

# 土 壤 の 易 耕 性

九州農業試験場 木 下 彰

## 1. 易 耕 性 の 定 義

“易耕性”という語が日本ではじめて用いられたのは、野口彌吉・福田仁志訳：L. D. ベーバー、*土壤物理学*、昭和30年8月、朝倉書店（L. D. BAVER: *Soil Physics*, 1948）において、*soil tilth* の訳語としてである。

藤原彰夫らは<sup>1)</sup>、訳書「ラッセル著、*土壤条件と植物生育*」で、*soil tilth* の訳語として“土肌”を採用しているが、以下に述べるように*soil tilth* の定義、内容を適切に表現する点において、易耕性のほうが好ましいように思われる。

以下、易耕性を*soil tilth* の同意語として論をすゝめる。

Russell<sup>2)</sup>によれば、易耕性はアイマイな概念であるが、これには二つの因子を含んでいるとしている。①耕耘の粗密（*coarseness and fineness*）：粒団の粒径別分布と関連、②耕耘の熟否（*mellowness and rawness*）：水分の多少に関連、の二つと考えた。

また、好ましい易耕性をうるためには、つぎの土壤の性質が重要であるとしている。

(a) 孔隙の連続性： 過剰水の急速な下層への移動、CO<sub>2</sub>ガスの急速な大気への拡散。

(b) 孔隙の安定性

(c) 孔隙の質と量： 干バツに対して保水し、しかも植物に供給しやすい水をもつ孔隙を多くもつこと。

(d) 表層土の粒団性（*crumbly*）： 粒団の大きさが風にとばされない程度に大きく、発芽によいように小さく、湿つた時に粘着せず、農具を使つた時に連結しないこと。

Baver<sup>3)</sup>によれば、易耕性は植物生育に関する土壤の物理的條件である、と定義される。この定義のなかには、植物生育に対する好適な物理的環境としての土壤の質を決定するすべての土壤条件を含んでいる。この物理的條件の大部分は、土壤の構造関係によつて占められている。

適度な通気、十分な水分、降雨の速やかな浸入はよい易耕性の関数となるが、しかし易耕性は単に構造だけの関係でなく、コンシステンシーのある相を含んでいる。

構造からみたよい易耕性土壤は、コンシステンシーでも表わすことができる。たとえば、構造からみたよい土壤は、もろくて扱いやすいが、このようなfriabilityはコンシステンシー

の主要な部分である。

したがって、易耕性は土壌のコンシステンシーの一定範囲内に表われる構造的性質に基礎を置いて定義され、結局、真の易耕性はコンシステンシーの好適範囲内のある構造的条件に関連しているものであるとみるべきである；易耕性は、本来植物生育を基にして定義されるが、土壌の面からは「耕しやすい」ことが基になる。なお、易耕性は動的な土壌条件である。

Lyon and Buckman<sup>4)</sup>によつてもBaverと同じく、易耕性は植物生育に関係する土壌の物理的条件であると定義されている。関与する因子としては、構造、とくに粒団化量(Gra-nulation)が重要で、また土壌水分も大きな因子として働くとしている。

米田<sup>5)</sup>によれば、易耕性はつぎの二つの内容を含んでいるとみている。

- ① 作物生育の培地としての土壌の物理的環境おもに土壌構造に関連
- ② 耕耘の難易を規定する土壌の物理的性質おもにコンシステンシーに関連

この見地より、易耕性の判定は土 構造、コンシステンシーの両面より行なりがよいとして、つぎの項目の測定を採用している。

#### 1. 土壌構造について

- 1) 土壌懸濁液の安定度、水中沈定容積
- 2) 分散度
- 3) 粒団化度、粒団安定度
- 4) 透水性

#### 2. 土壌のコンシステンシーについて

- 1) 針入度
- 2) 圧砕度
- 3) 固結度、連結度、剛性率
- 4) 可塑性限界
- 5) 液性限界

喜田<sup>6)</sup>は易耕性についての見解をとくに示していないが、土壌構造に関する論説において付随的に述べているところによると、易耕性を土壌耕作に関連する性質として解釈し、その判定項目として、可塑性、粘着性、針入度、砕易性、せん断強度などをあげている。

したがって、易耕性を土壌の耕作に対する性質としてのみとり上げ、植生に対する土壌の物理的条件を含めていない。植生に関連するものとして土壌構造を重視し、このうち植生に深い関係のある性質としては、①構造の安定度、②構造の孔隙性をあげている。

アメリカ土壤学会<sup>7)</sup>で採択されたSoil tilthの解釈(定義)は、具体的に示されている。すなわち、易耕性は「耕耘作業に対する応答(Response)および根の貫入に対する機械的抵抗」に関する土壤の物理的条件である」としている。これによれば、いままで述べたRusse~~と~~、Baver, Lyonら、米田などの採用している「植物生育に関連する……」を「根の貫入に対する機械的抵抗」と具体的に示して、狭い意味としていることが異なっている。

以上のように、易耕性の定義として、一般的には「植物生育に関連する土壤の物理的条件である」とするのは妥当であると思われるが、学術語としてはさらに具体的に内容を明示することが望まれるが、現在のところ困難であるので、アイマイな概念として用いざるをえない。

一般的について、良い土壤・悪い土壤というばあい、養分の豊否・供給力の見地からは肥沃度(性)(Fertility)、物理的条件の見地からは易耕性(Soil tilth)が対比できる語として用いられるように思われる。

## 2. 易耕性の判定尺度

易耕性を植物生育に関連した土壤の物理的条件であるとしたばあい、そのなかには多くの内容を含んでいる。易耕性の判定尺度を歴史的にみると、表-1に示すとおりである。

表 - 1. 易耕性の判定尺度

提 案 者	年 代	判 定 尺 度	内 容
Doyarenko	1924	Crumb, Clodの粒径別分布	粒径1~5mmが植生に好適
Wehr	1924	Atterberg Consistency constant	
Kvasnikov	1928	Crumb, clodの粒径別分布	
Keen et al	1930	Clodの粒径別分布	風乾度の篩別
Krause	1931	Clodの粒径別分布	ベンゼン中で篩別
Sokolovsky	1933	粒団化量 孔隙量	2~3mm粒団が植生によい 毛管孔隙と非毛管孔隙とが $\frac{1}{2}$ ずつがよい。非毛管孔隙が 10%以下は不可。
Henin	1936	圧入力(Force of penetration)	

Yoder	1937	非毛管孔隙量 粒団化量に関連	棉の播種床, ビートの発育より 実証
Scott-Blair	1938	圧縮性 (Compress- ibility)	圧縮量は Looseness の程度 を示す。
Richards	1941	圧入力	Penetrometer により測定
Shaw Haise . Farnsworth	1942	圧入力	Penetrometer により測定 圧力は土壌水分による変動大
Baver	1948	粒団化量 孔隙量	粒団は乾式篩別, 水中および ベンゼン中篩別 (後二者より易 耕性の安定度判定) 孔隙は孔径を考慮, PF 1.5~ 2.0 で非毛管孔隙を分ける。
米田	1960	土壤構造, コンシス テンシーの全般	
農林水産技術会議 . 8)	1960	耕耘の難易 土地の乾湿	
喜田	1965	可塑性, 粘着性, 碎易性, 針入度, セン断強度	

表-1. を通覧してわかるように, 易耕性の判定尺度としては, コンシステンシーに関するものと構造に関するものとに分けられる。これを一覧表として表-2. に示した。

表 - 2. 易耕性判定尺度の一覧

コンシステンシーに関するもの	構造に関するもの
アッターベルクの恒数 (1)	粒団の粒径別分布 (8)
圧入力 (3)	孔隙の質と量 (4)
圧縮性 (1)	
コンシステンシーの性質全般 (2)	

[注] カッコの数は採用者の数

判定尺度としては, 単純化していかうとする傾向がうかがわれる。しかし, 各研究者が提案している尺度が, 易耕性を適確に示すには不十分であるように思われる。なぜならば, 易耕性それ

自体、アイマイな表現であり、しかもその意味する内容において、土壤の物理性一般とほとんど同じであるから、その判定には、物理性の全般にわたる各々の性質を測定する必要があると思われる。とはいえ、各々の性質の相互には関連性があるので、一つの性質より総合判定の可能性は存在する。各々の性質の易耕性における役割、さらに性質相互の関連性が明らかにされたのちに、より単純化された判定尺度がきめられるべきと思われる。

本誌においても、土壤の物理性測定法の特集号を2回（才2号、才11・12合併号）おこなっており、測定法自体が研究段階にある現状である。

### 3. コンシステンシーからみた易耕性

山中<sup>9)</sup>がいうごとく、土壤の物理性の研究においては、土壤をmaterialとして扱うことと現地の動的な状態を生産と関連させて取り扱うことが、重要な使命であると考えられるが、易耕性のばあいにはとくにこのことが強調される。

コンシステンシーはmaterialとしての土壤の力学的な面に関連がつよく、土壤構造は作物生育との関係が大きいものとみることができる。

コンシステンシーと構造との関係は、須藤<sup>10)</sup>が指摘しているごとく、土壤学専攻者は土木工学に不得意であり、逆に土木工学専攻者は土壤学的手法に不なれであるために、関連づけた研究成績が少なう。

土壤のコンシステンシーは耕作関係に密接に関連するが、農作業の具体的な問題として、つぎの項目があげられよう。

- (1) 播種床の整備
- (2) 農機具の扱いやすさ
- (3) 中・大型機械導入の可否
- (4) 耕耘作業と土壤構造の生成・破壊

さて、コンシステンシーの意味（定義）についてふれてみると、E. C. Blingham は「コンシステンシーとは、形を永久に変化しようとするのに抵抗する性質で、流動と力との関係で定義できる」としている。<sup>10)</sup> 安富<sup>11)</sup> は「コンシステンシーは、土壤の変形過程における力学的抵抗の大きさを示す概念である」としている。実際上では、コンシステンシーは、耕耘作業における土壤の抵抗の大きさとしてみることができるわけであるが、どのような性質を、どのような

条件で測定すればよいが、また易耕性との関連が十分明かにされていない。

なお、Baver<sup>13)</sup>はJ. C. Russellの所説を採用して、コンシステンシーをつぎのように定義している。すなわち、「種々の水分含量で、土壤に作用する凝集および付着に関係をもつ物理的な力を表わすものであつて、それには三つの事項が含まれている。①重力、圧力、衝撃圧縮、および牽引に対する作用、②他の物体・物質に付着しようとする傾向、③手ざわりによる感覚、などである。」

コンシステンシーは土壤水分含量によつて自動的に変動するが、これに基づいてAtterberg<sup>13)</sup>は4つの基本型を提示した。

- (1) Sticky consistency (粘着、付着を示す)
- (2) Plastic // (粘りがあり成型できる)
- (3) Soft // (もろさを示す)
- (4) Harsh // (剛性を示す)

また、アッターベルグは土壤水分含量による変化限界を示しているが、この限界は土壤を加工成型して測定しているので、作物生産における場としての土壤が自然状態の構造であることを考えれば、易耕性との関係を適確に表わすことはできないと思われる。

表一3にアッターベルグ限界と易耕性の尺度の性質との関係を対比することを試みた。

表一3 アッターベルグ限界と易耕性の尺度

アッターベルグ限界		水分	硬さ・状態	関連する易耕性の尺度	
				耕作関係	植生関係
液性限界		多	軟、液体的		支持力(水田)
索性領域	粘着限界	↑	中、弾性体的	圧入力(針入力) 粘着性 地耐力 碎易性 可塑性	根の伸長・発育 (水田、畑)
	索性限界				
凝集限界 (収縮)		少	硬、固体的	セン断抵抗	根の伸長

アッターベルグ限界(恒数)は外力に対する土壤の応答の基本的な性格を表わすのには有効であるが、易耕性の判定尺度としては不十分であると思われる。

易耕性の判定尺度のうちでコンシステンシーに含まれる性質の項目は、わが国の農地の土壌条件の特殊性、すなわち、水田(湿田、半湿田、乾田の落水・澆水の管理)、火山灰土などに適応した独自のものとして設定する必要がある。

つぎに従来よりコンシステンシー判定に用いられた性質を列举して、易耕性判定に対しての有効さについて考察することにする。

(a) 碎 易 性

この性質は整地作業の巧拙に関係し播種床の整備のうえで重要と考えられる。この測定は山中<sup>14)</sup>のいう連結度によつて測定できる。

(b) 圧 入 力(硬度、針入力)

この性質は中、大型機械導入の可否の判定に必要である。山中<sup>14)</sup>の考察した土壌硬度針は簡便であるが、おもに土壌断面判定用であるので、土層内部まで連続的に測られない不利がある。コーンペネトロメータは土層全層用に用いられる。

土壌硬度と機械の導入可否について、各種の測定器を用いた結果では、測定器間の値が乱れ、相互に比較できないとしている<sup>15)</sup>。これを表-4に示す。

表-4 圧入抵抗 ( $K_g/cm^2$ ) と作業の難易

作業の難易 測定器	不 能	困 難	可 能
農業機械化研製 小型円錐	< 5	5~7	> 7
全 上 大型円錐	< 4.5	4.5~6	> 6
山中式 硬 度 計	< 0.8 ( < 7 mm )	0.8~1.6 ( 9~11 mm )	> 1.6 ( > 11 mm )

[注]

(1) 小 型 円 錐 頂角 30° 長さ 30 mm 断面積 2 cm<sup>2</sup>  
 大 型 " " 30° " 51 mm " 6 cm<sup>2</sup>  
 山中式 硬 度 計 " 30° " 40 mm

(c) 粘 着 力

凝集力(Cohesion)、付着力(Adhesion)は農器具の作業能率、作業巧拙に関係するので、この測定は必要である。

土壌を粘性体とみなして、各種の粘度測定器が考案されているが、現地の土壌条件に適応した方法および測定成績はなお不十分のように思われる。たとえば、水田用と畑地用の測定器、自然構造土壌を対象とした測定方法、測定値と現地での機械作業との関係が明確でないので、これらの検討の必要が残されている。

#### (a) セン断強度

この強度は農具によるセン断の強さを知るうえで有効であろう。従来用いられている直接セン装置を実際の農具の機構に近づけることにより、より実際的な関連がえられるものと考えられ、土木工学的より農学的な装置、方法の開発が望まれる。

### 4. 構造からみた易耕性

さきに述べたように、構造が易耕性に関連するものとして、つぎの項目があげられる。

#### (1) 粒団の粒径別分布

粒団には、Aggregate, Crumb, Clod, Granule を含む。

#### (2) 孔隙の質と量

おもに非毛管孔隙の量が易耕性に関係するとするものが多い。

ここで粒団の分類についてふれると、アメリカ土壤学会で採択したものは、つぎのようである。

カッコ内は筆者の訳

Aggregate(粒団): compound particle of soil

Crumb : Rounded porous aggregate up to 10mm in diameter

Clod(土塊): Lump of soil material

Granule : Friable rounded aggregate of irregular shape up to 10mm in diameter

わが国においては、このような粒団の分類はないが、粒団の粒径別分布と同時に、粒団の質が構造に及ぼす影響が大きい。

粒団化量と質、これと孔隙の量と質とは互に関連しているものであるが、易耕性への関与をみると、前者はコンシステンシーを通して土壌耕作に、後者は構造を通して植物生育に関係がふかいものと思われる。

美園<sup>14)</sup> は3相(固相・液相・気相)の組合せの状態を3相構造として提案し、構造上の重要な性質であるとしているが、これはいまのべた両者の総合した性質をみるうえで有効であると考

えられる。

また、構造の総合的なFabricをみるには、SchofieldのPF一表示法も有効な手段であると考えられる。

構造が植物生育に関する易耕性に関する面は、

- (1) 土壤通気が十分に行なわれること
- (2) 有効水分を適当量ふくむこと。
- (3) 根の伸長に対して土壤の機械的抵抗が小さいこと。

の3つであろう。

これらの3つの項目を総合的に一つの測定項目で判定することはできないので、各々について測定する必要がある。現在、有効と考えられている方法について述べると、つぎのとおりである。

#### (a) 粒団の粒径別分布

水中篩別法による耐水性粒団の測定がよいと考えられる。耐水性粒団は構造の基本単位とみなされ、また実験の再現性がよい。

この分布によつて、土壤通気、有効水分量(毛管水)、根の伸長抵抗のおおよその推定が可能となる。

#### (b) PF-水分曲線

PF 0よりしおれ点までのPF-水分曲線は、孔隙の大きさと量を知ることができ、通気性、保水力の判定が可能である。この曲線によつて非毛管孔隙量も算出されるので、きわめて有効なもの目される。

PF測定法は寺沢<sup>15)</sup>がくわしく述べているので省略する。

#### (c) 非毛管孔隙量

この量は通気性の目安として用いられ、圃場容水量以下の低PFの孔隙で、そのPF値には定説がない。多くの研究者の値を示すと、

Baver	:	PF	1.5~2.0
椎名 <sup>16)</sup>	:	PF	1.5~2.0
真下 <sup>17)</sup>	:	PF	1.7
木下 <sup>18)</sup>	:	PF	2.0~3.0(≒2.7)
松尾 <sup>19)</sup>	:	PF	2.42
農林水産 <sup>8)</sup> 技術会議	:	PF	1.5
Richard <sup>20)</sup>	:	PF	1.7~2.0

Colman<sup>20)</sup> : pF 2.5

非毛管孔隙量は易耕性判定の重要な指標となるので、その測定はぜひ必要である。しかし、これはあくまで量的なもので、機械的な面を確実に把握するためには、その通気性測定が望ましい。孔隙の測定については箱石<sup>21)</sup>の記述がくわしい。

(d) 通気性

非毛管孔隙の孔径分布、孔隙の連絡性などの総合的な機能として表われるものであるから、この測定が望まれるが、自然構造の土壤に適した測定法が確立していないうらみがある。

土壤中の空気の運動は拡散に基づくことが多いので、空気組成を測定する方法がよいと考えられる。

(e) 有効水分量

この量は植物に生理的水分を供給する能力判定に有効である。その水分保持の張力範囲の下限は圃場含水量を当てるべきであろう。なお、有効水分の張力領域内の水分の有効度について、論争が行なわれたが<sup>22)</sup>、有効水分均一効果説(Veihmeyer, Israelson, Wadsworth and Das, Boynton)は否定され、不均一効果説(Lundegardh, Lewis, Martin, Aldrich, Furr, Taylor, Davis)を正しいとする意見が多い。これらの論争の基く点は、水の伝達(毛管伝導速度)の相違によるものと考えられ、水の伝導度の重要性が認識される。

(f) 透水性

降雨の急速な下層への浸透は耕地の必要条件である。自然構造土壤について、上層の配列を考慮に入れて測定することが望まれる。

5. 農林省の諸事業に採用されている易耕性の尺度

農林省では土壤関係の事業を行なっているが、易耕性関係の判定項目をあげると、つぎのようである。なお、この判定項目は畑土壤の生産力に関する研究<sup>8)</sup>が基礎となつている。

(1) 耕耘の難易

つぎの3つの項目によつて総合的に判定する。

① 表土の土性

区分	土性	要因強度
粗	S, LS, SL, FSL	1
中	L, SiL, SCL, CL, SiCL, SC	2
細	LiC, SiC, HC	3

〔注〕 要因強度は1の方が阻害が少ない

② 表土の粘着性

湿潤時の土壌の農具に対する粘着の度合を感覚によつて判断する。

区 分	要 因 強 度
なし—弱	1
中	2
強	3

③ 表土の風乾土の硬さ

区 分	要 因 強 度
軟	(2)
やや硬	1
硬	2
非常に硬—極硬	3

(2) 土地の乾湿

透水性、保水性、湿潤度より判定する。

① 透水性

こゝでいう透水性とは、土壌の通気、通水能力を示す指標で、infiltration, percolation, permeability などの諸性質を内包するものである。適確な測定法は研究中有るので、さし当り山中式注入法、Musgraué 法を適宜使用し、全土層状態(土性、構造、孔隙など)を考慮して総合的に判定する。

② 保水性

こゝでいう保水性は有効水分保持能を示す意味で、表土および次層土壌の圃場容水量(pF 1.5)とシオレ係数(pF 4.2)の差から判定する。

区 分	区 分 強 度
大	1
中	2
小	3

区 分	pF 1.5—pF 4.2 ( $\frac{\text{水cc}}{10000\text{cc土}}$ )	要 因 強 度
大	20 以上	1
中	20~10	2
小	10 以下	3

### ③ 湿潤度

一時的な水分状態でなく、年間の支的水分状態を、土壤断面の水の影響をうけている程度から判定する。つぎの4区分に分ける(カッコ内の数字は要因強度)。(詳細は省略)

乾～半乾(2), 半湿(1), 湿(2), 多湿(3)

以上のように、易耕性の判定は統一した計器によらず、また感覚に依存することが多く、この面の研究の必要性を痛感する。

### 6. おわりに

易耕性について述べるにあたって、わが国における研究成績があまり多くないので、主観的に記述せざるをえなかつた。こんど、易耕性をはじめ、土壤の物理性の研究方向、統一的な測定方法の検討とその決定、また用語の統一、などについて、本研究会において検討することを熱望する。

### 引用文献

- 1) 藤原彰夫ほか訳: ラッセル, 土壤条件と植物生育
- 2) E. J. Russell . E. W. Russell: Soil Conditions & Plant Growth, 397 (1927)
- 3) L. D. Baver: Soil Physics, 380, (1956)
- 4) T. L. Lyon and H. O. Buckman: The Nature and Properties of Soils, 52, (1936)
- 5) 米田茂男: Soil Tilth の判定法について, 土壤の物理性, 才2号 24~28 (1960)
- 6) 喜田大三: 土壤構造の判定法, 土壤の物理性, 才2号, 28~33 (1960): 団粒分析法, *ibid*, 才11~12 合併号, 33~46 (1965)
- 7) Glossary of Terms Approved by the Soil Science Society of America, Soil Sci Soc. Amer. Proc, 26 316 (1962)

- 8) 農林省農林水産技術会議事務局： 畑土壤の生産力に関する研究， 31~44  
(1962)
- 9) 山中金次郎： 土壤の物理性，才1号，1~2 (1959)
- 10) 須藤清次： 工学における土壌学，土壤の物理性，4~8 (1960)
- 11) 安富六郎： 土壤のコンシステンシーの測定方法，土壤の物理性 才11~12合併号  
9~22 (1965)
- 12) 野口彌吉・福田仁志訳： L. D. ベーバー，土壤物理学，109~134 (1955)  
朝倉書店
- 13) L. D. Baver: Soil Physics, 3rd ed. 97 (1960)
- 14) 山中金次郎： 土壤のコンシステンシーの測定法，土壤の物理性，才11~12合併号  
1~8 (1965)
- 15) 農林水産技術会議事務局： 土壤肥料分野における農業構造改善のための技術指針  
(未定稿) (1965)
- 16) 美園 繁： 土壤の履歴現象に関する研究，農技研報告，B11，1~197  
(1961)
- 17) 寺沢四郎： 土壤水分の吸引力(PF)の測定法，土壤の物理性，69~82  
(1965)
- 18) 椎名乾治： 畑地の水分管理に必要な2・3の水分恒数とその測定法，土壤の物理性，  
才11~12合併号，83~90 (1965)
- 19) 真下育久： 林木の成長と土壤の物理性，土壤の物理性，才8号，27~35  
(1963)
- 20) 木下 彰： 未発表
- 21) 松尾憲一： 粒径組成と土壤の物理性に関する研究，農技研報告，B14  
275~356 (1964)
- 22) L. A. Richards and C. H. Wadleigh: Soil water and Plant  
Growth, 73~251 (1952) B. T. Shaw: Soil Physical  
Conditions and Plant Growth (1952)
- 23) 箱石 正： 土壤孔隙の測定法について，土壤の物理性，才11~12合併号  
47~56 (1965)
- 24) 玉井虎太郎： 土壤有効水の性格と畑地かんがい，畑地かんがい，No.15，6~11  
(昭和34年3月)