

## 土壤構造悪化の面からみた農耕地土壤の圧縮特性

加 藤 英 孝\*

Susceptibility of Agricultural Soils to Structural Degradation by Compressive Forces.

Hidetaka KATOU

Division of Soil Science, National Institute of Agro-Environmental Sciences  
Tsukuba, Ibaraki, 305 Japan.

### 1. はじめに

近年の農業機械の大型化や不耕起栽培の導入など耕作方法の変化は、農耕地における下層土のコンパクションの進行や表層直下の浅い位置での圧密層の形成をもたらしている。形成された圧密層ではかさ密度(bulk density)の増加とそれに伴う土壤硬度の増大、粗孔隙の減少と透水性低下による排水不良・ガス拡散の悪化など土壤物理性の劣悪化がみられ、結果として多湿年に作物の生育阻害や収量低下の生じることが多い<sup>1, 18)</sup>。このような圧密化による土壤物理性の悪化を未然に防ぐ合理的な土壤管理法を確立するためには、圧縮応力等の外力による土壤構造の悪化過程と土壤構造の悪化が進みやすい土壤条件の解明が必要である。

ここでは、まず農耕地土壤の圧密化を加速する要因と圧密化による土壤物理性悪化の例を示し、土壤の圧縮特性を体積変化の面および孔隙径分布とそれに関連する性質の変化の面から整理する。つぎに、圧縮による体積(またはかさ密度)の変化自体は土壤構造悪化のよい指標とは必ずしもならないことを指摘し、孔隙径分布の変化の受けやすさの点から土壤の圧縮されやすさを評価することを試みる。また、土壤の圧密化回避のために今後解明されるべき課題について考察する。

### 2. 農耕地土壤の圧密化と土壤物理性の変化

最近の農耕地土壤の圧密化・構造悪化の進行の直接的

農業環境技術研究所土壤管理科

〒305 つくば市観音台3-1-1

土壤の物理性 第59号 P. 7~16 (1989)

かつ最大の要因の一つは農業機械の重量化である。農業機械の重量化は、タイヤ・サイズの増大により平均接地圧が一定に保たれた場合でも下層土の圧密化を進行させる働きがある。等分布荷重を受ける半径 $R$ の円板面の中心の下方深さ $z$ での土壤中の垂直圧縮応力 $\sigma_z$ は次のFröhlichの式によって近似的に表わされる<sup>2)</sup>:

$$\sigma_z = q(1 - \cos^2 \theta) \quad [1]$$

ただし、 $q$ : 円板面での平均接地圧,

$\lambda$ : 応力集中係数(土性および含水率に依存),

$$\theta = \tan^{-1}(R/z)$$

[1]式によれば、 $q$ が一定に保たれた場合でも、総荷重の増加( $R$ の増加)により任意の深さの土壤に働く圧縮応力は増加する。すなわち、平均接地圧が同じであれば荷重が大きいほど土壤中の応力はより深くまで伝達される<sup>17)</sup>。この結果、下層土にかかる圧力や下層土の圧密化に対しては平均接地圧よりも機械の総荷重の方が影響が大きい。

車両走行時の車輪のすべりによるせん断・ねり返しも土壤構造の悪化をひどくする要因の一つである。Daviesら<sup>4)</sup>によれば、車輪のすべりは車軸荷重の増加以上に土壤の透水性を低下させる効果があり(Table 1)、また車輪のすべりを受けた土壤ではせん断強さの増加がみられた。

車輪のすべりの際に働くせん断応力は、また圧縮時の土壤の体積変化にも影響を与える。Critical State Soil Mechanicsの理論<sup>7, 8)</sup>によれば、圧縮の際にせん断力が同時に働くと土壤は究極的にはcritical state(限界状態)とよばれる状態に達し、平均圧縮応力、偏差応力

Table 1. Relative effects of tractor weight and wheelslip on the water-entry rates\* (after Davies *et al.*<sup>4)</sup>).

	Untreated land	Rear axle load = 16.8kN		Rear axle load = 30.8kN	
		Nil slip	31.4% slip	Nil slip	30.3% slip
Water-entry rate (cm h <sup>-1</sup> )	71	7.6	0.01	2.7	0.06

\* Boxworth clay loam soil, tyre pressure = 110kPa.

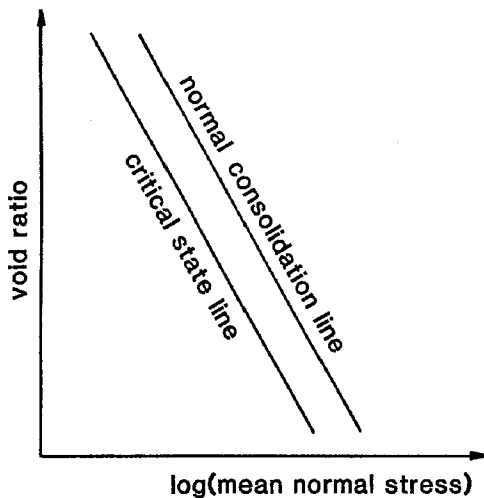


Fig. 1. Volume change of soil by compression with and without shear, represented by the critical state line and the normal consolidation line, respectively (schematic).

(せん断に關係) および間隙比が一定のまま流動する。この限界状態に対する間隙比 $-\log$ 平均圧縮応力曲線は正規圧密曲線より低間隙比側にある (Fig. 1)。このため間隙比の小さい状態にあった土壤に比較的小さな平均圧縮応力と比較的大きな偏差応力が働く場合を除いて、車輪のすべり等によるせん断力は土壤の圧密化をさらに進める方向に作用する<sup>7, 8)</sup>。排水不良などにより土壤が多水分状態にあると、この効果はさらに大きいものと考えられる。

このような圧密化による土壤物理性の悪化は、i) 土壤硬度の上昇などかさ密度の増加に伴うもの、およびii) 粗孔隙の消失など土壤の孔隙径分布の変化に関連するものの二つの種類に大別される。

Table 2 は比較粘質なラジアード土壤 (ブラジル・サンパウロ州, Oxic Rhodustalf) および微細団粒の発達したサンゴタルド土壤 (同ミナスジェライス州,

Acrustox) の土壤硬度が土壤水吸引圧、および層位分化や耕作に伴うかさ密度の増加によってどう影響されるかをみたものである。両土壤とも、耕盤層ではかさ密度および土壤硬度が作土層のそれぞれ1.13倍および3~4倍に達し、吸引圧の上昇による硬度の著しい増大が見られた。またサンゴタルド耕地下層土は耕作により隣接林地下層土に比べてかさ密度は1.05倍になった(0.7kgf cm<sup>-2</sup>の圧縮応力による圧縮にほぼ相当) に過ぎないにも拘らず、土壤硬度は吸引圧によっては (例えばpF3.6) 約2倍に増加することが認められた。これらは、圧密化によるかさ密度のわずかな増加が土壤硬度の著しい上昇をもたらしていることを示している。

一方、透水性やガス拡散特性はかさ密度じたいより土壤の孔隙径分布の変化を通じて圧密化の影響を被る土壤物理性であり、これらに対しては比較的粗な孔隙の減少の効果が大きい。土壤の相対ガス拡散係数  $D/D_0$  を気相率に対してプロットすると、指数関数的な曲線が得られることが多い。このため、粗孔隙率あるいは気相率のわずかな減少が土壤中のガス拡散の深刻な悪化につながる場合がある。ラジアード耕地土壤の耕起区作土および不耕起区表土のガス拡散係数を測定した例 (加藤・吉田・箱山, 未発表) では、両土壤の間隙率の差がわずか0.04 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>であったのに対し  $D/D_0 = 0.02$  となる土壤水吸引圧は耕起区作土でpF1.7, 不耕起区表土でpF2.9と大きな差が見られ(このときの気相率は両土壤とも0.21 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>)、後者ではガス拡散不良となる頻度の大きいことが推定された。

圧密化によって生じる排水不良、ガス拡散の悪化や土壤硬度の上昇は、作物栽培のための培地としての土壤の好適性を損なうことが多い。Fig. 2 は土壤の有効水分範囲が土壤硬度およびガス拡散不良によって制限されるさまを "non-limiting water range (NLWR)"<sup>12, 15)</sup> によってみたものである。ラジアード土壤の例では、耕起区作土ではpF1.8-3.7の範囲がNLWR ( $D/D_0$  が0.02以上、土壤硬度が1.2MPa以下<sup>12)</sup>) に相当したのに

Table 2. Penetration resistance of two Brazilian soils as affected by soil water potential and different management practices (H. Katou, K. Yoshida and S. Hakoyama, unpublished results, 1988).

Soil	Depth (cm)	Clay content (%)	Bulk density ( $\text{Mg m}^{-3}$ )	Penetration resistance (MPa) <sup>a</sup> at matric potentials of				
				-9.8kPa	-31kPa	-98kPa	-390kPa	
Lageado (Oxic Rhodustalf)								
arable (C.T.) <sup>b</sup>	topsoil	0-5	64.4	1.15	0.26	0.37	0.53	1.1
	plowsole	16-21	67.3	1.31	0.82	1.1	1.8	3.1
arable (N.T.)	topsoil	0-5	62.9	1.27	0.59	0.68	1.3	2.9
São Gotardo (Acrustox)								
arable (C.T.)	topsoil	1-6	91.1	0.94	0.22	0.30	0.36	0.67
	plowsole	25-30	92.3	1.06	0.95	1.2	1.6	2.4
	subsoil	45-50	92.4	0.96	0.35	0.48	0.54 <td 1.3	
forest	subsoil	45-50	90.8	0.91	0.25	0.37	0.39	0.66

<sup>a</sup> Average of duplicate measurements with a Yamanaka-type penetrometer.<sup>5)</sup>

<sup>b</sup> C. T.: conventionally tilled; N. T.: no-tilled.

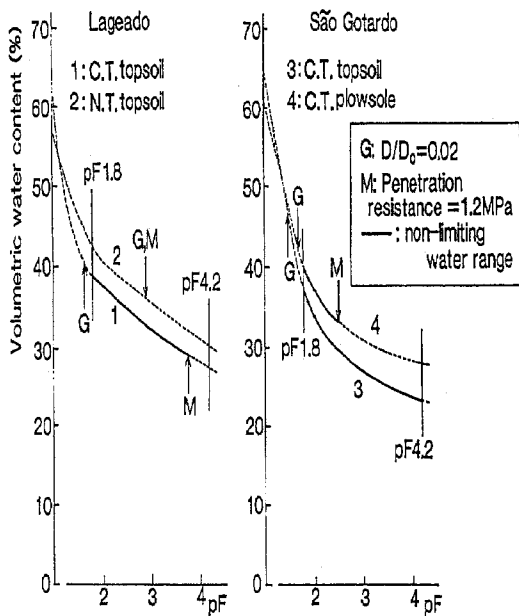


Fig. 2. Restriction of available water range of Lageado (Oxic Rhodustalf) and São Gotardo soils (Acrustox) by mechanical resistance and poor gas diffusion. C. T.: conventionally tilled; N. T.: no-tilled (H. Katou, K. Yoshida and S. Hakoyama, unpublished results, 1988).

対し、不耕起表土ではガス拡散の悪化と土壌硬度上昇のためにNLWRは見出されなかった。またサンゴタルド土壌の耕盤層では土壌硬度上昇のためにNLWRはpF 1.8-2.5 の範囲に限られた。

このように土壌の圧密化は作物根の伸長阻害をもたらす可能性が大きく、また圃場の排水不良を通じた土壌侵食や土壌病害発生の危険性の増加も懸念される。土壌の透水性低下による排水不良は同時に、多湿時のねり返し等による土壌構造破壊を加速することが予想され、かりに圧密化がやがて一種の“平衡”状態に達するとしても、その時の土壌の状態はかなり劣悪なものになっている可能性が大きい。

### 3. 体積変化からみた農耕地土壌の圧縮特性

体積(またはかさ密度)変化の面からみた土壌の圧縮特性の評価は、通常衝撃的または静的な荷重を用いた締固め試験によって行われる。圧縮の際に土壌からの排水がない場合には、与えられた締固めエネルギーあるいは圧縮応力に対して圧縮後のかさ密度が最大になる含水比(最適含水比)が土壌ごとに存在する。最適含水比のもとで圧縮された土壌の水分飽和度はおよそ80%程度であり<sup>9)</sup>、土壌が同じであれば、締固めエネルギーあるいは圧縮応力が高いほど最適含水比は小さく圧縮後のかさ密度は大きい(Fig. 3)。したがって、与えられた含水比が最適含水比となるような圧縮応力の小さい土壌(例えば砂質土壌)ほど、圧縮後のかさ密度は大きくなりやすい。

石井・徳永<sup>10)</sup>は静的荷重による圧縮の際の最適含水比に相当する土壤水吸引圧と圧縮応力との関係をいくつかの土壤について求めた。それによれば、圧縮応力が同じであっても、最適含水比に相当する土壤水吸引圧は土壤ごとに異なり、ねり返した赤黄色土壤のように構造の破壊された、圧縮応力に対する骨格抵抗の小さいと考えられる土壤ほど大きかった。

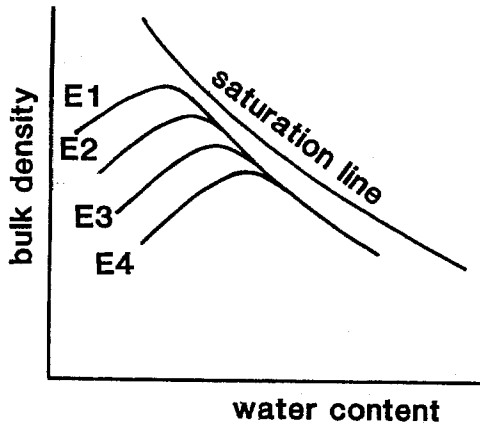


Fig. 3. Dry bulk density-water content curves for different compaction efforts ( $E1 > E2 > E3 > E4$ ) (after Hillel<sup>9)</sup>).

圧縮後のかさ密度が圧縮時の土壤含水比に依存することは、異なる含水比のもとでの間隙比（またはかさ密度） $-\log$  圧縮応力曲線の比較からも認められる。Larson<sup>14)</sup>は含水比の異なる風乾細土充填土壤（初期土壤水吸引圧は5～100kPa）を静的荷重により圧縮し、得られるかさ密度 $-\log$  圧縮応力曲線がたがいにほぼ平行であり、含水比が大きいほど高かさ密度側によることを示した。これらは土壤が湿っている時ほどみかけの先行圧縮応力、あるいは圧縮に対する土壤の降伏応力が小さくなることを意味する。

比較的大きな圧縮応力により排水を伴いながら土壤が圧縮される場合には、土壤の初期含水比のかさ密度あるいは間隙比に対する効果は圧縮応力が増すにつれてだいに見られなくなる。茨城農試黒ボク土水田作土の不攪乱試料を圧縮した例<sup>11)</sup>では、圧縮応力が $2.6 \text{ kgf cm}^{-2}$ 以下の範囲では初期吸引圧が小さい試料（圧縮前 $pF1.5$ ）の方が初期吸引圧の大きい試料（圧縮前 $pF3.0$ ）より同一の圧縮応力に対する間隙比が明らかに小さかったのに対し、 $15.4 \text{ kgf cm}^{-2}$ の圧縮応力のもとでは両者の差は認められなかった（Fig. 4）。このような圧縮時の体積変化には土壤の水分飽和度が関係しているものと考えられる。

圧縮による土壤構造の悪化程度を評価するには、孔隙率やかさ密度の変化など土壤の体積変化に着目するだけでは十分ではない。かさ密度自体は土壤の透水性やガス

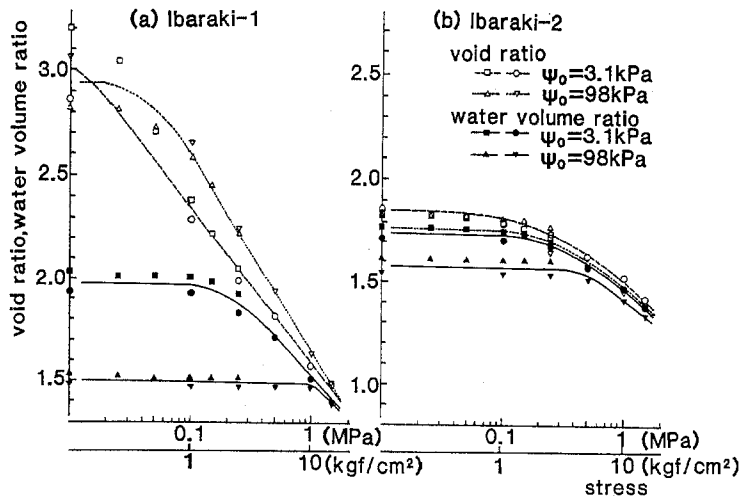


Fig. 4. Void ratio and water volume ratio versus applied stress curves for Ibaraki paddy soils (humic Andosols) with different initial matric suctions ( $\psi_0$ )<sup>11)</sup>. Ibaraki-1: topsoil; Ibaraki-2: plowsole.

拡散特性など孔隙径分布に関係する性質のよい指標には必ずしもならないこと、圧密化の際には体積が一定のまま土壌マトリクスの変形が生じて物理性が悪化することがあること、また圧縮による体積減少率や圧縮指数、先行圧縮応力などの値は圧縮後よりも圧縮前の土壌の状態を強く反映することなどがその理由である。

#### 4. 圧縮による土壌の孔隙径分布および関連する性質の変化

土壌を静的荷重によって圧縮すると、圧縮応力が増すにつれて土壌中の孔隙は粗孔隙から細孔隙へと逐次的に崩壊・消失する。仲谷ら<sup>16)</sup>は川里灰色低地土転換畑作土、栃木多湿黒ボク土転換畑作土およびすき床土（初期吸引圧は pF1.9~2.6）を 1.0~15.3 kgf cm<sup>-2</sup> の間の5段階の圧縮応力で圧縮し、これらの土壌では pF1.5以下の吸引圧で脱水される粗孔隙は 2.6~5.1 kgf cm<sup>-2</sup> の圧縮応力により完全に消失し、15.3 kgf cm<sup>-2</sup> の圧縮応力のもとでは pF2.5以上に相当する孔隙も減少すること、またそれに伴って数オーダーにおよぶ飽和透水係数の低下が生じることを示した。

同じ初期土壌水吸引圧をもつ土壌を同一の圧縮応力のもとで圧縮しても、消失する孔隙の径の範囲や圧縮後の飽和透水係数は土壌ごとに異なる。Fig.5 および Fig.6には、初期吸引圧を pF1.5または pF3.0にそろえたのち 2.6 kgf cm<sup>-2</sup> または 15.4 kgf cm<sup>-2</sup> の圧縮応力で圧縮した時の不攪乱水田土壌試料の水分特性曲線の変化<sup>11)</sup>を示した。土壌類型や土性を異にする各土壌とも、比較的粗な孔隙の崩壊・消失にともなって低吸引圧部分の土壌水分特性曲線の平坦化がみられた。しかし、圧縮の影響を受けた孔隙の大きさは土壌ごとに異なり、初期吸引圧 pF1.5、圧縮応力 15.4 kgf cm<sup>-2</sup> の条件では細粒黄色土作土(Fig.5(b))は pF3.8の吸引圧で脱水する孔隙にまで圧縮による崩壊・消失が生じて土壌水分特性曲線が平坦化したのに対し、粗粒質の灰色低地土下層土(Fig.6(b))では pF2.5またはそれ以下の吸引圧で脱水する孔隙が失われたに過ぎなかった。また、同じ条件で圧縮した後の飽和透水係数も  $4.4 \times 10^{-6} \sim 1.9 \times 10^{-8} \text{ cm s}^{-1}$  の範囲にわたり(Table3)、圧縮によって水分特性曲線が平坦化する吸引圧の範囲が広い土壌ほど小さな値が得られた。

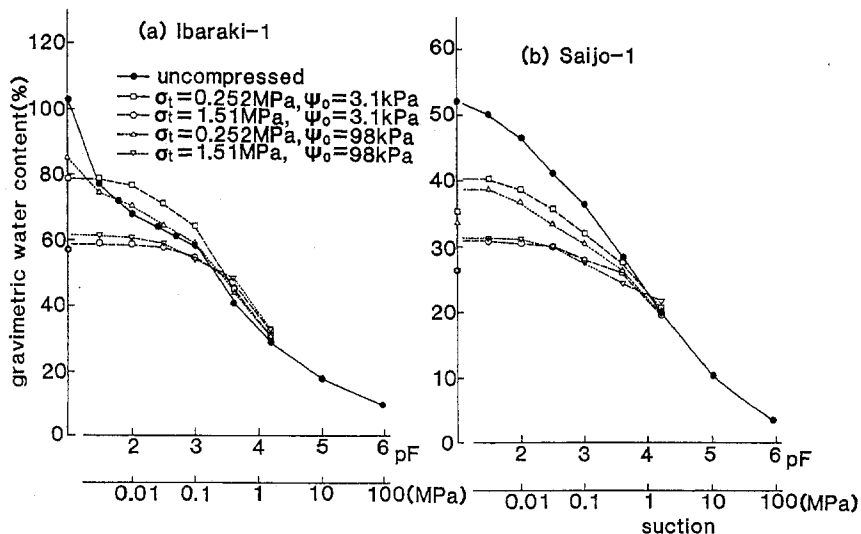


Fig. 5. Effects of compression on the soil water characteristic curves for Ibaraki-1 (topsoil, humic Andosol) and Saijo-1 (topsoil, fine-textured Yellow soils)<sup>11)</sup>.  $\sigma_t$ : applied stress;  $\psi_0$ : initial matrix suction.

## 加藤：土壤構造悪化の面からみた農耕地土壤の圧縮特性

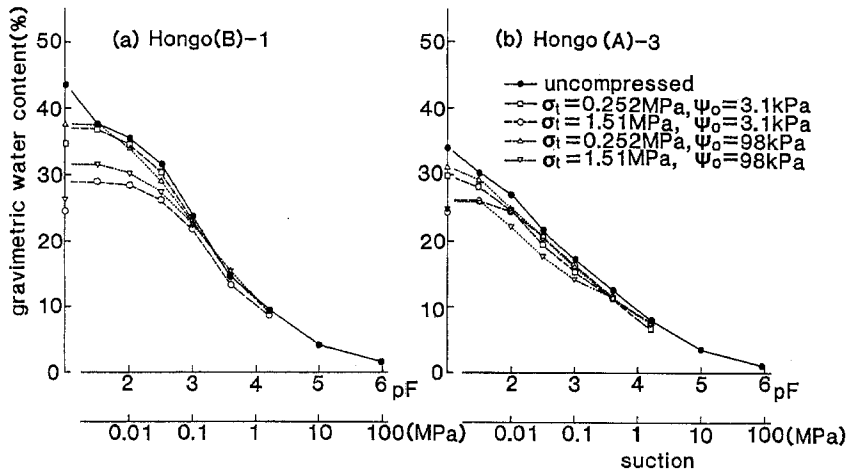


Fig. 6. Effects of compression on the soil water characteristic curves for Hongo(B)-1(topsoil, coarse-textured Gray Lowland soil) and Hongo(A)-3 soils (subsoil, coarse-textured Gray Lowland soil)<sup>11)</sup>.  $\sigma_i$ : applied stress;  $\psi_o$ : initial matric suction.

圧縮によって崩壊・消失する孔隙の径の範囲や圧縮後の飽和透水係数の違いは、土壤構造悪化の受けやすさの土壤間差異を反映したものと考えられる。このような孔隙径分布に関連する性質の圧縮による変化と、先行圧縮応力や圧縮指数などの体積変化に関するパラメータ (Table 3) との間には、しかし直接的な関係は見られなかった。すなわち、圧縮によって大きな体積変化を示す土壤ほど圧縮後の土壤物理性が悪いとは限らなかった。したがって、体積変化に加えて、孔隙径分布に関する性質の変化など土壤構造悪化の受けやすさの点からも土壤の圧縮されやすさを定義・評価する必要がある。

##### 5. 構造悪化の受けやすさに着目した土壤の圧縮感受性の評価

飽和に近い状態で排水を伴いながら土壤が圧縮される場合には、土壤の構造悪化の受けやすさは圧縮応力による土壤の間隙水圧の増大の点から評価することが可能である<sup>11)</sup>。

湿った、不飽和な土壤が圧縮応力  $\sigma_i$  によって圧縮されると、間隙内の空気は間隙空気圧が大気圧に等しくなるまで土壤から排除されるのに対し、間隙内の水 (土壤水) は間隙水圧  $u$  が  $u \leq 0$  の間は土壤中で再分配されるだけで排水は生じない。このため、 $u > 0$  となるに十分

なほど  $\sigma_i$  が大きければ、土壤はやがて水で飽和される。水で飽和した土壤からの排水をとまらぬ圧縮 (圧密) に対しては、次のTerzaghiの式が適用される<sup>21)</sup> :

$$\sigma_i = u + \sigma_o \quad (2)$$

ただし、 $\sigma_o$  は有効応力。圧密の進行とともに  $u$  は次第に減少し、圧密終了時には  $u = 0$ 、 $\sigma_i = \sigma_o$  の状態に達する。しかし、この定式化からは圧縮による土壤の孔隙径分布の変化についての情報は得られない。

ここで間隙水圧  $u$  は、土壤に圧縮応力が加えられることによる間隙水圧の増加を表わす重荷 (overburden) ポテンシャル  $u_p$  ( $\geq 0$ ) と、土壤マトリクスに対する水の親和性に起因するマトリック・ポテンシャル  $u_m$  ( $\leq 0$ ) の和として表しうることに注意すると、

$$u = u_p + u_m \quad (3)$$

[3] 式は圧縮終了時 ( $u = 0$ ) でも、 $u_p$  の値は必ずしも 0 にはならないことを示唆する。さらに、圧縮終了時のマトリック・ポテンシャル  $u_{m_f}$  と重荷ポテンシャル  $u_{p_f}$  の間には次の関係がある :

$$u_{m_f} = -u_{p_f} \quad (4)$$

Table 3. Effects of compression on volume and hydraulic conductivity of undisturbed paddy soils (from Katou *et al.*<sup>10</sup>).

Soil	Clay content (%)	Initial void ratio	Apparent (preconsolidation) pressure ( $\times 100\text{kPa}$ )	Compression index	Saturated hydraulic conductivity after compression ( $\text{cm s}^{-1}$ )
Ibaraki-1(topsoil) Andosol	31.8	3.04	<0.1	0.74	$6.5 \times 10^{-7}$
Saga-1(topsoil) Gray Lowland soil	37.7	1.32	1.5	0.33	$4.4 \times 10^{-8}$
Saijo-1(topsoil) Yellow soil	36.7	1.40	0.35	0.42	$1.9 \times 10^{-8}$
Hongo(A)-3(subsoil) Gray Lowland soil	2.0	0.90	2.1	0.22	$4.4 \times 10^{-6}$
Hongo(B)-1(topsoil) Gray Lowland soil	9.3	1.10	0.77	0.32	$1.4 \times 10^{-6}$

Initial suction = 3.1kPa(= pF1.5), applied stress = 1.51MPa(= 15.4kgf  $\text{cm}^{-2}$ ).

土壌がこのとき水で飽和しているならば、 $-u_{m_i}$ より小さい吸引圧 ( $u_{m_i}$ より大きいマトリック・ポテンシャル) で脱水される孔隙は存在しないはずなので、 $-u_{m_i}$  ( $=u_{p_i}$ ) は圧縮によって水分特性曲線が平坦化する吸引圧の上限に等しい。そこで、孔隙径分布の変化の受けやすさの点から、土壌の圧縮感受性  $\chi$  を次式で定義することができる<sup>11)</sup> :

$$\chi = u_{p_i} / \sigma_i \quad [5]$$

$\chi$  は圧縮応力に対する土壌の抵抗への骨格構造の寄与の小ささを表す値であり、きわめて堅固な非圧縮性土壌に対する値 ( $\chi=0$ ) から、骨格構造をまったく欠き、完全に水で飽和した圧縮性土壌に対する値 ( $\chi=1$ ) の間の値をとると予想される。

$\chi$  の値は、i) 圧縮試料と未圧縮試料の水分特性曲線を比較し、両者が合流する吸引圧  $\phi_{*w}$  から  $\chi = \phi_{*w} / \sigma_i$  として、または ii) 圧縮終了時の試料の含水比と未圧縮

Table 4. Susceptibility of undisturbed paddy soils to compression as evaluated from the changes of the soil water characteristic curves and from the final soil water suction in the compression process<sup>11)</sup>.

	Changes of soil water characteristic curve			Final soil water suction in the compression process		
	$\phi_{*w}$ (MPa)	pF value corresponding to $\phi_{*w}$	$\chi^a$	$w_f$ (%)	$\phi_{m_f}$ (MPa)	$\chi^b$
Ibaraki-1	0.16	pF 3.2	0.11	54.2	0.14	0.092
Saga-1	0.62	pF 3.8	0.41	35.9	0.39	0.26
Saijo-1	0.62	pF 3.8	0.41	26.5	0.55	0.37
Hongo(A)-3	0.031	pF 2.5	0.021	22.7	0.025	0.016
Hongo(B)-1	0.098	pF 3.0	0.064	22.8	0.087	0.058

Initial suction  $\phi_0 = 3.1\text{kPa}(=pF1.5)$ , applied stress  $\sigma_i = 1.51\text{MPa}(=15.4\text{kgf cm}^{-2})$ .

$\phi_{*w}$ : soil water suction above which soil water characteristic curves for compressed and uncompressed samples join each other;  $w_f$ : final water content of the soils in the compression process;  $\phi_{m_f}$ : final soil water suction corresponding to  $w_f$ .

<sup>a</sup> Calculated as  $\chi = \phi_{*w} / \sigma_i$ . <sup>b</sup> Calculated as  $\chi = \phi_{m_f} / \sigma_i$ .

試料の水分特性曲線とから圧縮終了時の試料の吸引圧  $\phi_{mf}$  を求め、 $\chi = \phi_{mf} / \sigma_t$  として得ることができる。前者の方法は  $\phi_{sw}$  の値は除圧後の膨潤によって影響されず、したがって  $\phi_{sw} = \phi_{mf} = u_{pi}$  であるとの仮定に、また後者の方法は吸引圧範囲  $\phi \geq \phi_{mf}$  には水分特性曲線に対する圧縮の影響が及ばないとの仮定にそれぞれもとづいている。

Table 4 には初期吸引圧  $pF1.5$ 、圧縮応力  $15.4 \text{ kgf cm}^{-2}$  の条件で圧縮した水田土壤について求めた  $\phi_{sw}$ 、 $\phi_{mf}$ 、および  $\chi$  の値を示した。圧縮条件が同じであっても  $\phi_{sw}$  や  $\phi_{mf}$  の値は土壤ごとに異なり、 $\phi_{mf}$  を通じて求めた  $\chi$  の値は  $0.016$  (粗粒質灰色低地土下層土) から  $0.37$  (細粒黄色土作土) の範囲にわたった<sup>11)</sup>。また、たがいに独立に求めた  $\phi_{sw}$  と  $\phi_{mf}$  の値は比較的良好一致した。このことは、圧縮によって消失する孔隙の径の範囲が、圧縮前の土壤水分特性曲線と圧縮終了時の土壤の含水比とから推定できることを意味する。

Fig. 7 は圧縮による土壤水分特性曲線の変化を模式的に示したものである。圧縮応力が増加するにつれて土壤の含水比は曲線Bに沿って変化し、圧縮応力  $\sigma_t$  のもとでは圧縮終了時の含水比  $w_f$ 、土壤水吸引圧  $\phi_{mf}$  にいたる。除圧後の吸水・膨潤により土壤はいくぶん体積を回復し、圧縮土壤に対する土壤水分特性曲線 (曲線C) は

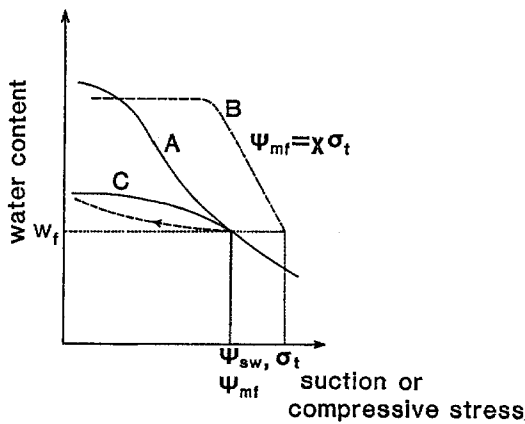


Fig. 7. Schematic illustration of the alteration of the soil water characteristic curves by compression<sup>11)</sup>. A: soil water characteristic curve for uncompressed soil; B: water content versus applied stress curve in the compression process; C: soil water characteristic curve for compressed soil.

未圧縮土壤の水分特性曲線 (曲線A) と吸引圧  $\phi_{sw}$  で合流する。理想的には  $\phi_{sw}$  は  $\phi_{mf}$  に等しく、 $\phi_{mf}$  は  $\phi_{mf} = \chi \sigma_t$  の関係によって土壤の圧縮感受性  $\chi$  に結びつけられる。

Fig. 8 にはこうして求めた  $\chi$  と圧縮後の土壤の飽和透水係数との関係を示した (初期吸引圧  $pF1.5$ 、圧縮応力  $15.4 \text{ kgf cm}^{-2}$ )。ここに示した水田土壤の例では  $\chi$  の値が大きいほど圧縮後の飽和透水係数が小さい傾向が明らかに認められた。また、このような大きな圧縮応力によって圧縮される場合には、 $\chi$  の値や圧縮後の透水係数は、圧縮前歴や圧縮の際の体積変化の大きさよりも土壤類型や土性の違いの影響をより強く受ける傾向があった。

$u = 0$  の条件をはずすと  $\chi$  は Croney and Coleman<sup>3)</sup> の load factor  $\alpha$  に等しくなる。load factor は土壤水の全ポテンシャルに対する重荷ポテンシャルの寄与を表わすために導入されたものであり、

$$\phi = \phi_0 + \alpha P \quad [6]$$

ただし  $\phi$  : 荷重による圧力  $P$  を受けているときの土壤水ポテンシャル、

$\phi_0$  : 荷重がないときの土壤水ポテンシャル。

Groenevelt and Bolt<sup>6)</sup> によれば、load factor は荷重による圧力  $P$  のもとの土壤の収縮曲線の勾配との間に次の関係がある :

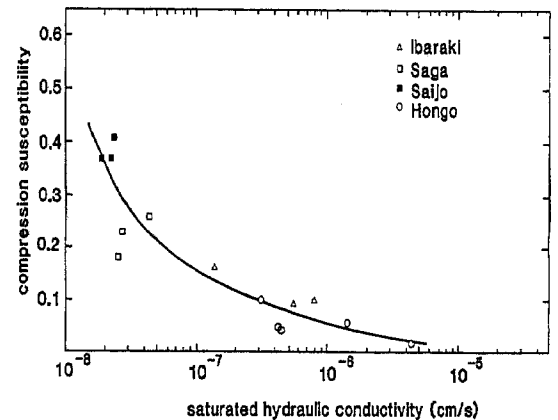


Fig. 8. Relationship between compression susceptibility and saturated hydraulic conductivity after compression for paddy soils (compressive stress =  $1.51 \text{ MPa}$ , initial suction =  $3.1 \text{ kPa}$ ).



$$\alpha(\theta, p) = p^{-1} \int_0^p (\partial e / \partial \theta)_{\theta=\theta} dp \quad [7]$$

とくに、Pが0に近づくときは、

$$\alpha(\theta, 0) = (\partial e / \partial \theta)_{p=0} \quad [8]$$

ただし、e : 土壌の間隙比、

$\theta$  : 土壌の体積含水比。

[7], [8]式によれば、正規収縮に近い収縮を示す土壌ほど $\alpha$ の値は大きい。Fig. 8に示した14種の土壌についてpF1.5~3.0の間の収縮曲線の平均勾配 $\Delta e / \Delta \theta$ と $\chi$ の値の関係を求めた結果<sup>11)</sup>では、 $\Delta e / \Delta \theta$ の方がやや大きな値を示す傾向があったものの、両者の間には1%水準で有意な正の相関があった。これらの結果から、正規収縮しやすい土壌ほど、孔隙径分布の変化の点からみれば圧縮による構造悪化を受けやすい土壌であると結論される。

## 6. おわりに

きわめて大きな圧縮応力を受ける場合を除けば、圧縮前の土壌の状態が生じる変形に大きな影響を与えうる。孔隙径分布およびそれに関連する性質の変化の点では、土壌を団粒化させて正規収縮にくい状態に保っておけば、圧縮の際の土壌構造悪化の軽減が期待される。圧縮の際の団粒のせん断破壊は土壌の水分飽和度に依存し、間隙水圧の変化を伴う<sup>13)</sup>。圃場における車輪のすべり等によるねり返しの影響とともに、不飽和状態における土壌構造の安定性を塑性変形に対する抵抗性の面から説明する必要がある。

他方、圧縮後の土壌構造の自然回復には膨潤・収縮作用の寄与が大きいとされている。圧縮時の構造悪化の受けやすさとこれらの自然回復作用との間の関係を明らかにすることも残された課題の一つである。また、深耕に代表される土層の物理的攪乱がもたらす影響を明らかにし、それが適切でありうる土壌条件を同定すること、さらに圧密層の形成による土壌の生化学的環境の変化と溶脱への影響等を解明することも、適切な土壌管理法の確立や土壌の資源的価値の維持のために重要と考えられる。

## 引用文献

- 1) Cannell, R. Q. 1985: Reduced tillage in north west Europe - review. *Soil Tillage Res.*, 5, 129-177
- 2) Carpenter, T. G., Fausey, N. R. and Reeder, R. C. 1985: Theoretical effect of wheel loads on subsoil stresses. *Soil Tillage Res.*, 6, 179-192
- 3) Croney, D. and Coleman, J. D. 1953: Soil moisture suction properties and their bearing on moisture distribution in soils. In *Proc. 3rd Int. Conf. Soil Mech. Foundation Eng.*, Vol. 1, p. 13-18
- 4) Davies, D. B., Finney, J. B. and Richardson, S. J. 1973: Relative effects of tractor weight and wheelslip in causing soil compaction. *J. Soil Sci.*, 24, 399-409
- 5) 土壌物理性測定法委員会(編) 1972: 土壌物理性測定法, p. 308-313, 養賢堂, 東京
- 6) Groenevelt, P. H. and Bolt, G. H. 1972: Water retention in soils. *Soil Sci.*, 113, 238-245
- 7) Hettiaratchi, D. R. P. 1987: A critical state soil mechanics model for agricultural soils. *Soil Use Manage.*, 3, 94-105
- 8) Hettiaratchi, D. R. P. and O'Callaghan, J. R. 1980: Mechanical behaviour of agricultural soils. *J. Agric. Eng. Res.*, 25, 239-259
- 9) Hillel, D. 1980: *Fundamentals of Soil Physics*, p. 357-360, Academic Press, New York
- 10) 石井和夫・徳永美治 1971: 土壌圧縮に及ぼすトラクタ走行の影響(第4報) 圧縮応力と最適含水比との関係. *土肥誌*, 42, 447-452
- 11) Katou, H., Miyaji, K. and Kubota, T. 1987: Susceptibility of undisturbed soils to compression as evaluated from the changes in the soil water characteristic curves. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 33, 539-554
- 12) 小財 伸・遅沢省子・久保田徹 1987: 「根生育非制限有効水分域」による熊本県主要畑土壌の物理機能評価. *土肥要旨集*, 33, 2
- 13) Larson, W. E. and Gupta, S. C. 1980: Estimating critical stress in unsaturated soils from changes in pore water pressure during confined compression. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44, 1127-1132
- 14) Larson, W. E., Gupta, S. C. and Useche, R. A. 1980: Compression of agricultural soils from eight soil orders. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44, 450-457
- 15) Letey, J. 1985: Relationship between soil physical properties and crop production. In *Advances in Soil Sci-*

- ence Vol. 1, Ed. B. A. Stewart, p. 277 - 294, Springer-Verlag, New York
- 16) 仲谷紀男・A. E. G. Dos Reis・加藤英孝・前田乾一  
1983: 圧縮が転換畑土壌の物理性に及ぼす影響. 土壌の物理性, 48, 2-7
- 17) Soane, B. D., Blackwell, P. S., Dickson, J. W. and Painter, D. J. 1981: Compaction by agricultural vehicles: a review. II. Compaction under tyres and
- 18) Soane, B. D., Dickson, J. W. and Campbell, D. J. 1982: Compaction by agricultural vehicles: a review. III. Incidence and control of compaction in crop production. Soil Tillage Res., 2, 3-36
- 19) Taylor, J. H., and Burt, E. C. 1987: Total axle load effects on soil compaction. J. Terramech., 24, 179-186
- 20) Taylor, J. H., Burt, E. C. and Bailey, A. C. 1980: Effect of total load on subsurface soil compaction. Trans. ASAE, 23, 568-570
- 21) Yong, R. N. and Warkentin, B. P. 1975: Soil Properties and Behaviour. p. 223-228, 318-321, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam

### Summary

Increasing use of heavy machinery in intensive arable production has increased the probability of compaction and structural degradation of agricultural soils. Examples are given in this paper to show that relatively small increase in soil bulk density and small loss of air - filled porosity upon compaction could result in appreciable increase in mechanical resistance and serious deterioration of gas diffusion in the soils.

Volume change characteristics of soils under compressive stress are affected by soil water content as well as structural stability of the soils. It is stressed that the magnitude of the change in total porosity (or bulk density) of soils depends upon the previous history of compression and is not always a useful index of the soil physical state after the compression. Determination of soil water characteristic curves for compressed and uncompressed soils has revealed that even when soils with the same initial suction are compressed with the same magnitude of compressive stress, the size of the pores lost or collapsed differs significantly among the soils. Compression susceptibility  $\chi$  of soil is introduced to explain the different response of the soils in the alteration of pore size characteristics and defined as

$$\chi = u_{vt} / \sigma_t$$

where  $u_{vt}$  and  $\sigma_t$  are the overburden water pressure at the end of compression, and the applied stress, respectively. Soils which exhibit normal shrinkage over a wide range of water content have in general greater values of  $\chi$ , and are expected to be liable to structural damage by compression.

The need for research on the destruction of soil structure by shear forces as well as on the environmental consequence of soil compaction is briefly discussed.

(Soil Phys. Cond. Plant Growth, Jpn., 59, 7-16, 1989)