈下は表土よりも相対的に大きくなる傾向にあるが，観測時間内の沈下曲線の形状は表土と比べてより単純である。すなわち，下層土の圧密降伏応力近傍以

下（ここでは $p=0.8\ \mathrm{kg/cm^2}$ 以下）の圧密圧力では，沈下量は少なく，かつその形状はほぼ観測時間全域において一本の直線となり，典型的な二次圧密のみが現われている。圧密圧力が $1.6\ \mathrm{kg/cm^2}$ 以上になると，載荷後2分までのやや湾曲した部分と，その後のほぼ直線的な部分の2段階に分かれる。この場合の初期の湾曲した部分は，一次圧密の最終段階であることは明瞭である。

以上に述べてきたように，不撹乱土の沈下曲線を表土と下層土で比較した場合，一次圧密的な沈下曲線が観測時間内でほとんど認められないか，認められたとしてもきわめてわずかであるという点では共通しているのであるが，二次圧密とみられる部分の形状において，下層土ではほぼ直線的となるのに対し，表土ではより複雑となっている点が異なっている。これが表土に多量に含まれている土壌有機物（腐植）に起因しているのかどうかは今後さらに検討されねばならないが，そのさい各荷重段階の載荷時間を24時間で打ち切らずに，沈下がほぼ終息するまで継続して行なう，いわゆる長時間圧密などの実験を行なうことにより，表土の沈下曲線の特性がより明確になると思われる。

次に練返し土の時間・沈下量曲線（Fig. 7, Fig. 8）をみると，この場合には表土・下層土ともにほとんど同じような形状を示している。すなわち，即時沈下は一般に少なく，初期の湾曲した一次圧密領域とその後の直線的な二次圧密領域が全荷重段階において明瞭に認められる。表土と下層土の差異は，二次圧密領域の直線のコウ配に現われ，表土のコウ配が下層土よりもかなり大きいことが注目される。なおこのコウ配は，一般的には圧密圧力の増大とともに大きくなることが指摘されている[7]が，今回の結果では，表土・下層土ともにすべての圧密圧力でほぼ一定となっている。

一方，突固め土の時間・沈下量曲線（Fig. 9, Fig. 10）の形状は，全体として不撹乱土と練返し土の中間的な形態を示している。すなわち，圧密圧力の小さい段階では，不撹乱土でみられたように二次圧密的な直線またはそれに続く折れ曲がり線を示すが，圧密圧力が大きくなるにしたがい，練返し土と同じく一次圧密領域と二次圧密領域の区分が明確になっている。

上述したように，時間・沈下量曲線の形態も，$e\sim\log p$ 曲線や $\log \bar{p}\sim\log m_v$ 曲線と同じく，試料の初期構造により顕著に変化することが明らかとなったが，この場合にも，各供試体における土粒子の骨組構造とその裏返しとしての間ゲキ水の存在状態に対応させて考察することが可能である。すなわち，まず不撹乱土における土粒子の骨組構造は，自然に形成された発達した団粒構造となっており，この場合の間ゲキは団粒間間ゲキのような比較的粗大な間ゲキが多く存在する傾向がある[8]。したがって，系が圧密荷重により圧縮されるさいの間ゲキ水の流出は，粗大な団粒間間ゲキを通って容易に進行するであろうから，いわゆる間ゲキ水の動水抵抗による圧縮の時間遅れ現象，すなわち一次圧密はきわめて短時間に終了し，観測時間内では，吸着水の粘性抵抗による二次圧密のみが観測されるものと思われる。そして不撹乱土で一次圧密が観測されるのは，圧密圧力の増大により団粒構造が破壊され土粒子が再配列するため，粗大な団粒間間ゲキが微細化した状態になった段階であることも容易に理解される。一方，練返し土では，不撹乱土にみられるような団粒化した土粒子の骨組構造はすでに破壊され，土粒子と水がペースト状になって存在する土・水系としての構造を有すると考えられ，その間ゲキは均一な状態で微細化していると思われる。このため間ゲキ水の動水抵抗は大きく，すべての荷重段階において一次圧密領域がはっきり現われてくると考えられる。突固め土の場合には，不撹乱土における団粒化した土粒子の骨組構造と，練返し土の土・水系の構造の中間的なものと考えられ，時間・沈下量曲線もほぼ中間的な形態を有している。

以上のような形状を有する各時間・沈下量曲線の内容をより定量的に把握するため，曲線定規法あるいは $\sqrt{t}$

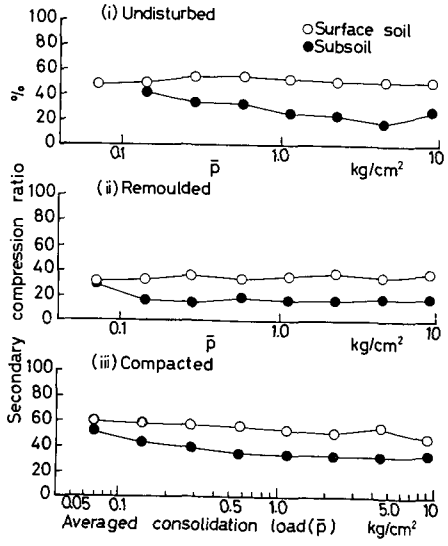

Fig. 11. Relationship between secondary compression ratio and averaged consolidation load for three samples.

法により，即時沈下・一次圧密・二次圧密を分離し，とくに表土と下層土の二次圧密量の差異に注目し，供試体の初期構造別の二次圧密比を比較したのが Fig. 11 である。

時間・沈下量曲線の形状からも定性的に推定されたのであるが，Fig. 11 における表土の二次圧密比は，不撹乱土・練返し土・突固め土のすべてについて下層土よりも大きく，10～25% ほどの差が生じている。このように，マクロな構造状態の異なる3種類の供試体のすべてについて表土の二次圧密比は下層土よりも大きくなっていることから，圧密沈下挙動において有機物の存在は，クリープ型の二次圧密を増大させていることは明らかである。一般に粘土の圧密現象において，間ゲキ水圧が完全に消散して荷重が全部有効応力になってからもなお沈下が継続するのは，Terzaghi 理論のように間ゲキ水の排除による変形の時間遅れの他に，有効応力によって粒子と粒子の接触部分の移動が生じ，粒子配列が変化して体積変化を生じるためであり，その粒子の接触部分の相対的移動にさいして，粒子表面の吸着水層の粘性抵抗が作用すると考えられている[9]。本実験で用いた表土の細粒部分は粘土・腐植複合体となっていると考えられる[10]が，その場合，表土の比表面積は腐植をほとんど含まない下層土よりも大となり[11]，結果的に土粒子と土粒子の接触部分の面積も下層土よりも大きくなる。このため，有効応力による粒子と粒子の接触部分の移動にさいしての土粒子表面の吸着水層の粘性抵抗の相対的寄与も大きくなり，表土の二次圧密を増大させたと考えられられる。

松尾ら[12]は，ヘドロのような軟弱な粘土の二次圧密を，有機物質によるセメンテーション作用と吸着水の粘性抵抗による要因とに分離し，とくに前者は有機物含有量に比例して増大することを報告している。これが，筆者らの有機質火山灰土壌に対してもあてはめることができるかどうかについては不明であり，今後の検討課題である。

4. 圧密係数・透水係数

前項で述べたような沈下曲線の形態および二次圧密比の値から考えて，とくに不撹乱土と突固め土については通常の方法により圧密係数 c_v を求めることの意義はきわめて低いと考えられる。しかし練返し土については，一次圧密領域が明瞭に存在し，曲線定規法によるフィッティングも無理なく行なうことができたので，表土と下層土の圧密係数を練返し土についてのみ比較したのが Fig. 12 である。

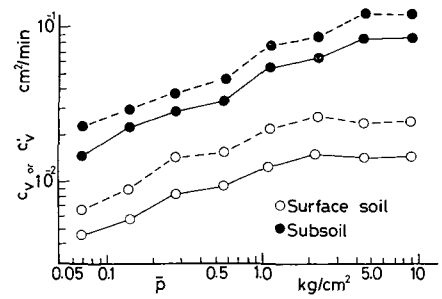

Fig. 12. Relationship between coefficient of consolidation (c_v, c'_v) and averaged consolidation load ($\bar{p}$) for remoulded sample (straight line : c_v, dotted line : c'_v)

Fig. 12 では，一次圧密領域のみにおける圧密係数 c'_v についても示したが，c_v・c'_v のいずれも，表土より下層土のほうが3～5倍ほど大きな値を示している。したがって，有機物（腐植）の存在は，圧密沈下速度を遅らせる方向に作用していることが判明した。

Fig. 13 は，圧密係数と同じく練返し土の透水係数 k と平均圧密圧力 $\bar{p}$ の関係を，表土と下層土で比較したものである。

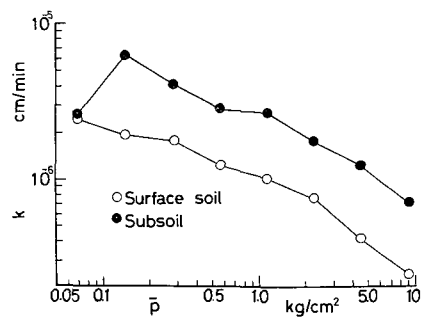

Fig. 13. Relationship between coefficient of permeability (k) and averaged consolidation load ($\bar{p}$) for remoulded sample.

透水係数についても，下層土の値は表土より2～3倍ほど大きく，表土の圧密係数を低下させている要因として透水係数の差があることが理解される。

5. 土・水系の構造と圧密特性

前項までは，埋没黒ボク土の圧密特性とマクロな土壌構造（不撹乱土の骨組構造とその破壊の程度）との関連について検討し，マクロな土壌構造の違いが，e～$\log p$ 関係，時間・沈下量関係の両者に対して顕著な影響をもたらしていることを明らかにした。本項では，土壌構造

に対するもう一つの視点であるミクロな土・水系としての土壌構造と圧密特性との関連に注目し，マクロ的には同じ練返し土であっても，土粒子間力に基づいたミクロな土・水系の構造が異なる場合には，その圧密挙動においてどのような影響が生ずるかを，表土について検討してみた。

一般に，土・水系の構造を決定している内部力としての粒子間力は，反発力（イオンの拡散二重層による反発力）と吸引力（London-van der Waals 力）とで説明され，近年，粘土の力学的性質との関連づけが試みられている。ここでは筆者らが用いている手法[13]により，土・水系の構造の異なる供試体を作製して圧密実験に供した。すなわち，土壌懸濁液中の電解質濃度を一定レベルに保ったさい，土粒子表面に吸着されているカチオンのイオン価により拡散二重層反発力の大きさが変動し，1価カチオンでは分散沈降を，2価カチオンでは凝集沈降を示す。この関係を利用して，本実験では単一カチオン吸着土として1価の Na 土と2価 Ca 土を作製したが，両者のモデル的な土・水系の構造としては，前者が反発力が優勢な配向構造を有するのに対し，後者は吸引力が優勢な綿毛化構造に相当すると考えられる[13]。

実際の供試体の作製にさいしては，分散沈降体としての Na 土と凝集沈降体としての Ca 土を遠心分離により脱水し，練返しを行なったのち含水比をほぼ LL に調整して圧密リングに充てんした。圧密リング充てん時の Na 土と Ca 土の諸元を Table 3 に示す。

Table 3. Initial properties of Na-soil and Ca-soil

Sample	Na-soil	Ca-soil
LL (%)	181.3	188.8
Initial Void Ratio	4.13	4.30
Degree of Water Saturation (%)	100	100

Table 3 において，初期含水比としての LL は Ca 土でやや大きい値を示しているが，これは筆者らがすでに報告[13]したように，Na 土と Ca 土の土・水系の構造の差異を直接的に反映したものである。

Na 土と Ca 土の圧密実験により得られた e～$\log p$ 曲線を Fig. 14 に，$\log \bar{p}$～$\log m_v$ 曲線を Fig. 15 に，また時間・沈下量曲線の一例を Fig. 16 (Na 土), Fig. 17 (Ca 土) に示す。

Fig. 14 の e～$\log p$ 曲線をみると，曲線全体の形は両者ともほとんど同一であり，前述した練返し土としての曲線形態を有している。しかし，同一圧密圧力における間ゲキ比の値を比較すると，すべての圧密圧力に対して Ca 土の値が Na 土の値よりやや大きくなっている。これは Table 3 の初期間ゲキ比の差異をそのまま反映したものとみなされる。

Fig. 15 の $\log \bar{p}$～$\log m_v$ 曲線についてみると，全体的には Na 土と Ca 土の差異はわずかであるとはいえ，初期の圧密圧力の段階（$\bar{p}$<0.4 kg/cm²）では，Na 土>Ca 土の関係が得られているが，やがてそれが逆転し，ちょうど Fig. 3, 4 の場合と類似した傾向を示している。この Na 土と Ca 土の $\log \bar{p}$～$\log m_v$ 関係における差異を，両者の土・水系の構造から考察してみる。すなわち綿毛化構造を有する Ca 土では，粒子間吸引力が支

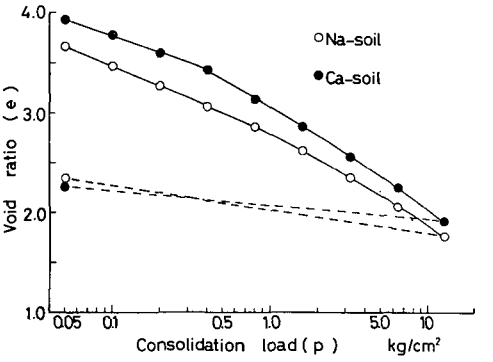

Fig. 14. Camparison of e-$\log p$ cvrves for Na-soil and Ca-soil (dotted line: unloading process).

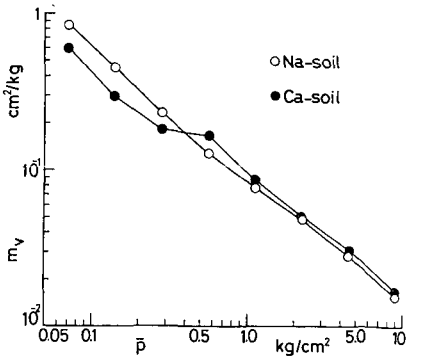

Fig. 15. Relationship between coefficient of volume compressibility (m_v) and averaged consolidation load ($\bar{p}$) for Na-soil and Ca-soil.

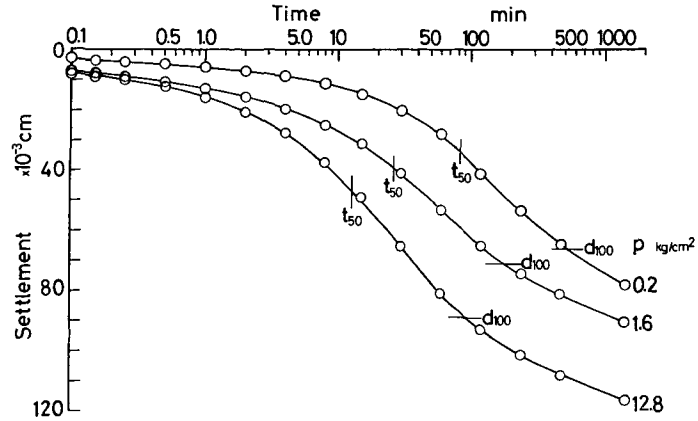

Fig. 16. Time-settlement curve for Na-soil.

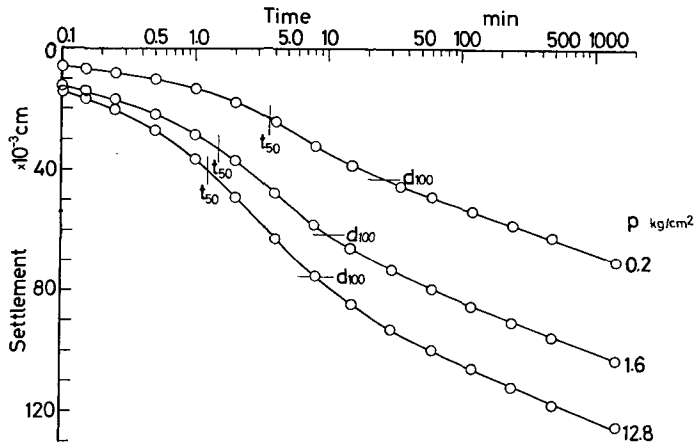

Fig. 17. Time-settlement curve for Ca-soil.

配的であるため，幾つかの土粒子が結合した凝集粒子となって存在している。一方配向構造を有する Na 土では，粒子間反発力が優勢であるため，Ca 土におけるような凝集粒子は存在せず，個々の土粒子そのものが配向した状態で存在している。Ca 土における凝集粒子は一つの構造単位を形成しており，そのために系は一定の構造的強度を有していると考えられる。したがってその構造的強度に対応するまでの初期の圧密圧力では，Ca 土の圧密沈下量は構造単位としての凝集粒子を有しない Na 土の沈下量より小さくなり，その結果 $\log \bar{p} \sim \log m_v$ 曲線の差が生じたと考えられる。

Na 土と Ca 土の差異は，時間・沈下量曲線 (Fig. 16, Fig. 17) において一層明瞭に現われている。曲線全体の形は，全圧密圧力において Na 土・Ca 土ともに Terzaghi 型の一次圧密領域が明瞭に認められ，かつその後のクリープ型の二次圧密も存在しているので，前述した練返し土の一般的性質を反映しているが，図中に示した曲線定規法による一次圧密終了時の沈下量 (d_{100}) と，50% 圧密に達する時間 (t_{50}) をみてわかるように，24 時間の観測時間内における一次圧密と二次圧密の量的割合，および一次圧密の進行速さにおいては大きな差異が存在している。このことは，Fig. 18 の平均圧密圧力と二次圧密比の関係，および Fig. 19 の平均圧密圧力と圧密係数・透水係数の関係をみるとより明白である。

Fig. 18 をみると，Ca 土の二次圧密比は Na 土のそれと比べて 20% ほど大きい値を示し，Fig. 19 の圧密係数と透水係数では約 10 倍 Ca 土で大きくなっている。マクロ的には同じ練返し土でありながら，土・水系の構造が異なるとこのような顕著な差異が Na 土と Ca 土に生ずるのは，前述した $\log \bar{p} \sim \log m_v$ 関係と同じく，両者の土・水系の構造における構造単位としての凝集粒子の存在の有無からただちに理解される。すなわち，綿毛化

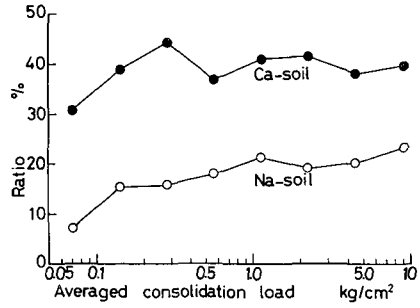

Fig. 18. Relationship between secondary compression ratio and averaged consolidation load for Na-soil and Ca-soil.

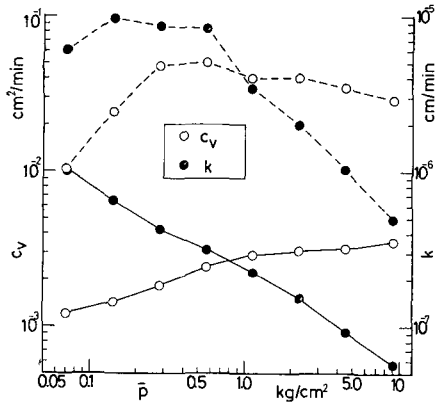

Fig. 19. Relationship between coefficient of consolidation (c_v), coefficient of permeability (k) and averaged consolidation load ($\bar{p}$) for Na-soil and Ca-soil (straight line: Na-soil, dotted line: Ca-soil).

構造を有する Ca 土では，構造単位としての凝集粒子が存在するため，その間ゲキには構造単位間の間ゲキと構造単位内の間ゲキとが存在する。構造単位間間ゲキは，系が圧密圧力を受けたさいの間ゲキ水の流出において，丁度不撹乱土の団粒間間ゲキと同じように水ミチとして作用すると考えられ，このため Ca 土の一次圧密は速やかに進行する。そして一次圧密の終了に伴い，その後は構造単位自体の変形が生ずるため，これが比較的大きな二次圧密領域として観測されるのである。一方，配向構造を有する Na 土では，Ca 土におけるような構造単位間の間ゲキは存在せず，間ゲキ水はすべて配向した土粒子の周囲に拘束された水となって存在している。このような状態の水は，系が圧密圧力を受けて流出するさいには，その間ゲキ径あるいは間ゲキの屈曲性の点から考えて，きわめて動水抵抗が大きくなることが予想される。このことは，筆者らが行なった Na 土と Ca 土の乾燥収縮実験におけるキ裂発生の面からも推定されている[14]。したがって，Na 土の一次圧密過程の進行速度はきわめて小さいものとなるが，反面，Ca 土におけるような構造単位としての凝集粒子は存在しないので，構造単位自体の変形に基づく二次圧密の存在は考えられず，このため二次圧密比は Ca 土より小さくなったと考えられる。

以上のように，マクロ的には同じ練返し土であっても，その土粒子間力に基づいたミクロな土・水系の構造が異なると，初密沈下の進行過程において大きな影響が現われることが明らかとなった。このことは，圧密挙動をも含めて，粘土質土壌の種々の理工学的性質を土壌構造の面から検討するさいには，マクロな土粒子の骨組構造と，よりミクロな土粒子間力に基づく土・水系の構造の両面から考える必要があることを示すものと考えられ，今後，土壌のマクロな構造とミクロな構造との関連性をより定量的に把握することが重要と思われる。

IV. 要　約

道内に広く分布する有機質火山灰土壌の一次元圧密特性の一事例として，道南の駒ヶ岳系の埋没黒ボク土の表土（埋没表土）と下層土を供試して，とくに土壌構造との関連で検討を行なった。

まず，不撹乱土・突固め土・練返し土というマクロな土粒子の骨組構造の異なる3種の供試体についての圧密実験から，次の結果を得た。

(1) 不撹乱土の圧縮指数 C_c の値からみて，有機物（腐植）を多量に含む表土の圧縮性は下層土より大きい。

(2) $e \sim \log p$ 曲線において，同一圧密圧力における間ゲキ比の値を比較すると，初期の圧密圧力の段階では，表土・下層土ともに，不撹乱土＞突固め土＞練返し土の関係が得られた。圧密圧力が最終段階に近づくと，表土ではほぼ一致した間ゲキ比の値を示すが，下層土では一致せず初期の順位がなお残存している。

(3) $\log \bar{p} \sim \log m_v$ 曲線において，練返し土と突固め土では $\bar{p}$ の増大に伴い m_v はほぼ直線的に減少するが，不撹乱土では初期の圧密圧力の段階の m_v の変化はわずかであり，圧密降伏応力以上の $\bar{p}$ になると直線的に減少する。

(4) 時間・圧密沈下量曲線において，不撹乱土では即時沈下と二次圧密がほとんどであり，Terzaghi 型の一次圧密はほとんど認められない。練返し土では即時沈下は一般に少なく，一次圧密領域とそれに続く二次圧密領

域が明確に存在する。突固め土の場合には，不撹乱土と練返し土の中間的な形態を示す。

(5) 3種の供試体のすべてについて，表土の二次圧密比は下層土のそれより大きいことから，有機物(腐植)の存在は二次圧密を増大させている。

次に表土を用いて，マクロ的には同じ練返し土であるが，土粒子表面の吸着カチオン種を変化させた場合の土粒子間力に基づくミクロな土・水系としての構造の異なるNa土とCa土を作製して圧密実験を行ない，次の結果を得た。

(1) 配向構造を有するNa土と綿毛化構造を有するCa土の，$e \sim \log p$ 曲線，$\log \bar{p} \sim \log m_v$ 曲線を比較すると，全体的に練返し土としての性格を有する点では共通しているが，同一圧密圧力における間ゲキ比や，体積圧縮係数の変化の過程において一定の差異が認められる。

(2) Na土とCa土の差異は，時間・沈下量曲線における一次圧密の進行速度と，二次圧密比において顕著にあらわれる。すなわちNa土では，一次圧密の進行はきわめてゆっくりしているがその後に続く二次圧密量は少ないのに対し，Ca土の場合には，一次圧密そのものは急速に進行するがその後に続く二次圧密量は顕著に増大している。

本研究の一部は昭和52年度文部省科学研究費(一般D)の補助によってなされたものであることを付記して，謝意を表します。

引用文献

1. 山内豊聡・巻内勝彦・鈴木敦巳・安原一哉： 九州の有機質土について，土と基礎，**21**(2)：37-46. 1973
2. 久野悟郎・渋谷富雄： 関東ロームの圧密試験について，第19回土質工学シンポジウム発表論文集，79-86. 土質工学会，1974
3. 土質工学会編： 土質試験法，p. 274-325. 土質工学会，1970
4. TERZAGHI, K. and PECK, R. B.: Soil mechanics in engineering practice, p. 66. John Wiley & Sons, 1948
5. SCHMERTMAN, J. H.: Estimating the true consolidation behavior of a clay from laboratory test results, *Proc. Am. Soc. Civ. Engrs.*, **79**, 311-312. 1953
6. 中瀬明男・小林正樹： 圧密における理論と実際，土と基礎，**21**(11)：17-31. 1973
7. 網千寿夫： 圧密試験結果の適用と限界，土と基礎，**21**(4)：25-31. 1973
8. 竹中 肇・田淵俊雄・田淵公子・多田 敦： 関東ロームの自由水分，農土研別冊，**7**：61-67. 1963
9. 最上武雄編： 土質力学，p. 431-442. 技報堂，1969
10. 前田 隆・相馬尅之・佐々木清一： 腐植が土の物理性におよぼす影響，農土論集，**61**：9-17. 1976
11. 矢沢正士： 水蒸気吸着法による粘土質土壌の比表面積に関する研究，農土論集，**75**：1-7. 1978
12. 松尾新一郎・嘉門雅史： 物理化学的見地からのいわゆるヘドロの工学的性質について，土木論集，**209**：103-113. 1973
13. 矢沢正士： 粘土質土壌の沈定容積・液性限界・流動性におよぼす吸着カチオンの影響，農土論集，**65**：8-14. 1976
14. 矢沢正士： 粘土質土壌の収縮挙動におよぼす吸着カチオンの影響，農土論集，**67**：30-36. 1977

Summary

The one-dimensional consolidation properties of buried "Kuroboku-soil" which is one of the volcanic ash soils rich in organic matter (humus) and widely distributed in Hokkaido, was examined from a view point of soil structure.

At first, the consolidation experiments for three tested samples (undisturbed sample, compacted sample, remoulded sample) which have different soil structure macroscopically, were done. The results are as follows:

(1) From the value of compression index (C_c) of undisturbed sample, the compressibility of surface soil was larger than that of subsoil.

(2) On the load-settlement curve, the value of void ratio against same load at the initial stage of loading was ordered as follows, undisturbed sample > compacted sample > remoulded sample, while at the final stage of loading, the void ratio of surface soil was similar with three samples, but in subsoil it was different and the order at the initial stage was kept.

(3) On the time-settlement curve, the curve line for undisturbed sample was mainly both of the immediate settlement and the secondary compression, for remoulded sample, it was mainly both of the primary compression and the secondary compression, and for compacted sample, it was an intermediate curve between undisturbed sample and remoulded sample. These difference of time-settlement curve was considered on the basis of the skeleton structure of each sample and the existing state of soil water.

(4) From comparing the secondary compression ratio of surface soil with that of subsoil, the presence of humus is clear to increase the secondary compression.

Secondly, the consolidation experiments of Na- and Ca-saturated surface soil, which have different micro-strucaure in soil-water system, were done. The results are as follows:

(1) On the e-log p relations and the log $\bar{p}$–log m_v relations, a slight difference between Na-soil possessing an oriented structure and Ca-soil possessing a flocculated structure was recognized.

(2) On the time-settlement relations, a large difference between Na-soil and Ca-soil was recognized, that is, in Na-soil, the settling velocity of primary compression was extremely slow and the secondary compression was small, while in Ca-soil, the settling velocity of primary compression was rapid and the secondary compression was large. These difference was considered on the basis of a presence or not of the structural unit in soil-water system and the existing state of soil water.