

根圏土壌の理化学性が牧草生育に及ぼす影響

第1報 土壌ち密度と牧草生育との関係

大 崎 亥佐雄† 奥 村 純 一†

EFFECTS OF PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES OF RHIZOSPHERE ON THE GROWTH OF PASTURE CROPS

1. Relations between Soil Compaction and Growth of Pasture Crops

Isao ŌSAKI & Jun-ichi OKUMURA

重粘性土壌は物理性の劣悪条件から低位生産土壌とされ、この改良対策として土地改良事業が広く実施されているが、牧草は普通作物と異なり、物理性に対する特異性を示す。

そこでとくに土壌ち密度との関連で、2, 3 検討した結果、牧草は初期生育では普通作物同様の傾向を示し、極端な土壌ち密度はイネ科牧草において、窒素欠乏現象を惹起させ、収量をも低下させた。この主な原因は固相率の増加で空気孔隙量の減少に伴った酸素不足に起因したものと推察された。しかし経年化に伴って土壌ち密度の影響は緩和される傾向にある。また播種当年の幼牧草に対する限界ち密度を検討したところ、pF 2.0 のとき 10 %以上の空気孔隙量を保持しうることが必要であった。

I 緒 言

北海道には、いわゆる重粘土といわれる特殊土壌が 52 万 ha あるが、そのうち天北地方には約 17 万 ha が分布し、現在農耕地となっているところのほとんどがこの種の土壌を基礎としている。重粘性土壌の特徴は生成分類学的には疑似グライ土とその亜型として位置づけ⁷⁾ されている。そして一般的には表層が浅く、下層土は粘性強く、堅密で通気水性が悪く、かつ有効水分の少ないなど物理的性質の劣悪な土壌としての代名詞のような印象すら与えられている。一方作物栽培面からは上記の特徴を反映して、土壌水分的には排水の不良が過湿を招来し、湿害を被りやすいこと、またこれとは逆に乾燥期には有効水分が少ないことによって同時に干ばつにもかかりやすいこと、土壌

ち密性からは作物根の伸長肥大の抑制を強いられるため、とくに根菜類にとっては不利である。このように土壌的諸条件が交錯し、普通作物栽培上からは低位生産土壌となっており、これが改良対策⁹⁾ として深耕、心土耕、心土破碎および暗渠排水などの諸事業が広く実施されているのが現状である。

さて、近年天北地方では草地酪農が急速の勢いで進展しており、これに伴って草地造成から収穫作業まで一貫した機械化体系のなかで酪農経営が実施されるようになったが、前述のように土壌が粘性の強い、乾燥すると固結して極めて硬い状態になる特性を持っているため、機械運行、放牧などの蹄踏圧が加わり、一層堅密の度合いが早まっている。この結果地力保全の調査基準²⁴⁾ による有効土層の制限層としての土壌硬度 29 を上回るほ場にすら遭遇する。しかしこのように有効土層の

† 天北農業試験場

範ちゅうから除外されるほどの土壌硬度であっても、牧草のみは施肥さえすれば容易に増収するのが実情であって³⁾、草地農業への転換により、かつて冠せられた低位生産土壌なる名称は否定されるにいたった。

以上の事実から考えると牧草は普通作物と異なると土壌の硬さに対する許容範囲が大きいのか、あるいは経年化に伴って牧草自体が物理的劣悪条件に対応しうようになるのか甚だ疑問になる。

一般に土壌硬度とかち密度という述語は非常に内容豊富な物理的諸性質を総括的に表現したものである。山中ら³⁾は土壌硬度とは一種の圧縮抵抗であるから、土壌粒子の充填度をよりち密にするための仕事であるとし、また滝島ら²⁾は土壌ち密度をその土壌に特異的である構造、間隙と相関のある固相割合と、また容積重とも密接な関連を持つとしている。このように土壌がち密化されると、当然土壌硬度とかち密度は高まるが、同時に固相割合とか容積重が増加して、間隙すなわち孔隙が減少する。そしてこの孔隙率の変化によって惹起される土壌水分の動態なども含めた物理的諸性質の機能が牧草生育にどう影響するかが問題となろう。

以上、極めて特異的な牧草の性格を踏みつつ筆者らは草地根圏土壌の理化学性の解明を意図しているが、今回は牧草の生育と土壌ち密度の関係を中心に 2, 3 の検討を行なったので、その結果を

報告する。

なお、本報告は北見農業試験場長中山利彦博士、中央農業試験場化学部森哲郎部長および当場高倉正臣場長にご校閲をいただいた。また、当場土壌肥料科関口久雄、坂本宜崇および山神正弘の各研究員には本研究の遂行に際し、援助と有益な示唆をいただいた。以上の各位に感謝する。

II 試験方法

本試験は第 1 表に掲げたような一般理化学性を示す天北農試第 3 号場(褐色森林土)で、下記の 2 項目について試験した。

- 1 作物別にみた土壌ち密度に対する生育感応
- 2 牧草に対する限界ち密度のは握

一般に普通畑作物は子実生産あるいは根部(根葉類)が収穫目的物であるのに対し、牧草の場合は栄養生産物の茎葉部である。そして牧草はイネ科、マメ科によって異なり、地上部、地下部とも独特な形態、機能を呈する。このような相異は培地条件すなわち土壌の理化学性の違いによって生育収量に与える影響はさらに大きいであろう。

そこで 1 試験は、土壌ち密度が牧草生育におよぼす影響について、普通畑作物を対照に粗密の 2 区を設定し検討した。すなわち試験設定条件は、前作えん麦跡地を耕起し、ローターベーターで整地した。整地後のほ場を粗区とし、密区はさらにトラクター、ブルドーザの踏圧によって作成し、各系列にそれぞれ下記作物を栽培した。なお供試

第 1 表 供試土壌の一般理化学性

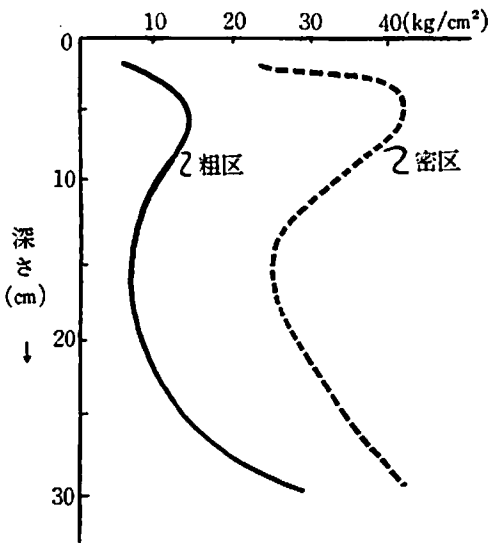
項目 深さ (cm)	pH		T-N (%)	T-C (%)	C/N	無機態-N		N/5HCl-可溶 (mg/100g)		磷酸吸 収係数	粒 径 組 成 (%)				土性
	H ₂ O	KCl				NH ₄	NO ₃	P ₂ O ₅	K ₂ O		粗砂	細砂	微砂	粘土	
0~10	6.3	5.0	4.5	0.31	14.5	6.03	1.24	2.95	12.90	1.020	13.6	20.8	38.4	27.2	LiC
~20	6.3	5.0	4.4	0.31	14.1	5.82	0.21	2.15	8.20	1.160	10.3	20.6	39.4	29.7	LiC

第 2 表 土壌を粗・密に設定したときの三相分布

区別	層 位 (cm)	容積重 (g/100cc)	固 相 (%)	液 相 (%)	気 相 (%)	全孔隙 (%)
粗	0~5	95.8	38.0	20.2	41.8	62.0
	~10	96.2	37.8	28.2	34.1	62.2
	~20	94.8	36.7	27.2	36.1	63.3
密	0~5	110.8	46.9	32.3	20.8	53.2
	~10	119.3	49.2	36.3	14.5	50.8
	~20	109.8	43.2	36.5	20.3	56.8

区の土壌条件は第 2 表、第 1 図に示したとおりである。

作物の種類		施肥量(kg/10 a)		
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O
普通作物	てん菜	12	20	10
	家畜ビート			
イネ科	オーチャードグラス	5	10	5
	チモシー			
マメ科	アルファルファ	2	10	5
	ラジノクロバ			



第1図 試験区設定時の土壌硬度分布

なお、各作物とも施肥形態は N: 硫安, P_2O_5 : 過石, K_2O : 硫加である。

ただし普通作物, イネ科牧草において, 生育途中で窒素欠乏現象がみられたので, 牧草類についてのみ1番草収穫後, 各区を2分し, 窒素追肥用量試験を組み入れた。その量はそれぞれイネ科, 3, 5, 8, マメ科1, 2, 4 kg/10a である。

つぎに2試験は前記試験の密区で生育障害を呈したので, 本項は作物が最高収量をあげる土壌ち密度, すなわち限界ち密度について検討した。供試牧草は根系の異なるオーチャードグラス, アルファルファの2草種を用いた。供試土壌は前項1試験に用いたものとはほぼ同一のもので, $1.0 \times 1.0 \times 0.5$ m コンクリート 枠に容積重が5段階になるように充填した。すなわち 1.5 cm のフルイを通過した土壌をできるだけ枠内均一にするため, 少量ずつ入れながら, それぞれの容積重 (後述第10表) となるように上部より鎮圧をかけつつ漸次充填した。そして表層 5 cm 前後を再び取り出して炭カルおよび所要施肥量を混和したのち, 再度上記の要領で該当枠にうめもどして播種し, 種子がみえない程度に覆土した。なお施肥量は1試験と同様であった。

本報告に用いた物理性の測定方法はつぎのとおりである。

1 三相分布……美園法¹⁹⁾による実容積測定法と

空気比較比重計を併用した。

2 水分張力 (pF) ……0~2.2, 水柱吸引法 (ハインズ変法)。実容積測定後減圧飽水²⁰⁾させたのち, 脱水過程で測定した。…2.5~4.0, 遠心法, 風乾土 3~5 g 相当量を生土で 36 度アングル型小型濾過筒に採土した。遠心時間は3時間行なった。水分率 (Mv %) は含水比 (Mo %) に仮比重を乗じて換算した。

3 土壌硬度……SR-II 型にて測定。

4 テンシオメーター……U 字管方式 (手製) によった。

III 試験結果

1 作物別にみた土壌ち密度に対する生育感応

人為的な踏圧によって土壌ち密度を粗密に作成し, 各作物の影響を検討した結果が第3表, 第4表である。

これによるとてん菜, 家畜ビートはともに粗区に対する密区の収量指数が低く, 土壌ち密度の影響を強く受けた。また牧草は草種によって異なり, オーチャードグラスが最も強く影響を受け, ついでチモシー, アルファルファ, ラジノクローバの順で, イネ科>マメ科牧草の傾向が認められた。そして密度はマメ科牧草を除き, 葉色が黄緑色を呈し, 明らかに窒素欠乏症状がみられた。この場合窒素欠乏現象を惹起させる要因は密区がもたらした物理的な条件による直接的な関与で養分吸収の阻害を惹起したのか, または2次的に脱窒揮散によったのか明らかでない。もし脱窒揮散による窒素吸収低下であれば, 窒素を追肥することで窒素含有率は高めうることが可能ではないかと

第3表 土壌の粗・密がてん菜, 家畜ビートの収量に及ぼす影響 (10a)

項 目	草 丈 (cm)	総 重 (kg)	茎葉重 (kg)	根 重 (kg)	同左* 比 (%)	T/R	全根長 (cm)	
てん菜	粗	43	4,725	2,270	2,455	100	0.9	27
	密	28	1,340	695	645	21	1.0	13
家 畜 ビート	粗	40	5,495	1,905	3,590	100	0.5	27
	密	28	2,335	905	1,430	40	0.6	15

* 粗区の根重を100としたときの密区の収量指数。

第4表 土壌の粗・密が牧草収量に及ぼす影響

(kg/10a)

草種	施肥量 (kg/ 10a)	昭和44年(初年目)						昭和45年(2年目)		
		1 番 草		密/粗	2 番 草		密/粗	年 間 合 計		密/粗
		粗	密		粗	密		粗	密	
OG	N 3	1,370	492	36	703	322	46	3,713	2,688	72
	N 5				783	640	83	5,895	3,955	67
	N 8				1,108	758	69	5,124	4,276	83
Ti	N 3	1,440	708	49	455	252	55	3,702	2,512	68
	N 5				595	370	62	4,009	1,810	45
	N 8				1,095	795	73	3,930	3,579	91
Aif	N 1	1,445	1,213	84	680	600	88	2,688	2,327	87
	N 2				770	580	74	3,903	2,545	65
	N 3				708	720	102	2,595	3,066	118
L-C	N 1	1,635	1,473	90	570	585	103	2,517	2,779	110
	N 2				460	600	130	2,009	2,508	125
	N 4				633	710	112	1,569	2,738	175

考え、1番草収穫後各試験区を2分し、窒素追肥
用量試験を行なった結果が本表2番草以後の成績
である。このことからつぎの点がうかがえる。(1)
窒素追肥の多寡に関係なく、年次(番草も含めて)
の経過に伴って、ち密度の影響は緩和されるこ
と、(2)増肥によっても若干のみだれはあるが、(1)
同様の傾向が認められた。これらの点をさらに確
認するために補足試験として、造成当初から窒素
施用量を変えることで、とくに発芽から1番草ま
での幼牧草に対する窒素吸収の差異を検討した結
果を第5表に、またそのときの養分含有率を第6
表に掲げた。

これによれば、増肥すると収量指数はわずかに

第5表 土壌の粗・密と施肥が牧草収量に
及ぼす影響 (kg/10a)

区 別	粗	密	密/粗
N 2	630	94	19
N 6	850	106	6
N 6/2	135	113	—

第6表 土壌の粗・密と施肥が養分含有率に
及ぼす影響 (%)

項目	N 2 kg			N 6 kg		
区別	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
粗	2.70	0.52	6.00	2.83	0.65	6.28
密	1.39	0.57	4.30	1.50	0.55	4.44
密/粗	51.5	110	71.7	53.0	84.6	70.7

上昇するが、ち密度の影響の方が強く現われてい
ることがわかる。そして含有率をみても窒素のみ
でなく、磷酸、加里の低下も顕著であった。この
ようにち密度が高まることによって収量、養分含
有率に影響することは当然根の分布状態との関連

第7表 土壌の粗・密が各種草種の
根系分布割合に及ぼす影響

草種	採 土 部 位 (cm)	粗 区		密 区	
		根 重 (g)	同 比 (%)	根 重 (g)	同 比 (%)
OG	0~5	1.81	50	3.00	90
	~10	0.72	20	0.34	10
	~20	0.62	17	—	—
	~30	0.32	9	—	—
	~40	0.13	4	—	—
	0~40	3.60	100(100)	3.34	100(93)
Ti	0~5	2.74	61	3.36	94
	~10	0.78	17	0.16	5
	~20	0.75	17	0.05	1
	~30	0.20	4	—	—
	~40	0.06	1	—	—
	0~40	4.53	100(100)	3.57	100(79)
Aif	0~5	2.38	46	4.91	68
	~10	1.25	24	1.23	17
	~20	1.25	24	0.88	12
	~30	0.29	6	0.20	3
	~40	—	—	—	—
	0~40	5.17	100(100)	7.22	100(140)
L-C	0~5	0.44	88	1.71	88
	~10	0.06	12	0.24	12
	~20	—	—	—	—
	~30	—	—	—	—
	~40	—	—	—	—
	0~40	0.50	100(100)	1.95	100(390)

で調査する必要がある。そこで2年目3番草収穫後、牧草根についてモノリス法²⁹⁾で調査した結果を第7表に掲げた。なおこのときの調査区はイネ科牧草は N 5 kg 区、マメ科牧草は N 2 kg 区である。

この結果草種に関係なく粗区では表層 0~10 cm 以内に 70 % の根量が分布していたが、密区になると、さらに表層部に集中し、下層への伸長が明らかに阻害されていた。また各部位を合計した根量、すなわち全根量の比較をみると、密区は粗区に対してオーチャードグラス 93, チモシー 78, アルファルファ 140, ラジノクローバ 390 となり、2年目の地上部収量とほぼ同一傾向を示した。

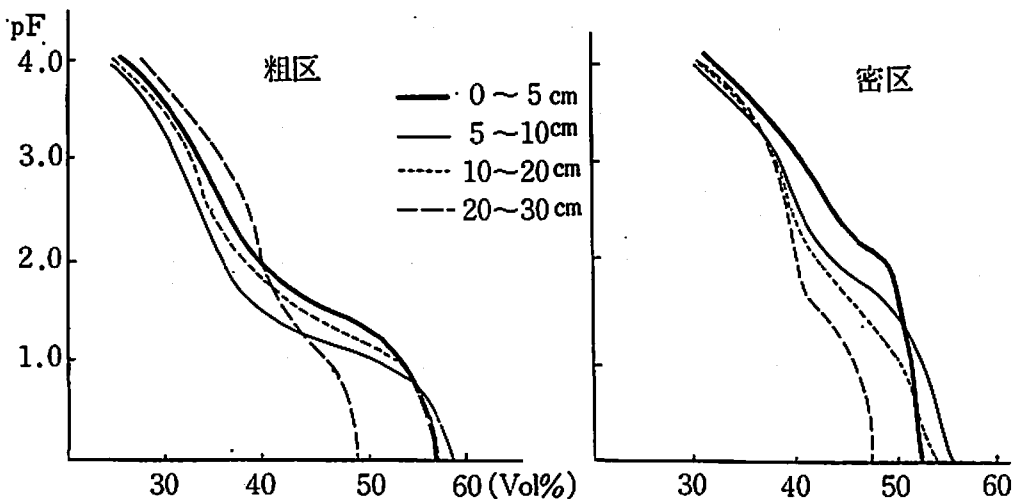
以上のことから培地の物理的条件の差異によって地上部、地下部生育およびその養分吸収にも影響をもたらすことが明らかとなった。したがって

この阻害性をもたらす物理的要因は何かについて検討をすすめた。

土壌がち密化されることによって密度は高まり、土壌硬度も大きくなることは多くの研究者によって明らかにされている。しかし本報ではこの物理性の検討に際しては、力学的観点との関連は避け、その要因が作物生育とどう機能しているか土壌三相を中心に取り上げた。

前述の試験条件の項で述べたように、土壌がち密化すると、三相のうち固相、液相の増加がみとめられ、逆に気相部分の減少を招来する。作物が正常生育するためには液相と気相が適度に存在する必要がある。そこでこの二相がどのようになっているかをみるため、実容積測定後、直ちに pF-水分曲線を求め第2図に示した。

これによると粗区の 0~20 cm 間における各測



第2図 土壌の粗密と pF-水分曲線の関係

定部位は若干の違いがあるにしても、基本的には類似した形態とみなせる。全体的に S 字曲線を示し、とくに pF 1.5~2.0 前後の傾斜は緩やかで、有効水分の多いことを示している。また pF 1.5 以下の粗孔隙の多いこともうかがえる。一方密区の 0~5 cm において pF 1.7 以下は水分曲線が垂直となっており、この間の水分はほとんどなく、踏圧による土壌ち密度の影響を強く受けていることを物語っている。しかしこれより下層 (5~20 cm 間) は若干緩和された傾向にあることがわかる。以上の関係は前掲の硬度分布 (第1図) の

様相をよく反映した。この pF-水分曲線から両区の有効水分量を算出したのが第8表である。これ

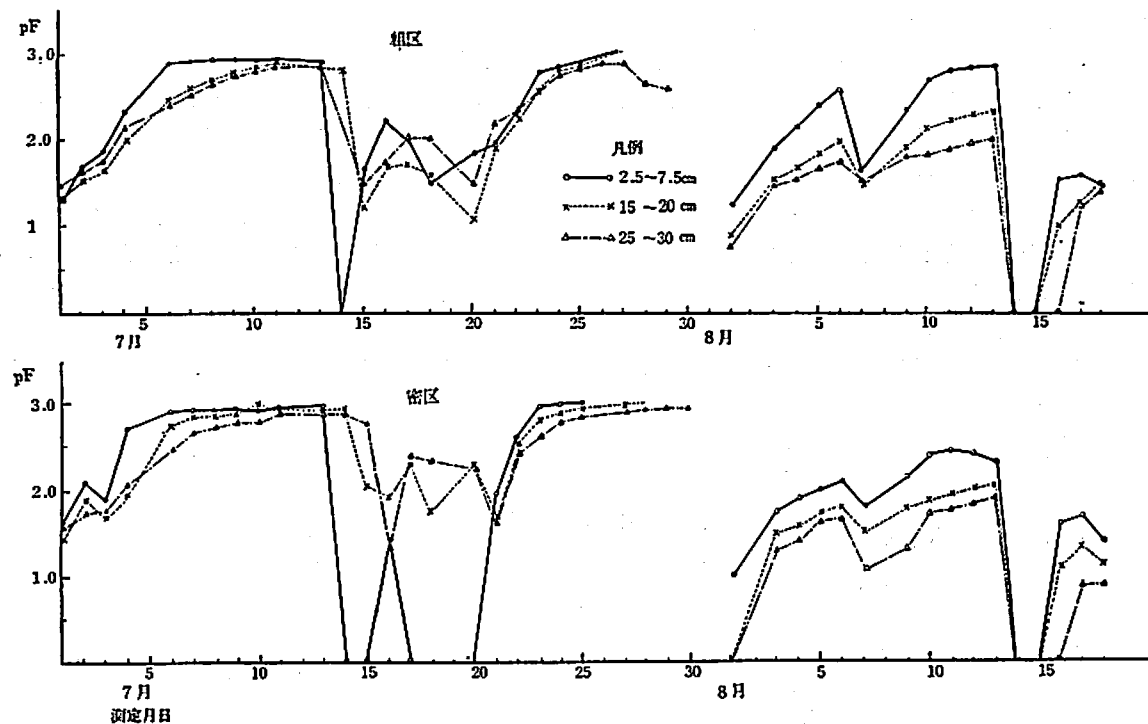
第8表 土壌の粗・密と有効水分との関係

区別	採土部位 (cm)	pF 1.5~3.0	pF 1.5~4.0	pF 3.0~4.0
粗	0~20	10.0	19.1	9.1
	20~	7.0	15.5	8.5
密	0~20	9.6	19.7	10.1
	20~	4.2	12.7	8.5

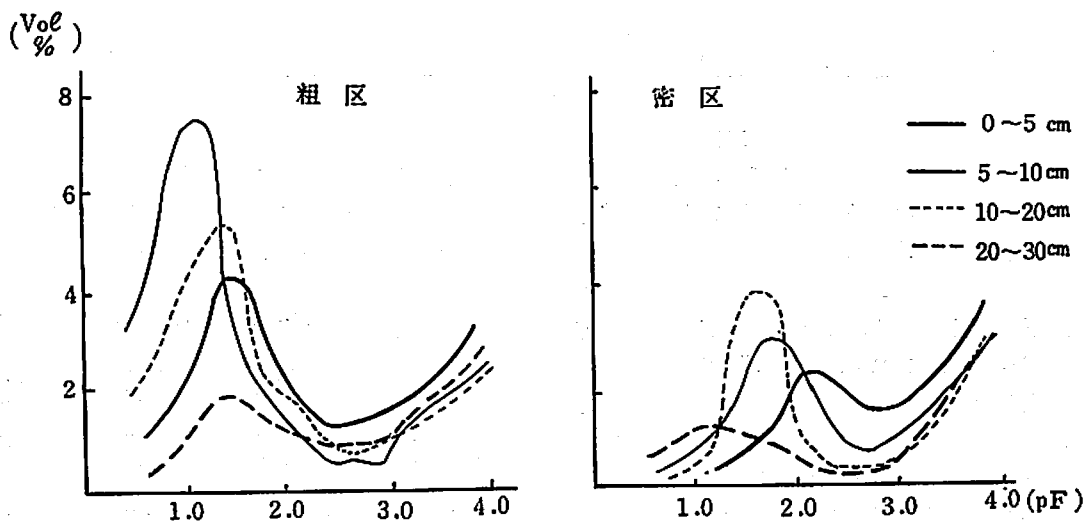
によると 0~20 cm 層の全有効水分 (pF 1.5~4.0) は密区の方が粗区より多い。しかし、これは pF

3.0~4.0 の難有効水分が多くなったのであって、作物に対する正常生育阻害点を含む pF 1.5~3.0 の易有効水分はむしろ密区の方が少ない。そしてこの程度の差は実際上の栽培に対し、水分面だけからは両区の差異を論ずることはできない。すなわち第 4 図でみられるように栽培期間中テンシオ

メーターで測定した水分張力値は、両区ともほぼ類似の傾向で推移しており、ほとんど差異のないことからもうなずける。このことは両者の保持水分量の差よりも数日で消費される蒸発散量の方が大きく、下層からの毛管連絡水分（下層土は踏圧の影響をほとんど受けていないことから供給力は同一と考



第 3 図 テンシオメーターによるほ場の pF-水分変化 (オーチャードグラスほ場)



第 4 図 土壌の粗密と pF-孔隙分布との関係

えられる)に依存したためであろう。

つぎに気相部分の減少に伴い、孔隙内容がどのように影響を受けたかをみるため、pF-水分曲線より擬微分操作してpF-孔隙分布特性を検討したのが第4図である。

これによると粗区は密区に対し、各層位とも対応するピークは高く、しかもその主孔隙がpF 1.0~1.7の範囲内に分布した。これに比し密区はいずれのピークも低く、かつその主要ピークは固相率の増加に伴って高pF側に移動していた。この結果から明らかなように固相容積の多かった層位ほど低pF側の孔隙量が減少し、高pFの孔隙(pF 3.0以上)が増加していることがわかる。したがって極端な高容積重は粗孔隙の減少を招き、低収要因となることを暗示する。一般に通気性に関与するpF 1.5以下の粗孔隙の減少は土壌中の酸素拡散速度を遅延させ²⁾、根の呼吸作用によってCO₂の増加を惹起させ、ますます呼吸作用を困難にし、引いては養分吸収を阻害させ³⁾て収量の低下に結びつくこと、また安田ら³⁾によると通気性不良な鉅質土壌で強制通気することによって増収したことを報告している。このように低収を招く限界空気量は作物の種類、生育ステージ、気象条件など多くの条件によって左右されるが、多くの作物が10~20%以下で影響される例が多い¹²⁾¹⁷⁾。

そこで各水分張力における空気量を第9表に掲

第9表 各水分張力における孔隙量 (vol %)

区 別		オーチャードグラス				ラジノクローバ			
		pF 1.5	2.0	3.0	4.0	pF 1.5	2.0	3.0	4.0
粗	0~20	22.6	28.0	32.6	41.7	24.4	30.7	36.0	40.1
	20~	11.6	14.4	18.6	26.9	12.0	16.0	21.5	39.5
密	0~20	5.2	9.6	14.8	24.9	6.1	9.3	13.1	23.7
	20~	5.8	8.0	10.0	18.5	10.9	14.4	21.4	29.1

げたように、密区の作土部分の平均値はいずれもpF 3.0までの水分が消費されないと、10~20%までの空気量は確保できない。これに対し粗区はpF 1.5以下すなわち重力水が排除されるならば容易に満足しうる。このことから本試験の密区の低収要因が空気孔隙量の著しい低下、すなわち通気性不良にもとづく酸素量の不足に起因している

ことが推察される。

2 牧草に対する限界ち密度のは握

前項試験では人為的な土壌踏圧を行なって粗密の2区を設定し、作物別に検討した結果、作物の種類によって生育感応の異なることが認められ、マメ科牧草はてん菜やイネ科牧草などに比較して、ち密度に対する耐性が高いことが明らかとなった。そこで本試験は第10表に示す培地条件で、

第10表 試験条件の三相分布および土壌硬度

区別	オーチャードグラス					アルファルファ				
	容積重 (g/100cc)	三相割合(%)	固相液相気相			容積重 (g/100cc)	三相割合(%)	固相液相気相		
1粗	75.5	27.9	31.8	41.3	2.0	74.2	27.6	31.7	40.7	2.0
2	82.6	30.5	33.8	35.7	4.0	83.5	30.6	32.5	36.9	5.0
3	90.9	33.6	34.9	31.5	11.7	92.0	33.4	35.9	30.7	12.8
4	95.1	35.6	40.4	24.0	17.3	99.6	35.8	38.1	26.1	18.3
5密	107.3	40.0	42.2	17.8	30.1	105.6	39.4	41.1	19.5	27.3

オーチャードグラス、アルファルファの2草種を供試し、限界ち密度について検討した。その結果について地上部収量を第11表に、根の分布割合を第12表に掲げた。

まず収量結果によれば、オーチャードグラスの場合1番草は1区から4区まで容積重の増加によって漸増するが、これ以上の増加(5区)はかえって減収した。しかし2番草になると1~4区までの収量差はほとんど認められず、5区はわずかに高い収量を示した。そして年間合計では、1番草収量によって左右された結果、4区が最高収量となった。一方アルファルファの1番草は1~5区まで増収する傾向にあるが(前項の結果からもア

第11表 土壌ち密度の差異と

牧草収量との関係 (kg/10a)

草種	区 別	生 草 重		乾 草 重		合 計	同 比
		1番草	2番草	1番草	2番草		
OG	1粗	1727	1747	333	416	749	100
	2	1907	1727	355	394	749	100
	3	1833	1833	507	407	914	122
	4	3117	1772	602	416	1018	136
	5密	2767	1893	451	460	911	122
Alf	1粗	1943	1620	361	371	732	100
	2	2183	1547	432	376	808	110
	3	2733	1740	514	396	909	124
	4	2617	1713	529	409	938	128
	5密	2817	1720	541	392	933	127

第 12 表 土壌密度が根系分布割合に及ぼす影響

区 別		1		2		3		4		5	
		根 重 (g)	同 比 (%)	根 重 (g)	同 比 (%)	根 重 (g)	同 比 (%)	根 重 (g)	同 比 (%)	根 重 (g)	同 比 (%)
オー チャ ード ス	0~5 cm	1.23	44	2.80	59	1.33	39	0.88	51	0.76	49
	~10	0.61	22	0.79	17	0.63	19	0.36	21	0.38	25
	~20	0.47	17	0.66	14	0.68	20	0.37	22	0.33	21
	~30	0.31	11	0.25	5	0.45	13	0.10	6	0.06	4
	~40	0.16	6	0.21	4	0.31	9	—	—	0.01	1
	0~40	2.78	100	4.71	100	3.40	100	1.71	100	1.54	100
ア ル フ ア ル フ ア	0~10	1.08	37	0.79	44	1.40	35	1.13	43	1.33	56
	~20	0.75	25	0.39	22	0.95	23	0.73	28	0.52	22
	~30	0.72	24	0.44	24	1.14	28	0.55	21	0.43	18
	~40	0.31	11	0.14	8	0.48	12	0.19	7	0.09	4
	~50	0.10	3	0.04	7	0.09	2	0.02	1	—	—
	0~40	2.96	100	1.80	100	4.06	100	2.62	100	2.37	100

ルファルファがオーチャードグラスに比較して土壌密度の影響の少ないことを述べた), 2 番草は 4 区が最高収量であった。そして年間合計ではオーチャードグラスと同様 4 区が高かった。このように容積重の差異が地上部収量に影響したことは, 土壌の物理性を直接反映しやすい根の分布状態にも, 当然障害を受けていることが容易に想像される。そこで 2 番草収穫後, 根系分布を調査した結果, 両草種とも容積重の増加に伴って下層への伸長が阻害される傾向にあった。一方経年牧草の主根域は表層 5~10 cm までに分布する場合が多く, またさきの試験 (2 年目 3 番草後) でも同一結果であった。本試験の様相は前項ほど顕著な差異を示さないにしろ, ほぼ同様に表層部への集中化が認められた。しかしこのように表層部への集中割合が弱かったのは初年目であること, ほ場試験ほど高容積重となっていないことなどによると考えられた。

つぎに土壌圧密が物理性へおよぼす影響を検討するため, 2 番草収穫後の土壌を 100 cc 採土管に採土し, 前項の測定法に準じて三相分布, pF-水分特性を測定することとした。

まず容積重は試験開始時前掲 (第 10 表) の 1~5 区までそれぞれ 75, 80~85, 90~95, 95~100, 100~110 g/100 cc の範囲にあったが, 跡地土壌の結果は第 13 表に掲げるように粗区 (オーチャードグラス) の 1, 2 区はやや密の方向に移行した。これは栽培期間中に土壌の乾湿が繰返されることと, 土圧などによったものと思う。このような容積重の条件下で, まず有効水分量を pF-水分曲線

第 13 表 跡地土壌の三相割合

草 種	採 区	部位 (cm)	項目 容積重 (g/ 100cc)	三相分布(%)			全孔隙 (%)	
				固	液	気		
								相
オー ー チャ ード グ ラ ス	1	粗	0~10	88.9	33.9	39.7	26.7	66.2
			10~20	81.4	29.5	39.8	30.7	70.5
	2		0~10	86.5	31.1	40.1	28.8	68.9
			10~20	88.9	32.4	42.1	25.5	67.6
	3		0~10	88.5	33.0	41.0	26.0	67.0
			10~20	90.8	33.6	43.4	23.0	66.4
	4		0~10	95.7	35.0	45.8	19.2	65.0
			10~20	101.1	38.8	47.0	14.2	61.2
	5	密	0~10	109.8	42.6	46.2	11.2	57.4
			10~20	108.8	43.0	47.4	9.5	56.9
ア ル フ ア ル フ ア	1	粗	0~10	76.1	27.1	39.9	33.0	72.9
			10~20	82.0	30.0	42.0	28.3	70.3
	2		0~10	84.9	30.0	38.3	30.3	69.0
			10~20	84.1	30.4	38.5	31.0	69.5
	3		0~10	89.6	32.9	43.3	23.7	67.0
			10~20	87.4	30.8	44.9	24.2	69.1
	4		0~10	93.8	32.7	44.8	22.5	67.3
			10~20	91.2	31.9	47.5	20.5	68.0
	5	密	0~10	101.5	37.9	50.1	12.0	62.1
			10~20	103.8	38.9	50.8	10.2	61.0

から算出し, 第 14 表に掲げた。

この結果, オーチャードグラス土壌では容積重が 95~100 g まで増加すると有効水分も同時に増すが, これ以上になるとかえって水分量は減少する。一方アルファルファ土壌では 1, 2 区と 3~5 区に分かれた。すなわち容積重をみると 1, 2 区は 75~85 g であるのに対し, 3~5 区は 90~100 g となっている。そしてオーチャードグラス土壌と

第14表 土壌ち密度と有効水分の関係 (vol %)

区 別	採 土 部 位 (cm)	オーチャードグラス		アルファルファ	
		pF 1.5~3.0	pF 1.5~4.0	pF 1.5~3.0	pF 1.5~4.0
1 粗	0~10	13.9	23.3	15.5	24.6
	10~20	7.4	26.2	17.7	27.0
2	0~10	16.4	26.0	15.8	25.5
	10~20	16.8	26.1	17.5	27.0
3	0~10	16.2	25.5	20.3	30.4
	10~20	18.1	27.6	20.0	29.9
4	0~10	18.3	28.3	19.4	30.0
	10~20	17.8	28.4	18.3	28.7
5 密	0~10	13.5	25.0	20.2	31.7
	10~20	12.9	24.3	16.7	28.4

* 0~10 と 10~20 cm の平均値。

ほぼ同様に 90~100 g で有効水分を最大保持する容積重となり、水分面からは少なくとも 100 前後までの容積重が有利な条件である。しかしその反面粗孔隙は減少し、空気の透過は不良となる。これが低収要因に結びつく。したがって液相と気相とは逆の関係にあり、この両者は作物が最高収量をあげたときの条件として決定されと考えられる。そこで各容積重における水分張力から、そのときの空気量を求めると第15表のとおりである。

第15表 各水分張力における空気量 (vol %)

区 別		オーチャードグラス				アルファルファ			
		pF 1.0	1.5	2.0	3.0	pF 1.0	1.5	2.0	3.0
1	粗	10.6	21.1	28.6	37.4	15.7	24.6	31.2	41.2
2		8.2	19.3	26.6	35.9	12.2	21.1	29.3	37.8
3		5.9	16.5	23.7	33.6	7.0	14.9	22.7	35.1
4		4.7	8.3	15.2	26.8	9.0	14.1	20.8	33.5
5	密	3.0	3.7	8.1	16.9	4.6	4.8	10.0	23.3

る。この結果、いま最高収量をあげた4区の各水分張力で占められるような孔隙量が少なくとも必要であった。

IV 考 察

一般に培地条件が堅密であると作物根の発達が阻害され、減収になるとされているが、天北地方の重粘性土壌ではこれの改善のため土地改良事業が広く実施されている。しかし施肥の有無を問わず、経年草地では極めて密な土壌となっている場合が多く、土壌硬度の点に限ってみれば、一般

的に有効土層の範ちゅう外にあるような土壌であっても牧草は良好に生育をしている。このように草地では従来までの物理性の概念では到底説明しえないような点が多かったので、一年生畑作物として根菜(てん菜・家畜ビート)をも併用しながら牧草に対する土壌ち密度の影響を検討し、さらにその限界値について調査した。

まずほ場試験において粗密の2処理条件下で実施した結果、根菜類、イネ科牧草の初期生育期は著しい低収となった。そしてこれらの作物は窒素欠乏現象をも招来した。一方マメ科牧草では前者ほどの影響はなく、また窒素不足の現象も認められなかった。このように前者が著しく低収となった要因は、第6表に掲げたように、各要素とも吸収低下をみたが、とりわけ N 吸収阻害が最も著しい。したがってその主因が N 欠乏に基づくものと考えられた。そこでこの現象を惹起した原因は、

- (1) 粗孔隙の減少に伴って酸素不足による生理的障害を受けること
- (2) 施肥窒素の脱窒揮散による作物の吸収不足の2点が考えられる。

すなわち、まず(1)の生理的障害面としては作物根が養水分を吸収するために呼吸作用が行なわれ、土壌中の酸素が消費され、逆に炭酸ガス濃度が高まるようになると呼吸障害を被り²⁷⁾²⁸⁾、その結果として養水分の吸収機能が低下し、引いては生育が遅延するにいたる。この酸素濃度の低下を惹起させる現象は作物根による呼吸量とも関連するが、土壌的にはガス拡散度の影響が大きく、酸素拡散速度、換言すれば酸素供給速度は孔隙量と一定の関係があるとされている³⁾⁴⁾¹⁴⁾²²⁾²⁵⁾。したがって粗孔隙量の多い土壌ほど酸素供給量は大きいことになる。本試験の密区のように極端なち密度は明らかに粗孔隙を減少させ(第9、15表)、また補足試験の結果から窒素吸収阻害のみならず、他の養分吸収も低下させることから、(1)の理由が主要因として作用していることを示唆しているものと考えられる。一方窒素揮散によるものとしては、井田ら⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾は肥料の種類、水分、温度条件などによっても左右されるが、空気量が10~15%

以下になると揮散が急激に促進されるとしている。今回施用した肥料は硫酸であって、水分が両区ともほぼ同一条件下(第3図)にあることから、密区においては窒素揮散を防止しうる孔隙量は、作物生育が障害を受け始める $pF\ 3.0$ までの水分が消費されなければならない。このことからすれば、本試験で空気不足による窒素の揮散が行なわれていたものと考えられる。その結果として施肥窒素の減少に伴って作物体中の窒素吸収を低下したことが推察される。またこの現象が一般に窒素要求度の大きいてん菜やイネ科牧草で発現し、マメ科牧草に認められなかったことから(2)の要因が副次的に関与したものと思う。

以上のことから、物理的な踏圧による極端な孔隙量の減少が直接的な低収要因であり、2次的に窒素の揮散を招来したとみるべきであろう。

このように作物の種類、草種あるいは生育ステージなどで空気量すなわち酸素に対する要求度が異なることから、森ら¹⁷⁾、川村ら¹⁸⁾は作物の種類を空気要求量によって分類を試みている。しかし播種当年の幼牧草期についてみるならば、普通畑作物と同様顕著な障害を被るけれども、経年化に伴って物理性に対する適応性が強まるのかどうかは明らかでないが、本現象が緩和されてくることは事実である。したがって牧草本来の利用面から考えると、経年草地が対象となるので、幼牧草の影響割合をもって論ずることは若干問題があり、さらに今後検討しなければならないと思う。

一方土壌が堅密であることが直ちに作物生育を不良にするとは限らない。三好¹⁹⁾は火山灰土壌を圧密することで固相率を高め、水分供給を円滑にし、増収に結びつくとし、南¹⁶⁾もろ土に砂客土することで同様の結果をえている。このように土壌密度が作物生育を左右するか否かは土壌の種類によって異なる。これは土壌物理性の質的な差異に基づくもので、当然その限界値は変わるべきものであろう。これらの観点をも含めて密度の限界値を検討した結果、詳細については後述するが、容積重が $95\sim 100\text{ g}/100\text{ cc}$ で地上部収量は最高となった。

さて地上部収量は根の機能によって左右される

ので、そのよりどころとして根系分布に関し多くの研究者が報告している¹⁴⁾¹⁵⁾。一般に根系分布は土壌の理化学性が劣悪な場合、なかんずく土壌密度が下層伸長を阻害するとしている。本試験でも土壌密度の増加は明らかに根の発達を不良にした。このことは既往の結果¹³⁾¹⁵⁾と一致するが、地上部収量と根の分布割合とはかならずしも相関は認められなかった。この点、牧草が1年生畑作物と異なるところで、筆者ら⁹⁾が別途検討した現地調査によれば、物理的条件のいかんをとわず経年草地は地表下 $5\sim 10\text{ cm}$ までに 80% 以上が集中分布している。しかも土壌が極端な密度であっても、十分に施肥さえすれば高収をうることができるなどのことを考えれば、経年牧草に対する物理性の意義は幼牧草と区分すべきと思う。しかし牧草は永年的に栽培されているのであるから、その性格の変化は不連続ではありえず、土壌理化学性の推移とともに十分検討する必要がある、これらについては今後における草地研究の重要な課題となろう。

つぎに圧密は固相率を高め、これに伴って液相の増加、気相の減少をもたらす。一般に天北地方の鉈質土壌は固相率が高く、有効水分の少ない土壌で、圧密による水分増加が認められたが、その水分増加が作物生育にとってかならずしも有利な条件となるとは限らない。すなわち液相の増加は逆に空気量の減少を招来し、そのマイナス面が伴うからである。水分増加の内容を検討すると、固相率の増加は低 pF 側の水分を減少させ、高 pF 側によって占められる水分が多くなる。換言すれば、圧密による水分増加は有効水分とされるもののうち、作物が正常生育を阻害し始める水分点²⁰⁾から萎凋点までの高水分張力領域 ($pF\ 3.0\sim 4.2$) によってもたらされるもので、当然生産面への寄与率は低いことになる。一方孔隙量の減少については酸素供給を低下させることを述べた。その孔隙量は水分との関連で決定されるのであるが、この決定は、この両者の一方を規制して、他方の critical point によって決まる。しかし本試験ではこの両者を規制することなく実施したので、第15表にみられるように各水分張力によって孔隙量

は変動している。このため栽培期間中の水分張力の推移は別途測定した結果を参考に推察した。すなわち水分張力は多くの場合、 $pF\ 2.0\sim 3.0$ の範囲にあったので、水分不足による作物生育の障害はほとんどなかったものと考えられる。そこで比較的多水分状態の $pF\ 2.0$ を基準にして、そのときの空気量をいま最高収量をあげた4区について検討してみると、オーチャードグラスは15.2%、アルファルファでは20.8%であった。さらに容積重の増加でかえって減収した5区は前者が8.1%、後者で10%となっている。以上のことから、圃場1試験の結果を加味すれば、正常な生長生育のための水分量を増加させるような容積重を持ち、しかも $pF\ 2.0$ のときの空気量がほぼ10%以上あることが増収に結びついた。本土壌の場合、これに該当する容積重は95~100 g/100 cc であった。

以上、2,3の試験例から、牧草根の伸長阻害の現象は土壌硬度の増大、すなわち力学的に直接関与したもののみでなく、これによって三相構造のバランスにもとづく、生理的な障害として作用するものと、化学的には土壌中の養分の形態変化などによって惹起されたものが主な原因であると考えられた。とくに経年草地において物理性の影響が緩和されるにいたることは、今後この分野からの検討がなされなければならない大きな問題であろう。

V 摘 要

天北地方には鈣質重粘性土壌が分布しているが、物理性が不良で作物生育にとっては不良土壌とされているがために、土地改良事業が広く実施されている。しかし牧草は土地改良に対し、他作物ほど増収割合は高くなく、また極めて堅密な土壌であるにもかかわらず、十分な施肥さえすれば高収をうることができる。そこで牧草の物理性に対する特性について、ち密度を機能面から2,3調査した結果、つぎのように要約できる。

1 てん菜、家畜ビートのような根菜類、換言すれば、地下部の収穫を目的とする作物は土壌ち密度の影響を強く受ける。

- 2 牧草は草種、生育ステージによって異なるが、初期生育は普通作物と同様の影響を受け、イネ科>マメ科の傾向がみられた。また経年化に伴っていずれの草種も緩和されるにいたる。
- 3 低収要因の主なものとは空気孔隙量の減少による酸素不足によって、養分吸収が阻害された結果と思われた。なかでもN欠乏の影響が大きかった。
- 4 容積重の増加は根の下層伸長を阻害し、表層に集中させる傾向にあった。そして根の伸長度合と収量とは直接関係が認められない。
- 5 初期生育の収量に好結果をもたらす容積重は95~100 g/100 cc の範囲で、しかも $pF\ 2.0$ のときの空気量が10%以上であることが必要であった。

参 考 文 献

- 1) 安間正虎, 小田桂三郎, 1953; 圃場試験における作物根系の新しい調査方法. 関東東山農研報, 4, 1.
- 2) ベーバー, 野口弥吉訳, 1948; 土壌物理学. 朝倉書店.
- 3) BUCKINGHAM, E. 1904; Contributions to our knowledges of the aeration of soils. U. S. Bur. Soils Bull. 25.
- 4) EVANS, D. D. and DON KIRKHAM, 1949; Measurement of the air permeability of soil in situ. Soil Sic. Soc. Am. Proc., 14, 65.
- 5) 浜頓別町・農業協同組合, 1972; 浜頓別町における草地生産性に関する現況と改善方向.
- 6) 北海道開発局, 1967; 土地改良に関する技術指針.
- 7) ———, 1967; 北海道北部の土壌.
- 8) 井田 明, 森 哲郎, 1970; 鈣質畑土壌における窒素の行動に関する研究, 第1報, 硝化作用に及ぼす土壌空気と土壌水分の影響, 東近農試研報, 19, 98.
- 9) ———, ———, 1971; 同上, 第3報, 施肥窒素の揮散に及ぼす肥料形態, 土壌 pH, 土壌水分の影響, 同上, 21, 135.
- 10) ———, 荒木浩一, 1971; 同上, 第4報, 硝酸質肥料から揮散する N_2 , N_2O に及ぼす2, 3の土壌条件, 同上, 21, 151.
- 11) 池田 実, 松井英太郎, 1961; イタリアンライグラスに対する施肥の影響について, 日草誌, 7, 17.
- 12) 川村秋男, 古賀 汎, 山崎清功, 1971; 土壌ち密度と畑作物の生育感応, 一とくに根菜類および牧草類

- について一, 四国農試報告, 23, 53.
- 13) 川竹基弘, 1968; 圃場における作物の根系調査法に関する研究, 一特に根重推定のための標本抽出法について一, 東近農試研報, 17, 117.
 - 14) レブート原著, 1968; 土壌物理, 農林水産技術会議事務局調査資料課資料, 54, 畑地農業振興会.
 - 15) 松尾憲一, 1964; 粒径組成と土壌の物理性に関する研究, 農技研報告, B 14, 285.
 - 16) 南 松雄, 1970; 北海道における塩土の成因, 理化学的特性とその生産性向上に関する研究, 道農試報告, 18.
 - 17) 森 哲郎, 小川和夫, 1967; 土壌の物理的要因と作物の生育に関する研究, 第 1 報, 土壌空気量・硬度と作物の生育, 東近農試研報, 16, 77.
 - 18) 美国 繁, 1957; 実容積法による土壌物理性の測定, 日土肥誌, 29, 2, 67.
 - 19) 三好 洋, 1970; 近代農業における土壌肥料の研究(第 1 集), 日土肥学会編, 44.
 - 20) 村田吉男, 猪山純一郎, 本間 力, 1966; 飼料作物および牧草の光合成に関する研究, 第 5 報, 土壌水分が各種の飼料作物幼植物の光合成および呼吸作用に及ぼす影響, 日作紀, 34, 4, 385.
 - 21) 農林省農地局, 1969; 地力保全関係通達集, 地力保全対策資料, 12.
 - 22) PENMAN, H. L., 1940; Gas and vapour movements in the soil. II. The diffusion of carbon dioxide through porous soils. J. Agr. Sci., 30, 570.
 - 23) 椎名乾治, 1963; 蒸発散による畑地水分の減少機構に関する研究, 農土試報告, 1, 83.
 - 24) 滝島康夫, 佐久間宏, 1969; 土壌の圧縮および硬度が水稻の根系発達ならびに生育の影響に関する研究, 農技研報告, B 21, 255.
 - 25) TAYLOR, S. A., 1949; Oxygen diffusion in porous media as a measure of soil aeration. Soil Sci. Soc. Am. Proc. Vol. 14, 55.
 - 26) 東近農試畑作部, 1969; 土壌の物理性の測定法.
 - 27) 戸町義次他, 1965; 作物生理講座, 5, 呼吸・光合成編, 朝倉書店.
 - 28) ———, 1966; 同上, 3, 水分生理編.
 - 29) ———, 1963; 作物試験法, 137, 農業技術協会.
 - 30) 山本晴雄, 1969; 土地改良目標設定のための土壌物理性測定法に関する研究, 東近農試依頼研究員報告, 8, 12.
 - 31) 山中金次郎, 松尾憲一, 1962; 土壌硬度に関する研究, 第 1 報, 土壌硬度と含水量との関係, 日土肥誌, 33, 7, 343.
 - 32) 安田 環, 荒木浩一, 1979; 土壌空気に関する研究, 第 1 報, 土壌への通気とカンランの生育, 日土肥誌, 41, 10, 413.
 - 33) 渡辺和之, 児玉敏夫, 野本達郎, 1965; 土壌の物理性と作物の生育および収量との関係, 第 1 報, 土壌空気率, 土壌空気組成と甘藷の生育および収量との関係, 日作紀, 33, 118.

Summary

In Tenpoku districts where compact and heavy clay soils are extensively distributed, studies were made on the growth of pasture crops cultivated there from the aspect of soil compaction and the results obtained are summarized in the following:

1 Root crops such as sugarbeets and fodderbeets, etc., in other words those crops being intended for harvesting of the roots, were strongly influenced by soil compaction.

2 Though varying with the kind of pasture crops and the growing stages, pasture underwent influences in its early growth similar to common crops, with the tendency of grass being influenced more strongly than legume was observed. However, in any kind of pasture crops, the influences were alleviated with the lapse of time.

3 The main cause of low yield lay in oxygen shortage due to a decrease in air space porosity, as the result, a nutrient absorption was impeded and especially, the influence of deficiency was remarkably decreased.

4 The increase of bulk density tended to impede the growth of roots in the lower layer and cause them to concentrate in the upper layer. No direct relationship was observed between the extent of root growth and yield.

5 The bulk density affecting favorably the early growth and the yield ranged from 95 to 100g/100cc, with air space porosity being required to be more than 10% at pF 2.0.