

土壤孔隙の測定について

北農試 箱石 正

「土壤構造は肥沃度の鍵である」と云われている。実際、土壤の生産力と土壤構造の関係についての論議は少くない。多くの場合それらは粒団の粒径分布或いは非毛管孔隙の量等を土壤構造の指標として、それらと作物の生育、収量の関係が扱われている。しかしこれらの指標は構造そのものではなくて構造の側面を表現するものと見なければならぬ。「構造は土壤粒子による土壤の構成状態」であつて、これをある測定条件下の粒径別の集合体の量で見たとき集合体の粒径分布が得られ、一定の大きさ以上の孔隙の量で見たときに非毛管孔隙量が得られる。あらゆる角度から見た投影像を総合することによつて立体の姿が明確にされるように、土壤構造についても多方向から検討することによりその実態が明らかにされ、たとえば作物の生育と土壤構造の関係についてもより明確にされよう。

土壤構造をみると、固体粒子の配列は構造そのものであつて最も重要な側面である。水中篩別法等多くの集合体の粒径分布に関する測定法はそれを解明するのに役立つて来た。

一方粒子間の間隙、即ち孔隙の配列は固体粒子の配列を裏返しに見たものであつて、これを土壤構造のもう一つの重要な側面とみる事が出来る。作物の生育の場として土壤を考えた場合、植物根の存在するのは孔隙であり、また水、空気等植生に關与する物理的状态を構成するのは即ち孔隙である。この立場からは孔隙を土の実体として扱い直接その量・分布を測定することが要求される。

土壤管理の相違は土壤の状態に變化を与えるが、土壤構造の面から見たときその影響は大粒団の消長、云いかえると粗孔隙の量、分布に最も顯著に現れる。このような問題のための土壤孔隙の測定法を述べようとするのが本報の目的である。

I 孔隙の測定

1. 孔隙の觀察 孔隙の記載は先づ現場における觀察から始められなければならない。現場における詳細な觀察記載はマクロな孔隙の状態、性格を明らかにするものであつて、定量的な論議のためには必ずしも十分でないが実験室における測定結果を現場に還元する際の媒介として不可欠と云えよう。集合体については現場における記載のために、その形、大きさ、表面の状態等について詳細な基準が示されており、それに基づいて実施されているが、孔隙の記載は集合体のそれほど一般に詳しくない。孔隙の記載の基準としてかなり詳細なものに Johnson²⁾ によつて提案されたものがある。それには、孔隙の数、大きさ、連続性、配列、分布、形の 6

項についての分級基準が含まれている。

攪乱せずに採取した試料をそのまま、或は固定研磨した表面または薄片を顕微鏡で観察する方法は野外観察では識別出来なかつた微細な孔隙の形、分布、方向、壁面の状態、(量)を直接測定出来るので、それだけでも孔隙の解明に有用であるが同時に後述の定量的な測定法によつて得た結果を意味づけるのに役立つ。固定資料・固定方法の改良、薄片調製法の改善、投影器の使用、薄片による孔隙量のフォトメトリックな測定法の応用³⁾等はこの方法の応用を容易にし、その効用を高めた。

2. 孔隙量の測定法 直接観察計測する方法に対して、容積重、真比重或は水、空気等を介して孔隙の量を測定する方法としては以下のようなものが採用されて来た。

1) 容積重法 みかけの容積、乾燥前後の重量、真比重から土壌の全孔隙、水分率、空気率又は毛管孔隙量、非毛管孔隙量を算出する。

みかけの容積または容積重を測定する方法によつて次のように分類される。⁴⁾

○試料をとり出した穴に直接砂、粘液を、或は薄い膜袋をあてがつて水を注入して、注入量を以て試料のみかけの容積とする。

○試料塊をパラフィン被覆した後、適宜の液体中に沈め、試料塊によつて排除された液量を直接計量するか又は試料塊を空気中と水中で秤量した差から求める。

○Tube Sampler による方法、定容積の試料円筒で試料を抜きとり、試料円筒の容積を試料の容積とする。最も一般的な方法であるが管壁と試料の摩擦、採土管先端による圧縮等に由来する誤差が結果を不正確にする。これらの誤差を避けるため採土管の形、容積、打入のための付属器具等についてなお改良が試みられている。

近年実用化されている γ 線による湿土の容積重の測定と、中性子法による水分含量の測定に基いて容積重を算出する方法⁵⁾は試料の抜取の手順は除かれるが算出の手續からみると容積重法に含められる。

2) 実容積法⁶⁾ (又はair picnometer 法) みかけの容積既知の土柱試料を密閉した測定室中におき圧力と容積の関係から測定室内の気体の容積を求め、試料塊に含まれる空気の容積を算出する。

3) 吸引法による孔隙の粒径分布の測定

試料から排出される水の量を直接読みとることが出来て、また吸引圧を逐次高めて行き連続的に吸引圧—水分関係を測定しうるような装置で、現地から攪乱せずに採取した定容積の土柱試料の脱水過程の吸引圧—水分曲線を求める。これに微分操作を施すと吸引圧—水分分布曲線が得られる。水分分布曲線の吸引圧軸の値を毛管上昇の公式 $h = \frac{2T}{dgr} \cos\alpha$ から孔隙の当量直径に読みかえると孔隙の粒径分布が推測される。この種の試みはHAINES の Burette

manometerに端を差しその後多くの研究者により改良が試みられ、量水管の位置、吸引圧負荷の方式を異にした多様の改良装置が提案されている。水頭差で吸引圧を与える方式のものにはRussell⁷⁾の装置(第1図)があり、内山らはその改良型⁸⁾を提案している。気圧差で負荷を与える方式のものにはBradfieldとJamisonの装置⁹⁾等があり、北岸ら¹⁰⁾はそれを簡易化した装置を提案した(2図)。

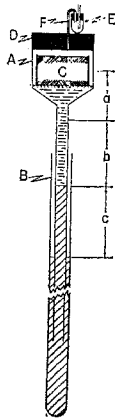


図1 A底に濾板のあるガラス漏斗
B受管 C試料 Dゴム栓
E飽和管 F通気管

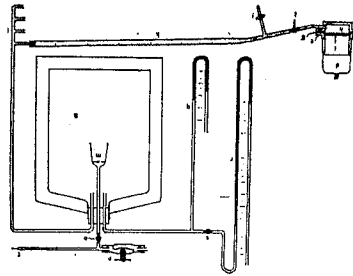


図2 b定容積円筒 d小形ガラス鐘
e濾板棒 f濾板 gゴムパッキング
h受器 iコック j給排水管 k目盛管
l板管 mガラスフィルター
n緩衝タンク oコック p調節バルブ
q水銀マンネーター r水マンネーター
sコック t吸引口

この種の装置では飽水一脱水を繰返したときの孔隙粒径分布曲線の変化から孔隙の安定度を見ることが出来る。

4) 粒団の孔隙量の測定 孔隙を集合体の大きさ分布との関係で表す試みがある。川口ら¹¹⁾は粒団を孔隙性とその量を測定し、土壌の構造性を粒径0.25mm以上および以下の粒団の固相粒団内の孔隙、粒団間の孔隙に分け、それぞれを全土容に対する容積割合で表示した。

粒団または土塊の孔隙はその仮比重から算出される。仮比重の測定法には以下に掲げる方法が提案されている。

○ケロシン法 粒団(土塊)の孔隙をケロシンで飽和し、過剰のケロシンを除いたのち、ケロシンを容れた容器に沈め、試料によつて排除された液量を円筒中の液面上昇¹²⁾または溢出

した液量¹³⁾から求め、これを試料のみかけの容積とする。

○水銀法 土壌の収縮率の測定法¹⁴⁾に準じ、水銀を充たした皿の中に粒団試料を没するまで押し込み、溢れた水銀の量から試料の容積を求める。

○パラフィン被覆法 試料を熔融したパラフィンに浸し表面を薄いパラフィン膜で被つたのち適宜の液中に沈め試料によつて排除された液量、または空気中と水中で秤量した差から試料の容積を求めるか、或は比重の異なる液体のシリーズに逐次浸し平衡した液の比重¹⁵⁾から試料の比重を算出する。

○粒団の孔隙をパラフィンまたは適宜の液体で飽和したのちair picnometerで全体の容積を求める。

これらの孔隙の測定法並に表現法はそれぞれ特徴をもつものであるが、測定対象および目的によつて長短があり、相補う測定法が併用され、また測定条件を異にした場合の結果を総合することにより孔隙の相貌はより明確にされる。また前述の測定法はいづれも測定時における対象の静的な状態を表すものであつて、植生に直接関係する通気性・透水性等の動的な要素は静的な状態の函数であるが両者が同義でないことは留意しておかねばならない。

II 粗孔隙の記載

前述の測定法の実用例として吸引法による孔隙の粒径分布の測定と顕微鏡による薄片の観察を採用して実際の畑土壌の粗孔隙の状態を記載しその構造的な一側面を表現しようと試みた。以下その概要を述べる。

1. 方法 孔隙の粒径分布は北岸らの装置に準じ、顕微鏡観察はアクリル樹脂で固定し定法により調製した薄片について孔隙の形・大きさ・配列について行い、面積による孔隙量の測定は行わなかつた。

註 北岸らの装置は低吸引圧領域における吸引圧—水分関係の測定法としては若干の問題点が指摘されている。¹⁶⁾しかしこゝにとりあげたような対象についてその構造を特徴づけるための方法として以下に述べる理由で十分であるので使用した。即ち1)この装置は気圧差を維持するための調節装置を大型の緩衝タンクで代替し他の一切を省略しておりそのため長時間にわたつて気圧差を維持出来ない。2)量水管のメニスカスが位置によつて形状が不規則になり測定誤差が大きくなり易い。3)濾板にG4ガラスフィルターを使用した場合、測定の限度が吸引圧水柱100cm程度であつて高い吸引圧の領域の測定が困難である。以上の諸点が指摘されている。しかし1)第3図の吸引圧・時間・排水量の関係にみられるように通常の畑土壌では5~80cm水柱の吸引圧の範囲では $\frac{1}{2}$ ~2時間で排水し終つている。一方断熱材で被覆した緩衝タンクのみでこの吸引圧の範囲では1~2時間は一定気圧差を事実上維

持することが可能である。2) 量水管内が十分清潔であればメニスカスの形状が不規則になり測定誤差が大きくなるという不都合は認められなかった。3) 吸引圧 100 cm までの測定結果は畑土壌の構造を特徴づけるのに不充分ではない。先づ第2表のPF 2.7における空気率と水柱

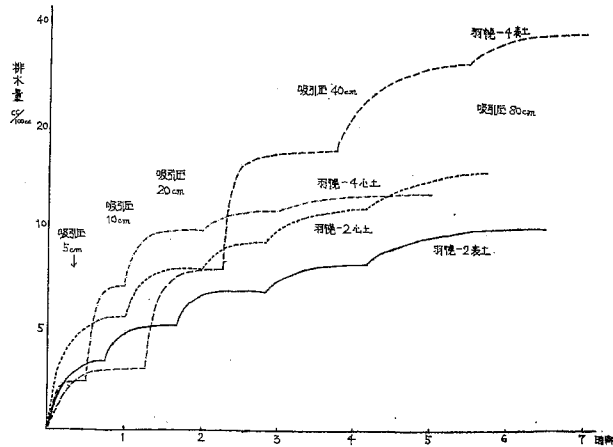


図3 吸引圧、時間、排水量の関係

40 cm (PF 1.6) で排された孔隙を比べて、後者が前者の $\frac{1}{2} \sim \frac{2}{3}$ を占めることが見られ、吸引圧 100 cm ではこの割合は更に高くなり、また粒度分布が粗な場合はこの割合は高くなる。仮に濾板が改良され水柱 500 cm まで測定可能になつたとしてもその領域の孔隙は吸引圧 100 cm 以下のそれと比べ数分の一にすぎないことがわかる。構造単位の大きさと孔隙の粒径分布の関係は第4図の篩別した砂の脱水曲線およびそれから求めた水分(孔隙)分布曲線から推察出来る。こゝでは 0.28~0.20 mm および、0.14~0.10 mm のフラクションでは粒子間隙をみたした水はそれぞれ吸引圧 30 cm および 80 cm で大部分が排水されている。

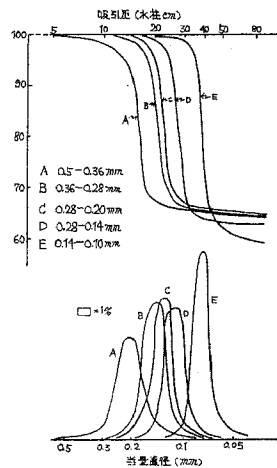


図4 篩別した砂の吸引圧-水分曲線
吸引圧-水分分布曲線

ここに掲げた例では土壌粒子の90%以上が0.1mm以上の集合体を構成しており、それらの集合体の容積を控除した残余の容積からみて0.1mm以下のフラクションはきわめて粗に配列していることがうかがわれる。このことは顕微鏡観察からも確かめられ、集合体間の孔隙は吸引圧水柱100cmで大部分が排水されるものと考えられる。また集合体から構成された土壌では一旦集合体間の孔隙が排水されると更に吸引圧が高められても集合体内部の相当する孔隙の水は引出されずに残ることが考えられる。このことは高い吸引圧における測定結果を解釈する際留意しておかなければならない。

	所 在	地質系統	備 考
羽幌 - 2	北海道苫前郡羽幌町 築別高台	洪積	重粘土 暗渠施工なし
" - 4	同 上	"	重粘土 暗渠施工あり
興 部	北海道紋別郡興部町 北興地区	"	重粘土
紋 別	北海道紋別市共和	"	重粘土
郡 山	福島県郡山市		
銭 亀 沢	北海道亀田郡銭亀沢村		壙 土

表 1

		層位	粘土含量	容積量	全孔隙量	気相率	吸引圧40cm で排水された 孔隙量	PP2.7 における 空気率
				g/cc	%	%	%	%
羽幌 - 2	表土	A	45.5	.67	72	10	11	24
"	心土	B	53.9	.72	72	13	15	13
羽幌 - 4	表土	A	45.9	.81	68	27	22	29
"	心土	B	50.9	.86	67	16	14	24
興 部	心土	C ₁	64.4	1.24	56	14	8	
紋 別	心土	C ₂	36.1	1.35	51	8	7	12
郡 山	心土	B	35.6	1.17	56	7	5	
銭 亀 沢	表土	A	23.6	.52	74		25	33

表 2

2. 結果 供試土壤の容積重、全孔隙および粗孔隙を第2表に示す、粗孔隙の粒径分布は第5図のとおりであつた。こゝでは吸引圧から読みかえた当量直径を示した、吸引圧5cmで排水された空隙量は点線で囲つた矩形の面積で表した。第6図は横軸に吸引圧を対数等間隙に、縦軸に“土壌+水”の容積をとり羽幌土壤4種について供用した試料の中から無作意にとり出した各4個の脱水曲線を示した。薄片で観察された集合体および孔隙の配列状態は第7図のとおりである。

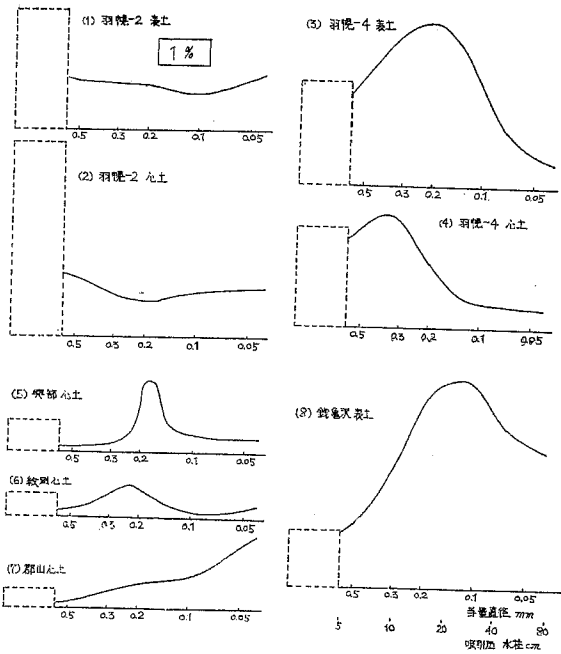


図5 粗孔隙の粒径分布曲線

3. 考察 羽幌：羽幌-2は排水施工なく粗放に管理された畑で、羽幌-4は暗渠が施工され土壤管理はより集約であつた。

両者の対比から土壤管理の影響をみることが出来る。A層の孔隙粒径分布をみると当量直径^(註)0.6mm以上(吸引圧5cm以下)

の孔隙は-2が幾分多く、0.6~0.05mmの孔隙は-2の6%に対し-4は16%と多く、その分布は-4では0.3~0.1mmに相当する部分がとくに多い、0.05mm相当の孔隙は逆に-2の方が多くなつている。このことから-4では土粒子の大部分が、集合体間の孔隙がその頸部で直径0.5~0.1mmであるような粒径範囲の集合体を構成し、それらがかなり整一に配列し、孔隙の頸部を閉塞する小破片、或は過大な孔隙を形成する大土塊が少ないことを示している。

註) 以下孔隙の大きさは当量直径を示す

一方-2では集合体の配列は直径0.6mm以上の粗孔隙を支るほど粗な部分がありまた集合体の接触が密であるか或は孔隙の頸部が閉塞されるような状態にあることを示している。

顕微鏡観察の結果はこれらの推察を具体化する。即ち-2、-4ともに構成単位は3~0.3mmの集合体であるがその配列は粒径分布から推察したとおりである。

B層の分布曲線の形はA層のそれにそれぞれ似た形を示した。-2では0.6mm以上の孔隙が8%で-4のそれの約2倍あつたが、0.6~0.1mmの孔隙は6%で-4の8%より少く0.1mm以下では多くなつている。このことから-4では集合体の大きさと配列は直径0.2mm以上の孔

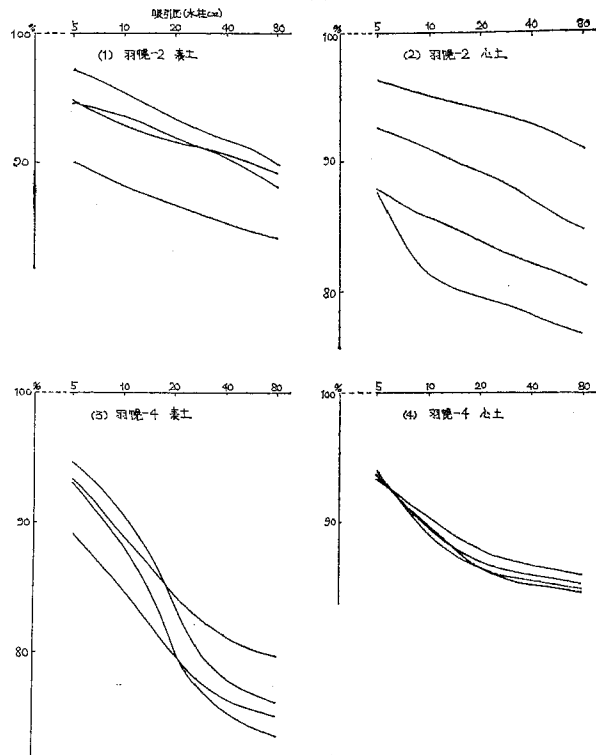


図 6 攪乱せずに採取した土栓試料の脱水曲線

隙を支えるものであり、-2では-4よりも配列が粗であると同時に 0.1 mm 相当以下の孔隙を形成する密な接触や頸部の閉塞があることが推察される。薄片の観察からとも大部分 1 mm 以上の集合体から構成されるが、-2では粗大な間隙と小破片による頸部の閉塞が多い。以上の結果から-2は-4に比べ集合体(孔隙)の配列が著しく不整であることがうかがわれる。個々の試料の測定結果を示した第6図ではこれらのことが更に明らかで、-2はA,B層ともに個々の曲線の位置が上下に大きく変異した、この傾向は特にB層で著しい。

異部心土： 極めて堅密で粗孔隙に乏しい、分布曲線からその大部分が直径 $0.2\sim 0.15\text{ mm}$ の範囲にあることがみられる。薄片では約 1 mm の集合体が $0.1\sim 0.2\text{ mm}$ の間隙を挟んで密に配列し集合体間に時々見られる大きい孔隙も狭い孔隙を通して相互に連通するのが見られる。

紋別心土： 大角柱状構造を示しきわめて堅密で粗孔隙に乏しい、分布曲線から $0.3\sim 0.2\text{ mm}$ の孔隙がやゝ多いことが見られる。薄片では構造単位内部には外と連通した粗孔隙は認めら

れない。構造単位間の亀裂は0.2~0.3 mm巾であつて吸引法から推定した大きさと一致する。

郡山心土： 堅密で粗孔隙に乏しい。分布曲線には前2者にみられたような明確な構造単位間の孔隙を示す特徴は見られない。0.1 mm以下で孔隙量が漸次増加し、細孔隙が少くないことを示している。薄片では亀裂は認められず、径0.2~2 mmの孔隙が泡状に孤立して多数みられる。倍率を高くするとこれらの空隙の壁には一部粘土の沈積がみられる。分布曲線が0.1 mm以下で上向きになるのはこれらの孔隙から相当する狭い水みちを通つて逐次排水されるためと考えられる。

銭亀沢表土： 軽鬆、膨軟で粗孔隙に富む分布曲線から0.5 mm以上の粗孔隙が少く、0.15 mm前後で最も多いことが示される。篩別した砂の孔隙分布から推して0.3 mm程度の集合体が構成単位でありかなり整一な配列することがうかがわれる。薄片では高次の構造を示す0.5~数 mmの大粒団の空隙に同様に高次の構造を示す0.1~0.3 mmの小集合体が粗に配列し、その空隙は大部分0.2~0.1 mmの孔隙で形成されている。

4. 要 約 構造性において特徴のある8種の土壌について吸引圧0~80 cmの間の孔隙の粒径分布曲線と土壌薄片の観察から粗孔隙の状態を記載し構造を特徴づけようと試みた。前者から粗孔隙の量の関係が明確になり、後者から形、大きさ、連通状態等前者から推定されたことから確かめられ、相補つて粗孔隙並に集合体の配列状態が把握された。

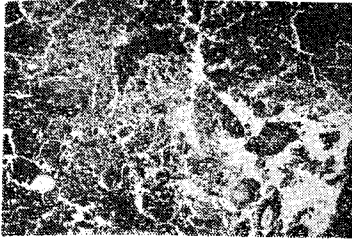
Ⅲ む す び 孔隙性は土壌構造の重要な側面でありその測定は構造を表現する要素となる。

土壌に関する研究調査が多方面にわたるように土壌の構造を取扱う場合も広範囲にわたる異つた立場がある。こゝでは作物栽培の立場から畑土壌の孔隙の測定について述べた。多くの測定方法が提案されまた提案されつゝあるがそれらはそれぞれの観点、目的から考案されたものであつてその応用にあつては適切に撰択または適合するよう修正することも必要となる。ある種の方法は測定操作そのものが土壌に影響を与えその結果をみている場合があつて、測定結果の意味を正確に理解しなければならない。個々の測定法の結果は孔隙の量、形、大きさ分布、配列、連通性等孔隙を表現するすべての要素を包括するものではない。それ故孔隙性の表現は総合的な把握に基くことを必要とし、空気、水その他の液体の透過性のような孔隙の機能を表現する要素が加ふことは更にそれを確実にする。

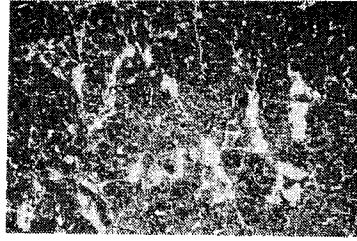
文 献

- 1) BAVER, L. D. 1958 Soil Physics. (John Wiley & Sons, Inc., New York)

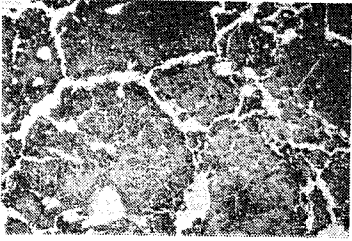
- 2) JOHNSON, W. M., McCLELLAND, J. E.; McCALEB, S. B. ET, AL, 1960
Classification and description of soil pores.
Soil Sci. 89
- 3) KUBIENA, W., BECKMANN, W. und GEYGER, E. 1961
Zur Methodik der photogrammetrischen Strukturanalyse
des Bodens. Z. f. Pflanzenern., Diing., Bodenkunde 92.
- 4) FOX, W. E. and PAGE-HANIFY, D. S. 1954
A Method of determining bulk density of soil. Soil Sci.
- 5) PHILLIPS, R. E., JENSEN, C. R., and KIRKAM, D. 1960
Use of radiation equipment for plow-layer density and
moisture. Soil Sci., 89
- 6) 美園繁 1958 実容積法による土壌物理性の測定 土肥誌 29
- 7) RUSSELL, M. B. 1942 Pore size distribution as a measure
of soil structure. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 6
- 8) 内山修男 西塚良一 1954 RUSSELLの低吸圧空隙測定装置の改良について
土肥誌 24
- 9) BRADFIELD, R. and JAMISON, V. C. 1938
Soil structure—Attempt at its quantitative
characterization. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 3
- 10) 北岸確三 沖田正 1956 土壌構造に関する研究. 第1報 東北農試研究報告 8
- 11) 川口桂三郎 虎谷博一 1960 粒団の量と孔隙性にもとづく土壌構造の一表示。土肥誌 3
- 12) 川口桂三郎 虎谷博一 1958 ケロシンを用いる粒団の仮比重の測定。土肥誌 29
- 13) Fox, W. E. 1959 An instrument for the determination of
soil volume, Soil Sci. 88
- 14) PURI, AN, TAYLOR, E. M. and ASGHAR, A. G. 1934
A new apparatus for measuring soil Shrinkage. Soil Sci.
- 15) PERRY, E. P. 1942 A simple rapid method of determining
the apparent density of soil aggregate.
Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 7
- 16) 石川武男 徳永光一 月館光三 1961
土壌水分吸引測定装置の改良について。 土壌の物理性 4



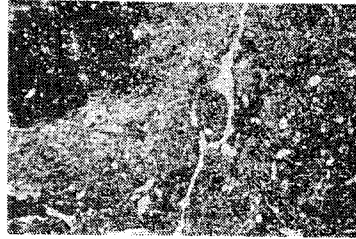
①



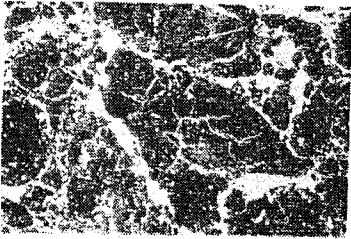
⑤



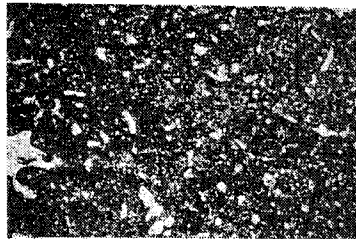
②



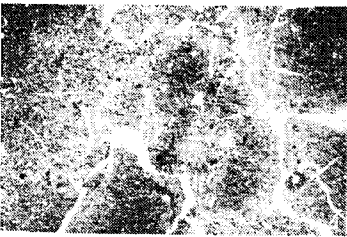
⑥



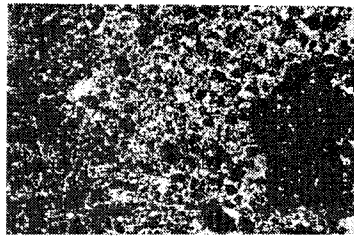
③



⑦



④

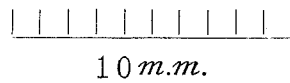


⑧

① 羽幌-2, A層 ② 羽幌-2, B層 ③ 羽幌-4, A層 ④ 羽幌-4, B層

⑤ 興部 C層 ⑥ 紋別 C層 ⑦ 郡山 B層 ⑧ 銭亀沢 A層

図 7 薄片でみた土壤の構造



10 m.m.