琉球大学学術リポジトリ

土塊の乾燥・収縮について(農業工学科)

メタデータ	言語:
	出版者: 琉球大学農学部
	公開日: 2008-02-14
	キーワード (Ja):
	キーワード (En):
	作成者: 宜保, 清一, Gibo, Seiichi
	メールアドレス:
	所属:
URL	http://hdl.handle.net/20.500.12000/4248

土塊の乾燥・収縮について*

宜　保　清　一**

Seiichi GIBO : The drying and shrinkage behavior of soil blocks

I 緒　言

土の物理的性質は含水状態によって著しく変化し，土塊の崩壊現象においてもその乾燥の程度が重要な問題となる。これまでにも本島土壌層の乾燥特性および土塊の崩壊とPFの関係について調べてきた[1,2,3,4]が，さらに土塊の乾燥に伴なう水分の推移および収縮挙動について知見を得ることは崩壊機構を解明する上で不可欠である。そこで，これらの土塊について乾燥・収縮試験を行ない，崩壊と関係の深い限界含水比および収縮特性について検討した結果を報告する。

II 試験方法

試料は受食性の国頭礫層土（Yagaji，Kin），崩壊性の泥岩風化土（Tomigusuku），干ばつ地帯の石灰岩風化土（Komesu）のほかに比較試料としてKaolinを用い，風乾して2000 μ 以下に調整した。物理的性質およびPF－水分曲線をTable 1とFig. 1に示す。

Table 1. Physical properties of the sample

Name (common)		Kunigami maaji		Jaagaru	Shimajiri maaji	Kaoline
Parent rock		Kunigami gravels		Shimajiri mudstone	Ryukyu limestone	
Clay mineral		Vermicullite Illite		Montmorillonite Vermicullite Illite	Kaolinite Vermicullite Illite	
Soil (sample used)		Yagaji	Kin	Tomigusuku	Komesu	Kaoline
Gs		2.761	2.806	2.785	2.781	2.623
LL	(%)	55	78	57	72	67
PL	(%)	28	52	25	32	30
PI	(%)	27	26	32	40	37
Sand frac.	(%)	24	3	9	2	0
Silt frac.	(%)	22	42	27	19	27
Clay frac.	(%)	54	55	64	79	73
(colloid)	(%)	(39)	(51)	(40)	(53)	(31)

* 昭和52年度農業土木学会講演会要旨集 188～189（昭和52年4月）
** 琉球大学農学部農業工学科
琉球大学農学部学術報告 24：427～438（1977）

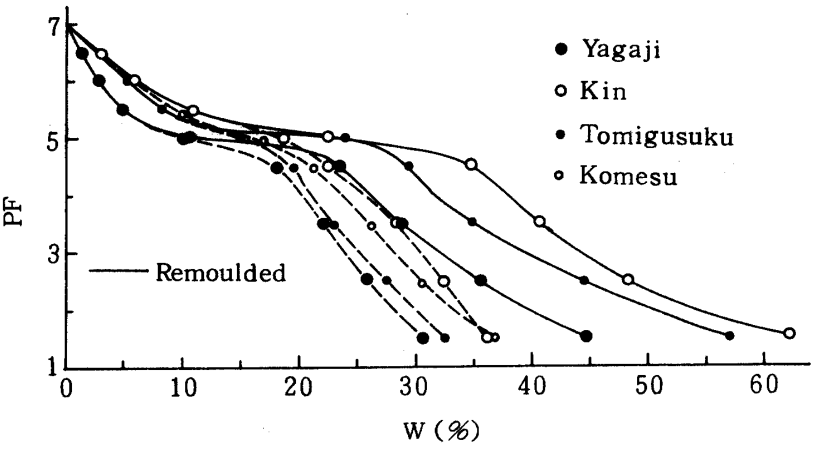

Fig. 1. PF－Water content relationship of the sample

土の乾燥・収縮挙動では試料の処理方法，供試体の作成方法，作成含水比，供試体の大きさ，形状，乾燥の方法・速度が重要であるので，[9] これらの物理特性の異なる試料を取り扱うのに次の方法を用いた。

a）まず供試体作成については初期含水状態にコンシステンシー指数を導入し，圧密成形した。すなわち $W_i = W_L - I_p \cdot I_c$（ここで，$W_i$：初期含水比，$W_L$：液性限界，$I_p$：塑性指数，$I_c$：コンシステンシー指数）によって決めた含水状態の練返し土を圧密 box に詰め，所定の荷重（0.5，2.0，5.0 kg/cm²）の下で短期圧密したものと，box に詰めた風乾土に直接吸水させた後圧密したものを径6cm，高さ2cmの大きさに成形した。練返しの場合は作成時の圧密効果と初期段階の計測に適度のかたさを必要とするため各試料にたいし $I_c = 0.6$ とした。もちろん，出来上り供試土塊においてはコンシステンシー特性等による圧密効果の違いから試料によって I_c の増分量や密度が異なることはいうまでもない。(Table 2)。

各試料を次のように簡単に表示する，Yagaji：Y, Kin：K，Tomigusuku：T, Komesu：Ko, Kaolin：Ka, 練返しの場合には Remoulded を付す。

b）乾燥条件としては，土－水系の反応過程で乾燥速度が重要であるので，実際面を考慮して「大気中」で乾燥させる方法と，ある程度環境を制御し，ゆっくりした脱水作用を与える「デシケーター中（乾燥剤）」による方法（物質の吸着性を利用する吸着乾燥法）[6] を用いた。「大気中」の場合は室内において無風状態とし，「デシケーター中」の場合は一定量のシリカゲルをデシケーターに入れ，その上面からおよそ20cm上方に金網を固定し，同一条件下で試験が出来るようにし，金網上の土塊は時々裏返すことによって全面から均等に水分蒸発作用が起るようにした。

c）土塊重量が1～1.5g減少するごとに，その直径・高さ（測微計による）を測定し，土塊の重量・表面積・体積・水分量および乾燥時間から乾燥速度・収縮率・体積変化係数・配列指数を計算した。

Table 2. Initial water content (Wi), wet density (γ_t), dry density (γ_d) and consistency index (Ic) of soil blocks before drying test

Specimen		Wi(%)	γ_t (g/cm^3)	γ_d (g/cm^3)	Ic
(Remoulded)	*	35.9	1.82	1.34	0.72
	①	37.4	1.87	1.39	0.78
Yagaji	②	32.8	1.91	1.47	0.92
	③	18.3	2.01	1.69	1.43
	*	46.5	1.72	1.17	0.85
	①	50.1	1.75	1.19	0.82
Kin	②	44.8	1.80	1.26	0.84
	③	28.9	1.92	1.49	1.34
	*	37.5	1.80	1.31	0.60
	①	39.4	1.85	1.38	0.68
Tomigusuku	②	35.9	1.86	1.39	0.71
	③	20.5	1.99	1.65	1.10
	*	43.9	1.70	1.18	0.68
	①	44.3	1.81	1.28	0.74
Komesu	②	42.3	1.81	1.29	0.77
	③	27.8	1.88	1.47	1.07
	*	42.2	1.69	1.19	0.68
	①	42.8	1.76	1.26	0.75
Kaolin	②	37.9	1.83	1.34	0.85
	③	23.1	1.91	1.35	1.19
	*	31.3	1.77	1.35	0.92
	①	34.1	1.75	1.34	0.96
Yagaji	②	30.7	1.76	1.41	0.99
	③	13.9	1.76	1.55	1.60
	*	39.4	1.64	1.18	1.04
	①	42.7	1.63	1.17	1.06
Kin	②	37.5	1.63	1.20	1.15
	③	21.7	1.75	1.43	1.54
	*	28.3	1.79	1.40	0.86
	①	35.1	1.76	1.33	0.74
Tomigusuku	②	30.5	1.85	1.44	0.85
	③	13.7	1.95	1.71	1.32
	*	35.4	1.68	1.24	0.90
	①	37.4	1.56	1.16	0.91
Komesu	②	34.5	1.70	1.28	0.96
	③	18.0	1.79	1.51	1.32

* Drying in the air

Ⅲ　結果と考察

1. 乾燥特性曲線

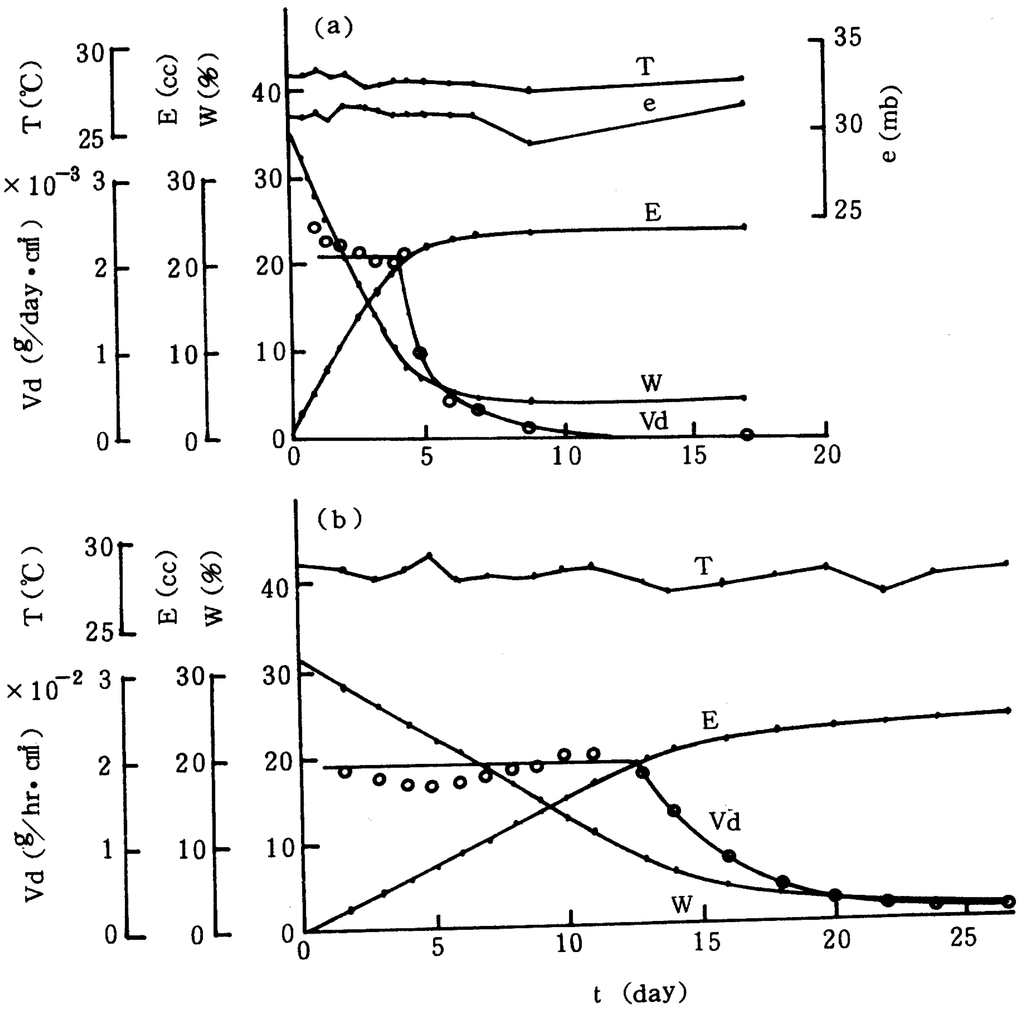

Fig. 2. Drying characteristic curves (Yagaji, remoulded)
(a) In the air　(b) In the desiccator
where W : Water content, Vd : Drying rate, E : Evaporation,
T : Temperature, e : Vaper pressure, t : Time

Fig. 2は乾燥特性曲線の一例で，Yagajiの練返し試料についての大気中における場合と乾燥剤による場合の諸要素間の関係を示す。図において乾燥速度を Vd，含水比をW，蒸発量をE，乾温をT，蒸気圧をe，時間をtで表わしている。WとE曲線はVd曲線の折れ点付近で急変しているが，Table 3によると，各供試土塊のW曲線における最大曲率は限界含水比の出現よりも遅れて現われ，どちらかというと減率乾燥第1段から第2段への転移点の含水比に近い。そしてE曲線の場合はその一次変化終了点がVd－t曲線の折れ点と対応しているようである。また図から分かるように，大気中における乾燥試験では乾燥速度が大きいため，測定中の供試土塊上下面に凹型の収縮変形が起っているものやわずかながらき裂の発生が認められたものもある。

Table 3. Drying and shrinkage factors

Specimen		Wc(%)	W_{12}(%)	Wcu(%)	Ws(%)	Pc(%)	$_oC_{vc}$
(Remoulded)	*	11.0	7.5	6.5	21.9	18.8	1.59
	①	11.0	6.0	5.0	21.2	18.5	1.58
Yagaji	②	11.0	7.5	6.0	21.6	15.0	1.58
	③	7.5	6.0	4.5		13.2	
	*	14.0	11.0	13.5	24.0	26.5	1.63
Kin	①	12.0	8.9	8.0	24.2	27.3	1.65
	②	12.0	9.0	8.5	23.8	24.4	1.64
	③	12.5	10.0	10.0	23.3	21.8	1.61
	*	12.5	9.0	9.0	14.9	30.4	1.38
	①	12.5	9.0	9.0	14.6	29.7	1.40
Tomigusuku	②	12.0	9.0	9.0	15.8	26.0	1.40
	③	12.5	11.0	8.5	13.7	24.2	1.34
	*	13.0	13.0	13.0	19.1	29.5	1.50
	①	11.0	7.5	5.5	20.4	27.5	1.55
Komesu	②	11.0	7.5	5.5	20.2	26.5	1.55
	③	11.5	7.5	5.5	18.5	25.7	1.46
	*	10.0	7.5	5.5	22.8	21.8	1.56
	①	7.0	5.0	5.0	23.9	20.1	1.61
Kaolin	②	7.5	5.0	4.5	22.1	19.0	1.58
	③	7.5	5.5	5.5	21.3	16.8	1.52
	*	12.5	6.0	5.0	25.0	8.0	1.59
	①	12.5	7.5	4.5	25.0	7.3	1.58
Yagaji	②	11.0	7.5	5.5	23.5	7.2	1.56
	③	10.0	4.5	4.5		5.9	
	*	13.0	13.0	11.5	27.4	14.2	1.60
	①	12.0	10.0	8.5	25.8	14.8	1.57
Kin	②	12.5	9.0	7.0	23.2	14.9	1.49
	③	12.0	10.0	10.0		11.8	
	*	12.5	12.0	9.0	15.3	17.5	1.36
	①	13.0	12.5	9.0	16.7	20.8	1.38
Tomigusuku	②	12.5	10.0	10.0	16.3	16.8	1.39
	③	12.5	12.5	8.5		13.2	
	*	13.0	13.0	13.0	22.7	15.8	1.51
	①	10.0	6.5	5.5	22.0	16.9	1.43
Komesu	②	7.5	6.0	5.5	20.0	14.4	1.37
	③	7.5	5.5	5.5		13.4	

Note * Drying test results in the air, Wc: Critical water content, W_{12}: Water content in the boundary from the first stage of drying in decreasing rate to the second stage of drying in decreasing rate, Wcu: Water content which corresponds to the maximum curvature of water content — time curve, Ws: Shrinkage limit, Pc: Percentage of cubical contraction, $_oC_{vc}$: Coefficient of volumetric change (at $W = 0$)

2. 乾燥速度曲線

土塊の乾燥が行なわれるには，まず表面から蒸発が起り，内部に水分の濃度差を生じる。水分は濃度の大なる内部から小なる表面へ拡散し，表面に存在する空気膜を通じて空気中へ蒸発拡散し，乾燥が終結するまで続く。[10)]

乾燥速度曲線は，恒率乾燥・減率乾燥第1段および第2段からなり，恒率から減率に移行する限界含水比は定常乾燥条件下でやや一定値を示す。恒率乾燥における土壌水分の蒸発は毛管水の補給によって土塊表面で行なわれるため，水分減少率が一定である。そしてその乾燥速度は土性や密度等と密接な関係にある。減率乾燥第1段では未だ表面蒸発が主要素であるが，土塊表面に幾分乾燥域が形成されるために有効蒸発面積が減少する。その段階は乾燥曲線において一次式で示され，含水範囲が狭く次に続く第2段との境界が明白でない。含水比にたいして曲線的に逓減する第2段では水分の内部拡散が主要素になり，コロイド分，毛管現象，粒子の大きさ，土塊の寸法・形状等が影響因子となる。[6)]

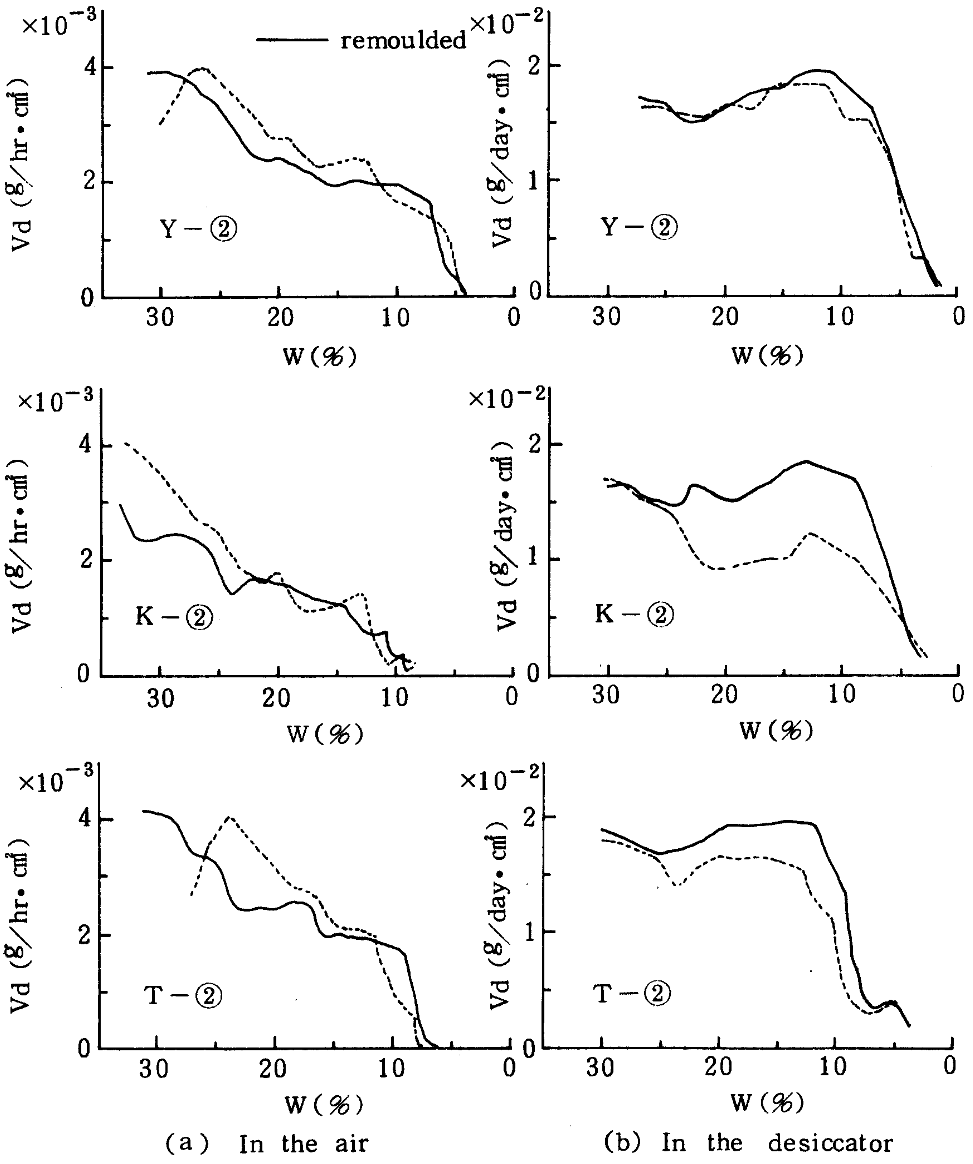

Fig. 3. Drying rate curves

Fig. 3の(a)に大気中における乾燥試験結果の2, 3の例を示す。曲線は基本的には3つの段階から成り立ち，各試料によって曲線の形状は異なる。そしていずれの恒率乾燥領域も凹凸が激しいばかりでなく，傾斜していて，限界含水比が明確に現われないため，その位置の判定が難かしい。これに対して乾燥剤による場合は外的な影響因子を最小限にし，低速で乾燥させているため，Fig. 3 (b)に示すように恒率乾燥において凹凸が多少あっても，減少第1段と第2段への転移点が各曲線で明確に現われており，さらに第1段の含水範囲が狭小であることからほとんどの場合限界含水比は決定できる。Table 3から分るように，限界含水比はIcや密度の変化に対してあまり反応を示さない。また練返すことによって乾燥速度が幾分増大するものの，限界含水比にはほとんど変化がみられない。

3. 体積—水分量関係

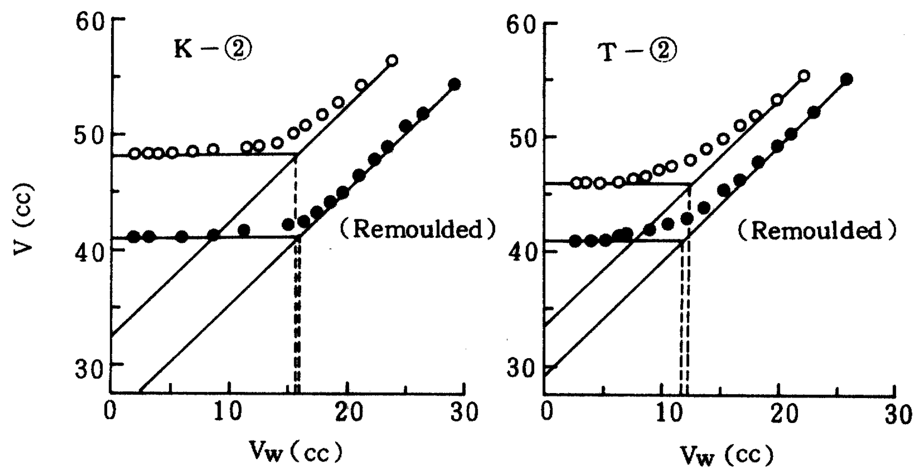

Fig. 4. Relation between soilvolume (V) and water volume (Vw)

Fig. 4は乾燥剤による場合の，収縮過程図の一例を示す。曲線は基本的には2つの段階からなり，初期の真収縮段階においては土粒子間ゲキが水で満たされているため，毛管水の減少は同量の体積の減少となって現われるので水平と45°の直線をなし，残収縮段階では粘土膠質物の膨潤水から吸湿水までの蒸発に伴なう[2]変化なので水平となす変化角度が30°，20°…… と，漸減しながら平衡状態に達する。

一般に，真収縮長は土が流出限界まで水を含み得るCapacityによって決まり，[5,10]液性限界や塑性指数の大きいものほど大きい。しかし本実験では成形時の圧密効果と初期段階における計測の問題を重視してIcを決めているので，収縮の始発点が従来の収縮試験におけるペースト状の試料よりかなりたかめの状態にあり，真収縮の初期の部分（流出限界付近）が出現しないような収縮過程図となる。特に練返しでない場合には直線段階が短かくなる傾向にあり，Icの大きいものでは乾燥初期において早くも空気の侵入が起っており，そのまま残収縮へと移行する。

収縮限界は含水比がそれ以上減少しても収縮の起らない限界の含水比である。一般には完全乾燥した時の土の体積を収縮限界の時の土の体積に等しいと考え，また収縮限界では土中の間ゲキが完全に水で満たされているものとしてその間ゲキ中の水の重量と土粒子重量から求めた含水比を収縮限界としているのに対し，本報では土塊の乾燥段階で体積と含水量を繰返し測定することによって得られた収縮過程図において第1段階の延長線と第3段階の水平部との交点に対応する含水比をもって収縮限界とし

ている。Table 3によると，収縮限界は試料によって定まった値を示し，Icの影響をほとんど受けない。

成形後の含水比が収縮限界よりも小さい供試土塊では，収縮過程は第1段階を経ずしていきなり第2か第3段階に移っているため45°直線の位置が定まらず，収縮限界および後述する $_o$Cvc は求められない。

また収縮限界は限界含水比と一致するといわれるが，[6,12] Table 3によると，収縮は限界点に達する相当以前に終了しているようである。[10] Tomigusuku を除けば，ほとんどの試料において100％前後の隔たりがあり，興味ある結果であるが，これについては結論を出す前に，さらに検討する必要がある。

4. 収縮率とIc

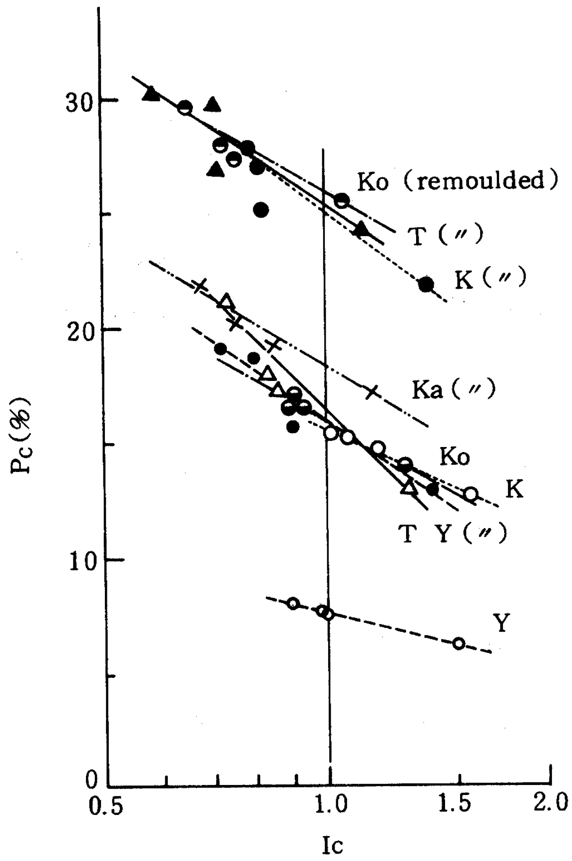

Fig. 5. Relation between percentage of cubical contraction (Pc) and consistency index (Ic)

各試料の収縮率（$Pc = (Vi - Vo)/Vi \times 100$）を表示すれば Table 3 の如くである。先のFig.4に示したような収縮過程において収縮の始発点の土塊体積 Vi から最終的な平衡水分に達した土塊体積 Vo までの収縮率は始発時のIcの値によって大きく変わっている。もちろん各試料の成形前の含水比は，Ic ＝0.6に基づいているので，圧密後の出来上り供試土塊間のIcの差は試料の圧密特性の違いによるものである。したがって，得られた収縮率は各供試土塊のIcおよび密度に対応した値であると解釈できる。

Fig. 5はIcに対する収縮率の変化を示したもので，$Pc = a \log_{10} Ic + b$ の関係がある。練返したK，T，Koが一つの集団をK，T，Ko および練返したYとKa が別の集団を形成し，Yだけがa，b 共に小さ

い。すなわち可塑性の大きな試料程それらの係数は大きく，[12] また練返すことによって収縮率が増大していることが分る。

各試料について収縮率を比較するためにFig. 5において $Ic=1$ に対応する P_C を読み取ると次の順になる。26.0％（remoulded Ko），25.5％（remoulded T and K），18.8％（remoulded Ka），16.5％（T），16.0％（Ko and remoulded Y），15.6％（K），7.3％（Y）。

5. 体積変化係数

収縮率の概念は初期状態から乾燥後の土塊の状態までの体積変化を比較しているが，初期状態の違いは当然圧密成形後の土構造・密度等に反映されるため，真に土の収縮特性を解明するには不十分である。そこで実際に収縮に伴なって土粒子同志の関係が土構造と関連してどのようになるかという観点から，含水比の異なる試料を比較するのに便利でかつ収縮過程における土粒子の充填状態を表示する体積変化係数[9,13]（Coefficient of volumetric changes : Cvc＝供試体容積／土粒子固相容積）を使用することは有効である。

体積変化係数と含水比の関係では，収縮初期の直線部分の延長はすべて $Cvc=1.0$（土粒子体積のみ）を通り，第2段階は供試体作成時に封入された空気の影響で45°斜線上を幾分離れて延び，第3段階の収縮過程と交わる。その体積変化終了点を直接水平移動させて$_0Cvc$（$W=0$のCvc）と一致させる。$_0Cvc$は試料によって大きく変化し，練返しの影響も認められるが，Icおよび密度とは無関係にほぼ一定である。各試料における $_0Cvc$の平均値を順に示すと，1.64（remoulded K），1.58（Y, remoulded Y and Ka），1.55（K），1.53（remoulded Ko），1.44（Ko），1.39（remoulded T），1.38（T）となる。

6. 配列指数

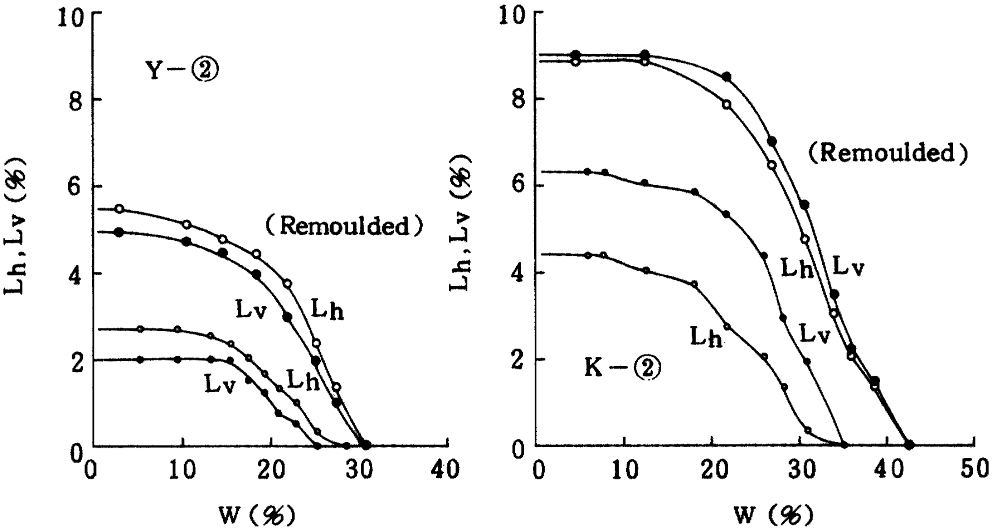

Fig. 6. Relation between percentages of horizontal (Lh) and vertical (Lv) linear shrinkage and water content (w)

収縮挙動を土の構造状態と関連させて考察する場合，水平方向と垂直方向の線収縮の量的割合がよく用いられる。[8] Fig.6に線収縮曲線の一例としてYとKの結果を示す。図においてYは水平方向の線収縮率が大であり，Kでは逆の現象を示す。他の試料でも練返しの影響が顕著であり，Ic や密度に対してもある法則に従って変化しているようである。

そこで，土構造の変化と収縮挙動との関係をさらに詳しく検討するために配列指数（coefficient of particle orientation ：Cpo＝水平方向収縮率／垂直方向収縮率）を用いる。[7,9,13] これは，Cpo＝1の場合に収縮過程が等方配列を，Cpo＜1の場合に平行配列を意味する。

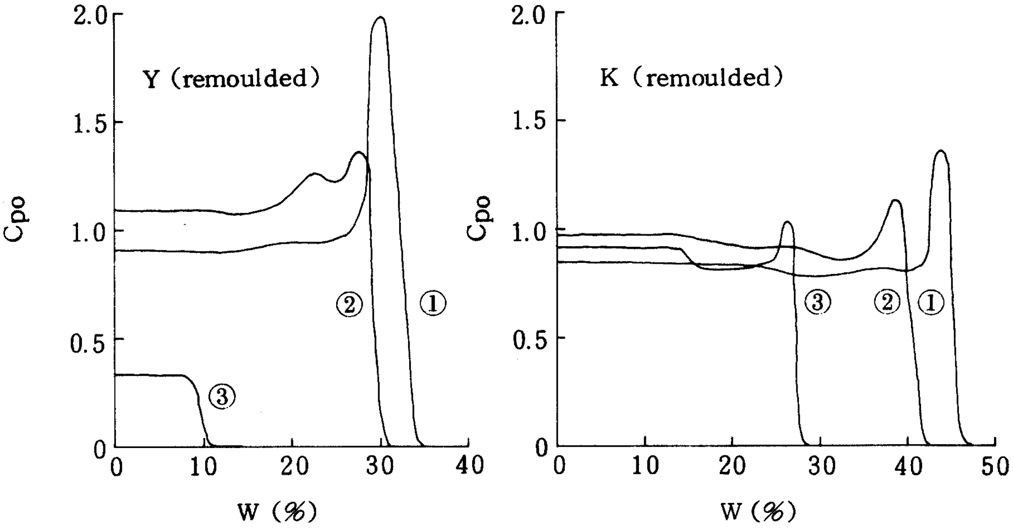

Fig. 7. Relation between coefficient of particle orientation (Cpo) and water content (W)

Fig.7は含水比の変化に対するCpoの変化過程を図示したものである。Cpo曲線は試料およびIcによってその収縮初期段階の形状を異にする。すなわち水分減少と共に急上昇・急降下を示した後ほぼ一定値に落ち着くもの（Y，K，T試料）と急上昇後ただちに定常状態になるもの（Ko試料と他試料においてIcの大なるもの）がある。その最終的なCpo値が，Cpo＝1近傍，Cpo＞1およびCpo＜1のいずれに属するかをIc別にみると，Ic＝1.15を境にしてそれより小なる場合にCpo≧1，逆に大なる場合（remoulded Kを除く）にCpo＜1となる。言い換えれば，Ic＝0.68～1.15の範囲で配列指数が1近傍にあるのは，練返しの場合も含め，作成時の圧密の際，土粒子が等方配列を示す結果であり，また1.15以上の場合は平行配列を示すためだと思われる。これは，供試土塊作成含水比の高いほどCpoが小さくなり，[9] 不撹乱土（発達した団粒構造を有す）でほぼ1を，練返した土（団粒構造が破壊されている）で1以下の値を示す[13]という知見と異なるが，ちなみに佐藤[9]の結果を分析すると，Cpoが1に近い供試土塊の初期含水状態 Wi＝36.12はIc＝0.63に相当し，Ic＝0.68～1.15の場合と連続させれば矛盾しない。またIc＝1.15以上の状態（高密度）が，佐藤の高い含水状態（Icが小さく，低密度）と同じ平行配列になるということについては矛盾が感じられ，双方で密度や乾燥速度が異なる等の比較出来ない面があるため，ここでは比較的密度の高い状態の供試土塊に関する低速度の乾燥と土塊全面からの水分蒸発によって得られた実験結果の解析だけにとどめる。

Ⅳ 結　　論

比較的密度の高い領域の作成供試土塊について乾燥・収縮特性を追求し，次の結果を得た。

(1) 土塊の乾燥に伴なう含水比減少曲線の最大曲率の点は減率乾燥第1から第2段への転移点に相当する。

(2) 限界含水比や収縮限界は Table 3 に示すとおり，コンシステンシー指数（Ic）や乾燥密度（γd）の影響をほとんど受けない。

(3) 土塊の収縮は限界点に達する相当以前に終了しており，収縮限界と限界含水比は一致しない。

(4) 収縮率（Pc）と Ic の間には Fig. 5 に示すような関係があり，可塑性の大きな土程 Pc が大きい。

(5) 体積変化係数 Cvc は Ic やγd と無関係だが，練返しの影響を多少受ける。各試料における。Cvc（W＝0の Cvc）の平均値は Kin と Yagaji で比較的大きく，Tomigusuku で小さい。

(6) 配列指数によって検討すると，土粒子は Ic＝0.68～1.15の範囲で等方配列を示し，1.15以上では平行配列を示す。

なお以上の点については今後さらに条件をかえて検討する必要がある。

おわりに，本研究の遂行にあたり，専攻生であった宜志富紹春氏の御協力があったことを付記し謝意を表します。

参　考　文　献

1. 藤川武信，宜保清一　1975　乾燥過程と雨滴の衝撃作用による土塊崩壊，自然災害特別研究成果 "沖縄開発に伴う土地環境の変化と防災に関する研究" 61～65

2. 宜保清一　1975　代表的沖縄本島土壌の乾燥過程とスレーキングの関係，琉球大学農学部学術報告**22**：279～287

3. ―――　1976　受食性土塊の崩壊と乾燥の関係，第47回農土学会九州支部シンポジウム "沖縄の特殊土壌" 21～33

4. ―――　1976　代表的沖縄本島土壌層の乾燥特性，琉球大学農学部学術報告**23**：269～280

5. Heines, W. B. 1923 The volume-changes associated with variations of water content in soil, J. Agr. Sci. **13**：296～310

6. 亀井三郎　1925　空気の調湿及乾燥 P55,77,東京，共立出版

7. 小橋英夫　1964　粘土の構造とその表示法，土壌物理研究 **1**：18～22

8. 長堀金造，荻野芳彦　1973　土壌構造と収縮変化について―干拓地水田土壌の土層改良に関する研究（Ⅲ）―，農業土木学論文集**43**：1～6

9. 佐藤晃一　1968　重粘土の物理特性に関する研究―粘土の収縮挙動について（Ⅰ）―，農業土木学会論文集**24**：31～36

10. 庄司英信，岸上定男　19　粘土塊の自然乾燥における二，三の問題に就て，農業機械学会誌 **13**（3，4）：27～33

11. 竹中　肇　1965　収縮挙動より見た土の工学的性質，農業土木学会論文集**14**：32～40

12. 山沢新吾　1956　代掻に於ける土塊の崩壊機構に関する実験的研究第1報，P59～75，東京教育大学農学部農工研究所彙報第7号，東京

13. 矢沢正士　1977　粘土質土壌の収縮挙動におよぼす吸着カチオンの影響―粘質土の物理的挙動と吸着カチオンに関する研究（Ⅲ）―，農業土木学会論文集**67**：30～36

Summary

Experimental studies were made on the drying and shrinkage characteristics of soil blocks.

The results obtained are as follows;

1. The water content at the maximum curvature of the water content-time curve corresponds to that in the boundary from the first stage of drying in decreasing rate to the second stage of drying in decreasing rate.

2. The critical water content and shrinkage limit are not affected very much by the consistency index (I_C) and dry density (γd) as showed in Table 3.

3. The shrinkage behavior of the soil blocks finishes considerably before reaching the critical water content.

4. The percentages of cubical contraction (P_C) are related to I_C as showed in Fig. 5, the more plasticity of a soil the larger Pc.

5. The coefficients of volumetric changes (C_{VC}) of the soil blocks have not to do with I_C and γd, but there is some difference in the shrinkage behavior due to remoulding, the averages of $_0C_{VC}$-values (Cvc at w = 0) of each of the samples are relatively large in Kin and Yagaji, and very small in Tomigusuku, Okinawa Island.

6. On the basis of the coefficient of particle orientation, the particle arrangement during shrinking of the soil block of I_C in the range of 0.68 - 1.15 has a isotropic arrangement and that above 1.15 is parallel.