

根を模したピンペネトロメータによる土壌硬度の測定について

鈴木哲也¹・小杉有由²・佐藤正章²・山脇健司²・佐藤泰一郎²

(¹大学院農学研究科農業工学専攻・²農学部生産環境工学科農林環境講座)

The Measurement of Soil Hardness Using the Pinpenetrometer to Imitate a Root.

Tetuya SUZUKI¹, Tomoyoshi KOSUGI², Masahiko SATO², Kenji YAMAWAKI²
and Taiichirow SATO²

¹;Graduate school of Agriculture for Engineering

²;Chair of Agriculture and Forestry Environmental Engineering, Department of
Environmental Technology, Faculty of Agriculture

Abstract: The measurement of the soil hardness has been done until now by SR II type penetration hardness indicator and Yamanaka type hardness indicator. When using these measurement devices to evaluate the growth of roots and how they are influenced by the soil hardness, there is a problem with the shape and size of the devices. So, these studies used the hardness indicator (pinpenetrometer) to imitate a root, measuring the hardness of the soil and the extent to which elongation in the soil took place and a detailed statistical analysis was made. As a result it was found that soil hardness, as measured by the pinpenetrometer, increased either with dry bulk density or with decrease in the water content. As for distribution of the soil hardness, the range spreads with the increase of the mean. When the distribution range is wide the standard deviation of hardness increases.

はじめに

根の生育を直接制限する主要因子である、土壌硬度の測定は、SR II 型貫入硬度計や山中式硬度計により行われてきた¹⁾。しかし、これらの測定装置は、主に機械の地耐力の評価などに用いるものであり、根の生育に対する土壌硬度の影響を評価する方法としては、測定部の形状や大きさに問題がある。また、土壌は、場所により密度や水分が異なり、硬度も変化している。これらのことから、土壌硬度の測定は、根の直径に非常に近い探針を持つ硬度計により行われるようになった²⁾。これまで、根の生育におよぼす土壌硬度の影響については、TAYLOR AND GARDNER³⁾による土壌への根の貫入と硬度との関係に関する研究や、BENGOUGH⁴⁾による根の伸長速度と土壌硬度との関係に関する研究が行われてきた。しかし、これらの研究は、土壌硬度を平均値でのみ評価しており統計的解析は十分ではない。

そこで、本研究では、土壌硬度に影響する乾燥密度と含水比を調整した供試体を作製して、根を模した硬度計（ピンペネトロメータ）により根が伸長するスケールで土壌硬度を詳細に測定し統計

的解析を試みた。

供試土壌

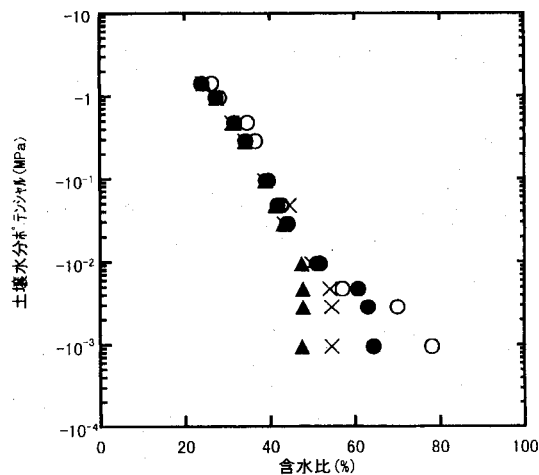
1. 黒ボク土畑表土

供試土壌は、黒ボク土畑表土と灰色低地土心土であり、これらの物性値を第1表に示す。

第1表 土壌の物性

土 壌	土の真比重 (g/cm ³)	有機物含量 (wt.%)	粒径組成(mm)			土 性
			粘土<0.002	0.002≤シルト≤0.02	0.02<砂	
黒ボク土畑表土	2.61	14.27	26.2	23.1	50.7	Lic
灰色低地土心土	2.68	—	51.0	13.0	36.0	HC

黒ボク土畑表土は、茨城県日立市の熟畑から採取し2mmフルイを通過させたものである。締固め最適含水比は41wt.%であった。この土壌は、含水比を39~42wt.%に調整した後に計測用円筒(100cc)へ圧縮充填した。充填の乾燥密度は0.8, 0.9, 1.0, 1.1g/cm³とした。計測用円筒へ圧縮充填した土壌は、水分を調整して供試体とした。水分調整は、各乾燥密度で含水比30, 35, 41, 45, 50 wt.%とした。黒ボク土畑表土の土壌水分ポテンシャルと含水比の関係を第1図に示す。



第1図 黒ボク土畑表土の土壌水分ポテンシャルと含水比の関係

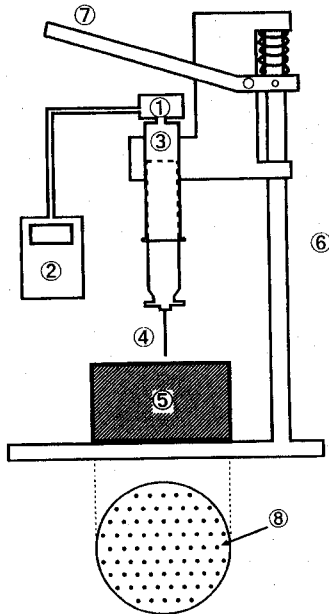
(○: 乾燥密度 0.80 g/cm³, ●: 乾燥密度 0.90 g/cm³)
(×: 乾燥密度 1.00 g/cm³, ▲: 乾燥密度 1.10 g/cm³)

2. 灰色低地土心土

灰色低地土心土は、茨城県つくば市で採取し、十分に水を加えた後に0.42mmフルイを通過させたものである。この土壌は、載荷重0.5kg/cm²または1.0kg/cm²を30日間かけて圧密した後に、さらに水分を調整して供試体とした。水分調整は、加圧板式水分抽出器により、載荷重0.5kg/cm²で加圧量0.1, 0.3, 0.5, 1.0MPa, 1.0kg/cm²で1.0MPaとした。

測定方法

土壌硬度の測定は、測定部の形状が根の直径に非常に近い硬度計（ピンペネトロメータ）により行った。この測定装置の概要を第2図に示す。ピンペネトロメータは、先端が平らな直径0.8mm、全長50.0mmのステンレス製注射針をピストンに取り付け、針が受けた荷重をシリリンダー内の水を介して力計により測定するものである。力計は、1~999gfの範囲を1gf単位で測定が可能なものを使用した。ピンペネトロメータは、スタンドに固定してあり、レバーを操作することにより垂直に供試体へ貫入させることができる。



第2図 土壌硬度測定装置の概略図と測定位置

- (①: 圧力センサー ②: 表示計 ③: 蒸留水)
 (④: 注射針 ⑤: 供試体 ⑥: スタンド)
 (⑦: レバー ⑧: 測点 ●)

土壌硬度の測定位置は、直径5.0cmの円の中心から一辺が5.0mmの正三角形を放射状に描き、正三角形の73の頂点を測点とした。測定には、計測用円筒の蓋に直径2.0mmの穴を開け、測定用ガイドとして利用した。ピンペネトロメータによる土壌硬度は、探針を貫入速度約10mm/sで供試体表面から10mmまたは5mmまで貫入させたときの力計の最大値とした。

また、黒ボク土畑表土は、山中式硬度計で別途同様な条件で土壌硬度を測定した。

測定結果

1. ピンペネトロメータによる土壌硬度

(1) 貫入深10mmの場合

1) 黒ボク土畑表土

黒ボク土畑表土の貫入深10mmにおける土壌硬度は、乾燥密度と含水比を調整した供試体で10反復の測定を行い730点の測定値を得た。そこで、土壌硬度の基本統計量を第2表に示す。土壌硬度の平均値は、乾燥密度の増加に伴い増加する。また、同一乾燥密度では含水比の低下に伴い増加する。土壌硬度の標準偏差は、平均値の増加に伴い大きくなる。土壌硬度の分布は、歪度が0.029~1.022の範囲にあることから、ほぼ右裾に広がる分布を示し、平均値の増加に伴い分布範囲が拡大する傾向にある。

2) 灰色低地土心土

灰色低地土心土の貫入深10mmにおける土壌硬度は、1~3反復の測定を行い73~219点の測定値を得た。そこで、土壌硬度の基本統計量を第3表に示す。灰色低地土心土の供試体は、ほぼ正規収縮

第2表 ビンペネトロメータによる土壌硬度(黒ボク土畑表土, 貫入深 10mm)

乾燥密度 (g/cm ³)	含水比 (wt.%)	ビンペネトロメータによる土壌硬度 (gf)					標準誤差 (gf)	標準偏差 (gf)	分散	尖度	歪度	範囲	標本数	信頼区間 (95%)
		平均値	中央値	最頻値	最小値	最大値								
0.880	50.06	19.0	18	18	8	38	0.21	6	32	0.124	0.653	30	730	0.41
0.880	44.91	32.2	33	34	5	72	0.42	11	131	-0.259	0.202	67	730	0.83
0.799	41.15	53.2	53	47	13	111	0.66	18	315	-0.343	0.207	98	730	1.29
0.799	34.95	73.5	75	74	12	200	0.87	24	556	0.972	0.029	188	730	1.71
0.801	29.87	84.1	81	69	15	210	1.12	30	921	0.975	0.800	195	730	2.21
0.901	49.35	20.5	20	21	5	63	0.28	8	59	2.010	0.844	58	730	0.56
0.896	45.27	32.8	32	26	9	90	0.39	10	109	1.526	0.707	81	730	0.76
0.906	39.84	74.4	73	73	34	174	0.66	18	323	2.839	1.022	140	730	1.31
0.891	35.67	77.5	74	56	23	181	1.00	27	724	0.487	0.645	158	730	1.95
0.899	30.07	141.6	137	201	9	345	2.36	64	4063	-0.157	0.332	336	730	4.63
1.001	49.78	35.3	33	31	2	117	0.57	15	237	2.048	1.017	115	730	1.12
0.995	45.43	68.5	68	60	20	140	0.79	21	453	-0.052	0.364	120	730	1.55
1.005	39.76	177.4	174	183	87	336	1.33	36	1291	0.279	0.452	249	730	2.61
0.990	36.09	157.7	151	127	32	344	1.86	50	2537	0.033	0.505	312	730	3.66
1.001	29.84	267.3	265	317	21	622	4.11	111	12354	-0.291	0.146	601	730	8.08
1.085	50.79	84.2	78	75	14	224	1.33	36	1297	0.474	0.763	210	730	2.62
1.091	45.64	110.2	105	68	34	280	1.50	40	1633	-0.116	0.547	246	730	2.94
1.113	39.28	252.1	248	268	94	584	2.25	61	3700	1.097	0.381	490	730	4.42
1.090	35.64	289.1	287	177	63	613	3.41	92	8466	0.191	0.327	550	730	6.69
1.099	29.85	388.1	391	354	55	718	4.29	116	13419	0.113	0.037	663	730	8.42

第3表 ビンペネトロメータによる土壌硬度(灰色低地土心土, 貫入深 10mm)

載荷量 (kg/cm ²)	加圧量 (MPa)	乾燥密度 (g/cm ³)	含水比 (wt.%)	ビンペネトロメータによる土壌硬度 (gf)					標準誤差 (gf)	標準偏差 (gf)	分散	尖度	歪度	範囲	標本数	信頼区間 (95%)
				平均値	中央値	最頻値	最小値	最大値								
0.5	1.0	1.198	46.31	15.1	15	11	4	30	0.39	6	33	-0.584	0.129	26	219	0.76
0.5	3.0	1.278	42.21	20.8	19	10	5	53	1.23	10	110	-0.296	0.577	48	73	2.44
0.5	5.0	1.354	37.41	54.5	55	66	20	114	1.29	19	362	-0.167	0.337	94	219	2.53
0.5	10.0	1.367	36.01	112.8	114	139	36	185	2.85	34	1190	-1.027	-0.217	149	146	5.64
1.0	10.0	1.446	30.65	193.1	193	194	40	443	5.37	79	6312	-0.185	0.371	403	219	10.58

の範囲にあり、乾燥密度の増加(含水比の減少)に伴い土壌硬度が増加する。土壌硬度の標準偏差は、平均値の増加に伴い大きくなる。土壌硬度の分布は、ほぼ右裾に広がる分布を示し、平均値の増加に伴い分布範囲が拡大する。

(2) 貫入深 5mmの場合

1) 黒ボク土畑表土

黒ボク土畑表土の貫入深5mmにおける土壌硬度は、5反復の測定を行い365点の測定値を得た。そこで、土壌硬度の基本統計量を第4表に示す。貫入深5mmの土壌硬度は、貫入深10mmの場合と同様に、右裾に広がる分布を示し、乾燥密度の増加もしくは含水比の低下に伴い平均値が増加するとともに分布範囲が拡大する。土壌硬度の標準偏差は、分布範囲が広いものほど大きくなる。また、本測定での最大値823gf(乾燥密度1.099g/cm³,含水比30.15wt.%)を貫入深5mmで測定した。

2) 灰色低地土心土

灰色低地土心土の貫入深5mmにおける土壌硬度は、1~3反復の測定を行い73~219点の測定値を得た。そこで、土壌硬度の基本統計量を第5表に示す。貫入深5mmの土壌硬度は、貫入深10mmの場合と同様に、乾燥密度の増加(含水比の減少)に伴い平均値が増加するとともに分布範囲が拡大する。

第4表 ピンペネトロメータによる土壌硬度(黒ボク土畑表土, 貫入深 5 mm)

乾燥密度 (g/cm ³)	含水比 (wt.%)	ピンペネトロメータによる土壌硬度 (gf)					標準誤差 (gf)	標準偏差 (gf)	分散	尖度	歪度	範囲	標本数	信頼区間 (95%)
		平均値	中央値	最頻値	最小値	最大値								
0.798	50.35	14.7	14	14	3	33	0.29	6	31	0.204	0.593	30	365	0.57
0.794	45.05	22.7	21	17	6	55	0.49	9	87	0.356	0.763	49	365	0.96
0.798	41.24	35.0	34	24	10	75	0.62	12	140	-0.425	0.314	65	365	1.22
0.808	34.26	46.3	45	42	27	172	0.56	11	113	53.757	4.830	145	365	1.09
0.805	30.15	55.5	55	53	34	95	0.46	9	78	1.797	0.609	61	365	0.91
0.902	50.05	41.6	37	25	11	602	1.82	35	1210	185.588	11.702	591	365	3.58
0.903	44.91	43.4	41	44	12	111	0.93	18	316	0.963	0.903	99	365	1.83
0.899	41.71	60.7	58	63	17	170	1.12	21	457	1.603	0.930	153	365	2.20
0.904	34.61	107.4	98	94	20	323	2.57	49	2420	0.978	0.878	303	365	5.06
0.901	29.94	113.1	107	105	14	286	2.53	48	2334	0.959	0.789	272	365	4.97
1.001	49.70	75.1	72	72	23	168	1.33	25	644	0.496	0.629	145	365	2.61
1.008	44.47	93.4	85	60	10	285	2.44	47	2172	0.446	0.814	275	365	4.80
1.003	40.52	144.6	134	140	41	514	3.06	59	3426	1.195	1.305	473	365	6.03
1.000	35.03	211.1	205	189	51	477	4.09	78	6115	-0.164	0.412	426	365	8.05
1.000	30.06	188.6	177	138	45	571	4.06	78	6020	2.146	1.039	526	365	7.99
1.103	50.11	132.4	128	102	34	326	2.59	50	2451	0.877	0.751	292	365	5.10
1.115	44.39	159.1	152	147	49	394	2.91	56	3097	1.585	0.957	345	365	5.73
1.107	40.85	248.0	236	236	94	545	4.08	78	6075	0.841	0.842	451	365	8.02
1.103	34.84	346.4	331	298	112	721	5.72	109	11959	0.047	0.480	609	365	11.26
1.099	30.15	360.6	356	261	103	823	7.44	142	20214	-0.288	0.324	720	365	14.63

第5表 ピンペネトロメータによる土壌硬度(灰色低地土心土, 貫入深 5 mm)

載荷量 (kg/cm ²)	加圧量 (MPa)	乾燥密度 (g/cm ³)	含水比 (wt.%)	ピンペネトロメータによる土壌硬度 (gf)					標準誤差 (gf)	標準偏差 (gf)	分散	尖度	歪度	範囲	標本数	信頼区間 (95%)
				平均値	中央値	最頻値	最小値	最大値								
0.5	1.0	1.209	45.97	16.34	17	19	4	39	0.43	5	27	1.704	0.436	35	146	0.86
0.5	3.0	1.286	41.70	26.67	26	31	11	52	1.06	9	82	0.019	0.478	41	73	2.11
0.5	5.0	1.353	37.59	64.59	65	73	26	112	1.13	17	280	-0.286	0.162	86	219	2.23
0.5	10.0	1.362	35.16	80.17	79	66	33	142	1.72	25	647	-0.593	0.249	109	219	3.39
1.0	10.0	1.463	31.08	149.05	143	127	58	315	3.50	52	2681	0.138	0.551	257	219	6.90

第6表 山中式硬度計による土壌硬度(黒ボク土畑表土)

乾燥密度 (g/cm ³)	含水比 (wt.%)	ピンペネトロメータによる土壌硬度 (gf)					標準誤差 (gf)	標準偏差 (gf)	分散	尖度	歪度	範囲	標本数	信頼区間 (95%)
		平均値	中央値	最頻値	最小値	最大値								
0.799	50.10	12.4	12	12	12	13	0.13	0	0	-1.043	0.687	1.00	10	0.29
0.801	44.86	13.8	14	14	13	15	0.17	1	0	-0.882	-0.322	1.50	10	0.38
0.800	40.89	18.1	18	18	17	19	0.18	1	0	0.552	-0.478	2.00	10	0.41
0.800	35.24	20.2	20	20	20	21	0.19	1	0	-1.457	0.041	1.50	10	0.42
0.801	29.99	21.2	21	22	20	22	0.22	1	1	-0.378	-0.660	2.00	10	0.51
0.896	50.00	13.2	13	13	12	16	0.31	1	1	4.308	1.736	3.60	10	0.70
0.898	44.98	15.6	16	15	15	16	0.12	0	0	-1.332	-0.208	1.10	10	0.27
0.898	40.91	19.8	20	21	18	21	0.32	1	1	-0.153	-1.018	3.00	10	0.72
0.905	34.41	23.4	23	24	23	25	0.21	1	0	-0.918	0.186	2.00	10	0.48
0.901	30.10	25.7	26	25	25	27	0.22	1	1	-0.378	0.801	2.00	10	0.51
1.001	49.32	19.6	19	19	19	21	0.16	0	0	-0.301	0.711	1.50	10	0.35
0.995	45.46	20.4	20	20	20	21	0.13	0	0	-1.909	0.230	1.00	10	0.29
1.010	39.29	26.1	26	26	25	27	0.14	0	0	1.518	0.741	1.60	10	0.31
1.002	34.66	27.4	27	27	27	28	0.13	0	0	-1.043	0.687	1.00	10	0.29
1.001	30.03	29.2	30	30	28	30	0.29	1	1	-1.807	-0.473	2.00	10	0.66
1.008	50.79	20.6	21	21	20	21	0.13	0	0	-0.864	0.396	1.20	10	0.31
1.105	44.17	23.7	24	24	23	24	0.08	0	0	-1.254	0.460	0.70	10	0.18
1.096	41.07	28.1	28	28	27	29	0.14	0	0	4.425	-1.747	1.60	10	0.32
1.102	34.73	30.3	31	31	30	31	0.08	0	0	-2.277	-0.484	0.50	10	0.18
1.100	30.21	32.1	32	33	31	33	0.19	1	0	-0.544	-0.467	2.00	10	0.44

このとき、土壤硬度の標準偏差は、分布範囲が広いものほど大きくなる傾向にある。

2. 山中式硬度計による土壤硬度

山中式硬度計では10反復の測定を行った。そこで、土壤硬度の基本統計量を第6表に示す。山中式硬度計による土壤硬度は、乾燥密度の増加および含水比の減少に伴い平均値は増加する。しかし、土壤硬度の分布範囲は、いずれの土壤条件においても4mm以内に集中する。このとき、土壤硬度の標準偏差は0~1mmになる。

考 察

1. ピンペネトロメータによる土壤硬度と貫入深の関係

ピンペネトロメータによる土壤硬度は、貫入深が10mm,5mmとも、乾燥密度の増加もしくは含水比の低下に伴い増加する。貫入深10mmと5mmの平均値には、各条件の供試体で4.3~78.7gfの差が認められる。しかし、平均値の差は、乾燥密度や含水比の変化による土壤硬度の増加量よりも非常に小さくなる。このことから、貫入深10mmと5mmに相違はないものと考えられる。貫入深10mmと5mmの測定結果を合わせた土壤硬度を黒ボク土畑表土について第7表に示し、灰色低地土心土について第8表に示す。

第7表 ピンペネトロメータによる土壤硬度(黒ボク土畑表土, 貫入深 10mmおよび5mm)

乾燥密度 (g/cm ³)	含水比 (wt.%)	ピンペネトロメータによる土壤硬度 (gf)					標準誤差 (gf)	標準偏差 (gf)	分散	尖度	歪度	範囲	標本数	信頼区間 (95%)
		平均値	中央値	最頻値	最小値	最大値								
0.799	50.16	17.6	17	15	3	38	0.18	6	36	0.136	0.515	35	1095	0.35
0.798	44.96	29.0	28	21	5	72	0.35	12	136	-0.315	0.391	67	1095	0.69
0.798	41.18	47.1	46	47	10	111	0.55	18	330	-0.262	0.438	101	1095	1.08
0.802	34.72	64.4	60	42	12	200	0.72	24	573	0.721	0.636	188	1095	1.42
0.802	29.97	74.6	67	53	15	210	0.87	29	821	1.824	1.249	195	1095	1.70
0.901	49.58	27.5	23	25	5	602	0.70	23	540	341.644	14.365	597	1095	1.38
0.898	45.15	36.4	34	31	9	111	0.43	14	203	2.941	1.302	102	1095	0.84
0.904	40.46	69.8	69	69	17	174	0.61	20	408	1.729	0.673	157	1095	1.20
0.895	35.32	87.5	81	56	20	323	1.17	39	1487	3.170	1.375	303	1095	2.29
0.900	30.02	132.1	123	160	9	345	1.83	61	3665	0.091	0.532	336	1095	3.59
1.001	49.75	48.6	43	31	2	168	0.81	27	724	1.120	1.095	166	1095	1.60
0.999	45.11	76.8	72	60	10	285	1.03	34	1163	3.568	1.497	275	1095	2.02
1.004	40.01	166.5	166	140	41	514	1.43	47	2239	2.684	0.486	473	1095	2.81
0.993	35.74	175.5	167	189	32	477	2.00	66	4361	0.879	0.857	445	1095	3.92
1.001	29.92	241.1	232	256	21	622	3.26	108	11612	-0.130	0.473	601	1095	6.39
1.091	50.56	100.2	92	75	14	326	1.42	47	2198	1.304	0.964	312	1095	2.78
1.099	45.22	126.5	119	108	34	394	1.56	51	2651	1.838	0.990	360	1095	3.05
1.111	39.80	250.7	244	236	94	584	2.03	67	4491	1.123	0.607	490	1095	3.97
1.094	35.37	308.4	303	321	63	721	3.07	102	10341	0.266	0.498	658	1095	6.03
1.099	29.95	378.9	383	437	55	823	3.80	126	15836	-0.170	0.111	768	1095	7.46

第8表 ピンペネトロメータによる土壤硬度(灰色低地土心土, 貫入深 10mmおよび5mm)

載荷量 (kg/cm ²)	加圧量 (MPa)	乾燥密度 (g/cm ³)	含水比 (wt.%)	ピンペネトロメータによる土壤硬度 (gf)					標準誤差 (gf)	標準偏差 (gf)	分散	尖度	歪度	範囲	標本数	信頼区間 (95%)
				平均値	中央値	最頻値	最小値	最大値								
0.5	1.0	1.202	46.17	15.6	16	19	4	39	0.29	6	31	0.186	0.200	35	365	0.57
0.5	3.0	1.282	41.96	23.7	23	31	5	53	0.84	10	104	-0.311	0.355	48	146	1.67
0.5	5.0	1.354	37.50	59.6	60	66	20	114	0.89	19	345	-0.293	0.141	94	738	1.74
0.5	10.0	1.364	35.50	93.2	89	66	33	185	1.75	33	1118	-0.697	0.357	152	365	3.44
1.0	10.0	1.455	30.87	171.1	165	86	40	443	3.37	71	4972	0.440	0.715	403	438	6.62

2. 土壤硬度の分布と乾燥密度および含水比の関係

土壤硬度の分布は、乾燥密度の増加もしくは含水比の低下に伴い分布範囲が拡大する。乾燥密度の増加は、固相率の増加に伴う間隙率の減少をもたらす。含水比の減少は、土粒子と探針との摩擦を増大させる。そこで、供試土壤の三相分布と硬度の関係を第9表に示す。黒ボク土畑表土では、

第9表 供試土壤の三相分布と硬度の関係

供試土壤	乾燥密度 (g/cuf)	含水比 (wt.%)	三相分布(vol.%)			土壤硬度(gf)	
			固相	液相	気相	平均値	分布範囲
黒ボク土畑表土	0.80	50	30.7	40.0	29.3	17.6	35
	0.80	45	30.7	36.0	33.0	29.0	67
	0.80	41	30.7	32.8	36.5	47.1	101
	0.80	35	30.7	28.0	41.3	64.4	188
	0.80	30	30.7	24.0	45.3	74.6	195
	0.90	50	34.5	45.0	20.5	27.5	597
	0.90	45	34.5	40.5	25.0	36.4	102
	0.90	41	34.5	36.9	28.6	69.8	157
	0.90	35	34.5	31.5	34.0	87.5	303
	0.90	30	34.5	27.0	38.5	132.1	336
	1.00	50	38.3	50.0	11.7	48.6	166
	1.00	45	38.3	45.0	16.7	76.8	275
	1.00	41	38.3	41.0	20.7	166.5	473
	1.00	35	38.3	35.0	26.7	175.5	445
	1.00	30	38.3	30.0	31.7	241.1	601
	1.10	50	42.1	55.0	2.9	100.2	312
	1.10	45	42.1	49.5	8.4	126.5	360
	1.10	41	42.1	45.1	12.8	250.7	490
	1.10	35	42.1	38.5	19.4	308.4	658
	1.10	30	42.1	33.0	24.9	378.9	768
灰色低地土心土	1.20	46	44.8	55.2	0.0	15.6	35
	1.28	42	47.8	52.1	0.1	23.7	48
	1.35	38	50.4	49.5	0.1	59.6	94
	1.36	36	50.7	49.0	0.3	93.2	152
	1.45	31	54.1	45.0	0.9	171.1	403

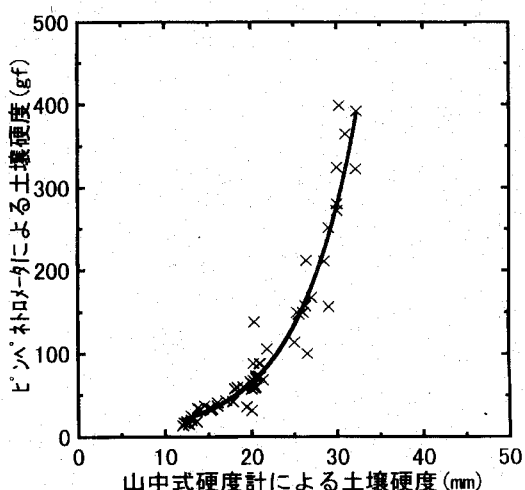
固相率の増加に伴い土壤硬度の平均値が増加するとともに分布範囲が拡大する。これは、固相率の増加により土粒子が移動できる空間(間隙)が減少し、土粒子と探針の摩擦が増大するためだと考えられる。また、固相率が低い範囲では、間隙が増加することにより、探針と土粒子との摩擦が少なくなり、分布範囲が小さくなるものと考えられる。

しかし、土壤硬度は、土壤の間隙だけでなく水分にも影響をうける。灰色低地土心土では、黒ボク土畑表土と比較して、固相率が非常に高いにもかかわらず土壤硬度の分布範囲が小さくなる。これは、灰色低地土心土が間隙は少ないが間隙の飽和度が高いために、土粒子と探針との摩擦が小さくなることによって生じるものと考えられる。

以上のことから、土壤硬度は、乾燥密度と含水比に影響される間隙率と間隙の飽和度により大きく左右される。特に、間隙率が低い場合は、土粒子の移動できる空間が少なくなるとともに、飽和度の低下に伴い探針と土粒子との摩擦が増大して分布範囲が拡大するものと考えられる。

3. ピンペネトロメータと山中式硬度計の関係

ピンペネトロメータと山中式硬度計の関係を第3図に示す。ピンペネトロメータによる土壤硬度は、山中式硬度計で10~20mmの範囲では0~50gfの緩やかな増加を示すが、20~30mmの範囲では50



第3図 ピンペネトロメータと山中式硬度計の関係

~250gfの急激な増加を示す。これは、山中式硬度計では平均的な土壤硬度を測定するのに対して、ピンペネトロメータでは非常に狭い間隔で測定することにより土壤硬度の部分的な相違を測定しているためである。特に、根の生育を阻害する山中式硬度計で22mm⁵⁾付近の土壤硬度は、ピンペネトロメータが山中式硬度計よりも詳細に測定することができる。このことから、ピンペネトロメータによる土壤硬度の測定は、根の生育におよぼす土壤硬度の影響を評価する方法として有効である。

ま と め

ピンペネトロメータによる土壤硬度は、乾燥密度の増加もしくは含水比の低下に伴い平均値が増加するとともに分布範囲が拡大する。しかし、山中式硬度計による土壤硬度は、ピンペネトロメータとは異なり、いずれの土壤条件においても分布範囲が4mm以内に集中する。これは、山中式硬度計が平均的な土壤硬度を測定するのに対して、ピンペネトロメータが土壤硬度を詳細に測定することにより部分的な相違を測定しているためである。特に、根の生育を阻害する山中式硬度計で22mm付近の土壤硬度は、ピンペネトロメータが山中式硬度計よりも詳細に測定することができる。

要 約

土壤硬度の測定は、SR II型貫入硬度計や山中式硬度計により行われてきた。しかし、これらの測定装置は、根の生育に対する土壤硬度の影響を評価する方法としては、測定部の形状や大きさに問題がある。そこで、本研究では、根を模した硬度計（ピンペネトロメータ）により根が伸長するスケールで土壤硬度を詳細に測定し統計的解析を試みた。ピンペネトロメータによる土壤硬度は、乾燥密度の増加もしくは含水比の低下に伴い増加する。土壤硬度の分布は、平均値の増加に伴い分布範囲が拡大する。土壤硬度の標準偏差は分布範囲が広いものほど大きくなる。

キーワード：土壤硬度、ピンペネトロメータ、物性、基本統計量

参考文献

- 1) 長野間宏:農耕地における土壌診断の研究ならびに診断指標と手法の開発. 1 土壌の物理性診断, 土肥誌 65, (3), 341-348, (1994).
- 2) Bengough, A. G. and Mullins, C.E. : Mechanical impedance to root growth :a review of experimental techniques and root growth responses, J. Soil Sci. 41, 341-358,(1990).
- 3) Taylor, H. M. and Gardner, H. R. : Penetration of cotton seedling taproots as influenced by bulk density,moisture content and strength of soil, Soil Sci. 96, 153-156, (1963).
- 4) Bengough, A. G. and Young I. M. : Root elongation of seedling peas through layered soil of different penetration resistances. Plant and Soil 149, 129-139,(1991).
- 5) 三好洋:根群発達の良好な土壌条件から見た畑地の有効土層の検討,土肥誌 43, (3), 92-97, (1972).

平成9(1997)年9月30日受理

平成9(1997)年12月25日発行

