

プラウ耕と土壤物理性

新 関 三 郎* 渡 辺 兼 五**

I ま え が き

物理学的には土は大きさ、形状の異った多くの粒子が集合し、時には化学物質の溶液を含んだ水分で包まれたり、吸着イオンをもって包まれていることもあり、有機物、空気及び微生物等は普通に含まれている。農学的には母岩から言えば大地の表面を覆う分解岩石の上表皮、即ち表土の部分に当るが地質学的には下部の分解岩石をも含んでいる。この点農学的な土と普通の概念では異なるが下層土、底土又は心土と呼んでいる土層が固結悪変している場合に増収手段として土すきプラウを利用することは世界各地で行われ、わが国では北海道で広く実用化されている。

このように幅広い組成内容になっっている土の物理性を追求することは至難中の至難なことで、ことに残された農学上の理学的問題は、サンプルした土を一旦処理して実験室で追求できるものは少く、圃場の状態を知りたいことが多い。世界の各国ではソイル・ビンや人工圃場を設備して自然の圃場状態に接近しようと努めているが、やはりそれにも限界がある。しかし、幸にも近年漸くこの方面の研究が盛んになろうとしていることはまことに喜ぶべきである。新関が1970年に西ドイツのプラウンシュバイクにある国立農業機械研究所 (Institute für Landmaschinen der Forschungsanstalt für Landwirtschaft) に主任 W. Baader 教授を訪ねたことがあるが、同博士は「従来プラウの研究を農学的な面から進めて来たが、明年からプラウの構造機能等についてプラウ固有の物理学的面からの割り出しを、振り出しに戻って始めたい。」と述べられていた。いうまでもなく抜本的な新型のプラウの開発を意図しての話で、それには土壤物理性や力学的な基礎をもっと詰めなければならぬという考えであったと思う。

そこで筆者らは Baader 博士と同じように振り出しに戻って従来、日本及び諸外国においてどのような項目が土壤の物理性に関連して耕起作業で取り上げられていたかを先ず振り返って見たいと思う。

* 元農林省研究企画管理官

** 東京農工大学農学部 [1972. 9. 8. 受理]

II 土壤と耕器間の土壤物理性の相互作用

土壤と耕器の間には多くの相互作用があるが次に挙げる土壤の物理的特性は耕起によって変化を受けることは一般に知られている。

A 土の団粒の形状と大きさ

土塊を形成する土粒子の大きさは圃場では甚だしく異っている。一定の土粒子の集団を組織する粒子の分布は実際にはいろいろな割合で存在し、分布即ち粒度は機械分析によって定められている。

B 間隙容積すなわち土壤中の 空気の見掛け容積

間隙率は見掛け容積の百分率で表わした間隙の容積である。間隙性は土塊の組織によって変り個々の土粒子の形、構造、有機物の含量等のほかに耕器によって膨軟にしたり、固められることによっても変る。

C 細かいか粗いかの孔隙の関 係、すなわち水と空気の含有量

砂質土は空隙が大きいが全体の空隙量は小さい。細かい組織の土は粒形成の可能性があって、個々の粒子間又は団粒間の空隙の関係で全体の空隙量は大きい。それに有機物を含んでいるときは、さらに増大する。草地土壌では60%*まで、粘質土は砂質土より空隙量は広範囲に変わっていることが知られている。しかし、空隙の大きさによって大小の孔隙があることは知られているが、それぞれの量を測定することは極めて困難である。若しこれらの測定が出来るようになると、土壤中の水分の移動を知るのに大きな手助けになろう。いうまでもなく空隙量は間隙水と密接な関係にあって、土と水分の組み合ったものの機能を解くに当って、重力によって土中に流れ込みあらゆる空隙を充たす自由水と、土塊の中の水分は土の物理的作用に影響するところ非常に大きいので、土壤物理学の問題は殆ど土中水分の理学的な研究になると言われるほど重要である。孔隙量は団粒化を妨げる耕器を

* 普通は30~50%といわれている。

使ったり、有機物施肥を減らすようなことがあれば簡単に減らされる。また普通は耕深によって孔隙量が増減することはいうまでもなく、孔隙内の水分は透水によって補給されているので、耕起によって空隙量を変化させることは土壤水の含有量に重要な意味を持つ。

D 土粒子自体を混ぜ合わせることおよび他の物質を混ぜ込むことの影響

以上の他に耕器による直接の影響として、又他の要素によっても影響をうけるが次の諸点が土壤の肥沃度及び作物の収量に影響を及ぼす土の物理性として取り上げられている。

1) 土を膨軟にする効果又は膨土率

普通、土を膨軟にした場合にその程度を前の状態に比較した率を膨土率と呼び実際の作業では耕起された土地の表面の高さを、未耕起の地表よりどれだけ高いかによって表わしている。普通、へら型プラウでは30~50%だけ高い。これは、一つは壘組(れきぐみ)と称して図式的には断面矩形の壘を45°の反転(図-1参照)に規則正しく起すから、下側に二等辺三角形の空隙ができる。また地表面は図-2の如く櫛状と称し壘条の合せ目が稜

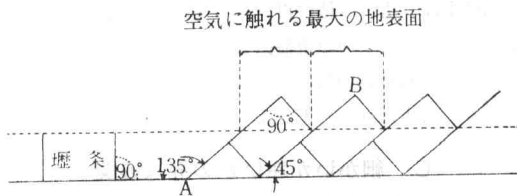


図-1 壘条の反転

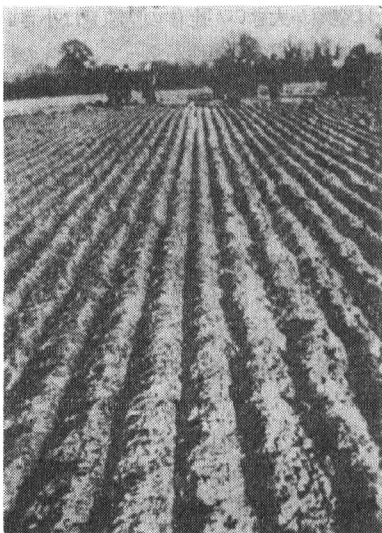


図-2 プラウ耕後の地表面(二面がよく現われている。壘は砕かれているが、形を保っている。)

となる。平坦でないからである。図-1の図式は深さ7インチ、幅11インチでAの角度は140°に作図したが135°から140°の反転角度にして空気に触れる地表面面積を最大にする。そして下部に草かゴミのマットレスのできるのを防ぎ、気水の流通をよくして腐植質に変わるのを助ける。Bの櫛状の稜は尖っても円味を帯びていてもよい。耕起中に壘が砕かれる場合は空隙は増加するが、全壘耕として壘状をそのまま翌春まで維持する起し方を冬耕と称し一般にヨーロッパに普及している。日本ではこの方法を秋耕と呼んでいる。このように膨土率は耕器の種類や耕法によって異なる。表-1, 2はへら型プラウ及び各種耕器を用いた膨土率を示す。

へら型プラウによる膨土状態はロータリ、カルチペータで出来た膨軟性よりも永続性がある。日本では水田裏作に和犁を用いて畦立耕を九州、四国及びその他関西地方に広く普及したが、壘組(れきぐみ)と称しあらかじめ定めた畦幅と耕深を土台にして、一畦を仕上げる壘数を決め、第一壘から最終壘までの順序を正確に決めていた。この点、現在行われている世界プラウ耕法と酷似している。秋季に畦立して裏作物を作り、翌春の田植前の

表-1 プラウの型式別による膨土率(%)

土 壤	壘 体	
	へら型深耕プラウ	汎用型プラウ
砂質ローム	34.5	48.5
粘 土	37.5	58.0

註：この成績は1968年 Mr. W. Feuerlein(Chairman Governing Board of World Ploughing Organization) がローデシアにて“Soil tillage in the tropics”についてシンポジウム開催の時に発表されたもので西ドイツ、ブランウンシュバイクの農業機械研究所にて実験された資料である。

表-2 種々な耕器による膨土状態の比較

土 壤	へら型プラウ	ロータリープラウ	ロータリーカルチペータ
砂質ローム	40.2% = 100	100(a) 78(b)	79
腐植質土	100		81
粘 土	100		94(c)

註：(1) (a)：犁耕速度 1.4~2.5 m/s の場合
(b)：犁耕速度 0.8 m/s の場合
(c)：冬季間に測定

(2) 測定方法 1 プロフィールメーター
2 空隙量
3 地表面の高さ
(3) 成績の出所は表-1と同じ

収穫期まで畦が崩れず保たれるのは、壟組がしっかりしているからである。日本の壟組は、底部が粗く、つまり全壟 (whole work と呼び砕土しない壟条のことをいう。) に近く、表層の播種床になる所は、細かに砕土している。底部の粗いのは気水の透通がよいためとされている。しかし地方によって、その効果は異なり、米国カリフォルニア大学の William Chancellor は、サクラメント川流域のカリフォルニア州米産地の水田では、底部の粗いのは過温になりやすく結果が悪いと述べていた。上表において可能な最高の数字が最適の膨軟度の値と見なされている。

2) 砕土の効果 (又は混ぜ合せ率)

砕土率は作業時の土の含有水分量によって異なる。可塑性の上限界までは与えられた外力に対し形を保持するが、下限界近くにになれば土の固さは可塑性から砕けやすさを経て脆さに変わり、そして土中水の作用によって外力の影響で形を変えることは不可能となり、最終的には土塊が外力で細片に砕けるようになる。

実作業においては砕土の抵抗は、耕起後壟が乾くほど固くなるので、耕起直後の壟がやや湿潤状態を保っている間にハロー掛けをする。

ハローに対する土の抵抗力は土塊を変形、截断又は破壊するために要する力である。農家は作業の知恵として行なっていることであるが、乾きの悪い水田の如く乾土効果をねらう場合や、粒径 5 mm 以下に細かに砕土するような場合は水分を収縮限界以下に乾かして強制砕土方式を採らなければ土塊は崩れない。

このように、含水量によって異なるが耕深 25 cm, 速度 1.4 m/s でヘラ型プラウによって耕起したときの結果は表-3 の如くである。

表-3 乾燥篩分け法による成績

土 壤	団 粒 の 大 き さ		
	> 80 mm (%)	< 2 mm (%)	< 5 mm (%)
砂質ローム	34.8	7.8	18.0
粘 質 土	66.2	3.2	8.0

特に決められた土を用いず、ヘラ型プラウで細かく 34 % 砕土したときを 100 とした場合の成績は表-4 の如くである。

直径 5 mm 以下の粒子の最高可能割合が播種床には最適と見なされる。表-4 ではヘラ型プラウの粒子の割合が最も少く、ロータリ、カルチベータが最も高い。そして播種床には最も適当している。ロータリ、カルチベータと同じ機能を持っていると見られる日本のパワーロータリティラーが広く国内に普及している理由も同じように

表-4 砂質ロームにおける粒径 5 mm 以下の土粒子の割合

耕 器	土粒子の率	摘 要
へら型プラウ	100	へらによって剪断された土粒子集団は永続性がある。
デスク・ハロー	144	脆い土壌だけ。
ロータリ・プラウ	126	
ロータリ・カルチベータ	168	この式の切断作用による土粒子集団は永続性はない。良好な播種床の精度を保つ。
タイン・カルチベータ	132	
タイン・ハロー	144	先端が尖っている。
タイン・ハロー	121	先端がスプーン状。

註：(1) 測定方法：乾燥篩分け法
(2) 成績の出所は表-1 と同じ

類推できる。その反面、この粒子集団に永続性がなく、従って土中の空隙量が雨、雪、霜、凍結等によって急に減少し地表面が落ち込むのが欠点である。従ってこれら自然現象に基く害を受けやすい。

3) 混ぜ合せ効果 (又は混ぜ合せ率)

耕起によって、どのように土粒子が混ぜ合せられるかは、ラジオアイソトープで数値を求められる。表-5 は

表-5 混ぜ合せ効果

耕 器	土 粒 子	備 考
へら型プラウ	100	壟条間だけである
デスク・プラウ	—	脆い土壌では良好
ロータリ・プラウ	143	—
ロータリ・カルチベータ	(a) 390 (b) 750 理論的数値	(a) 全部爪 (b) 刃板のみ
タイン・カルチベータ	—	大体良好
タイン・ハロー	—	水平：混ぜ合せの目的を達す 垂直：選り出す
ロータリ・ホー	—	良好

ヘラ型プラウとの関連において得た数値である。

混ぜる割合がどの位の数値が適当なのかはなお疑問がある。またどの種類の耕器を使えば最もよい数値を得られるかについても研究を要する。混ぜ合わせる効果についてはあらかじめ地層を調査し下層に栄養に富む層があるときは深耕プラウを用いて混層耕をすることが実用上効果が認められているが、一般に作土を深くするために心土を少しづつ耕して作土に混ぜるやり方は世界各地で認められている。また多少目的が異なるが東ドイツの東部地方の耕地の約16%は砂質土で低い収量効率と作柄の安定を高めることが決定的な経済目標になっている。この土地は保水力が非常に低く乾季に十分な水を作物に供給できないこと、心土の理化学的性質がきわめて不適で、固く詰った層化現象を起しており、酸性で栄養物が欠乏しているのがこの地方の心土の特徴である。わずかな根がこれらの層を貫通するだけであるから、表層に含まれている栄養物を摂取するだけで、ムンフェベルク穀作研究所 (Muncheberg Crop Farming Institute) の A. Kunze によれば、この地方は赤さび砂質土で約6%の粘土と沈泥、0.7%の腐植質、pHは5以下、降水量は平均550mmでしばしば干害を起している。この土地を改良する目的で図-3にあるようなプラウを同研究所とライプチヒの国立耕墾機製作所 (National Soil Tilling Equipment Makers at Leipzig) と協同で“B-185 特殊プラウ、アトホック”を考案した。これは幅50cm、深さ40~45cmの壟を反転せず横に動かし、附属している浅いプラウが横後方に後随し、表層の50%以下の深さで地表に生えている草やゴミを溝の中に写真の如く埋め込む。この方法は今までのところ繰返して何回も行う必



図-3 B-185 特殊プラウ—アトホック—

要なく、逆に繰返して毎年行った試験区では減収を示した。理化学性のあまり適当でない心土を混ぜ過ぎた結果と認められる。大規模にこの方法を導入した試験区では20%から30%の増収を示し機械の投資に要した費用は初年度の増収分で補償された(4t/ha平均ばれいしょ収量)。増収の主な原因は表層下に前にあった詰まった固い層の消失、透水性と耕やさされた心土の保水力の本質的な改善、pH値の増加、平衡状態の腐植質と栄養成分の確実な効果等が挙げられ、これまでは施された有機物の10%が腐植質として残留するに過ぎなかったが現在アトホックプラウを使って以来は30%が残留している。

日本では二段プラウは地表物のスキ込みや深耕を目的とする外に反転を助ける狙いがあった。反転は次の項に述べるが図-1の如き135°から145°の反転を狙いとするには深さと幅の割合を大体6:10に近くする必要がある。相当深耕しても前犁と後犁の二段に深さを分け、おのおのが前記の割合に近いところで耕起できるようになっている(図-4)。また混ぜ合わせる条件に天地返しの上層の上下の順序を崩さずに、壟土を碎土する構想のものがある。それは図-5に見る如く壟が反転する直前に回転ハローで強制碎土される。



図-4 二段二連プラウ



図-5 強制ロータリ・ハロー付三連プラウ

4) 反転の効果 (又は反転率)

プラウ耕において最も好ましい反転角度は、図-1の如く135°~140°である。下面に135°反転の場合は二等辺三角形の孔隙が連なり、そこに地表物等の有機物がスキ込まれる場所となる(図-6)。古くから天地返しと呼ぶのは180°反転のことで新墾の場合の「畳返し耕法」と同じである。180°反転は空隙量は最も少い。135°反転は理論的には空隙量が最も多く且つ最も適当した値であるとこれまでされている。



図-6 草の埋込み

壟条が立ち過ぎているのは反転が弱い。90°に近くなると反転が戻ることもある。このような反転は不完全な天地返しとなり地表が露出され、草が再生し易く、土量も少ないので後作業がうまくゆかず良好な播床は作れない。

5) 均平の効果 (又は均平率)

要するに壟条が適当に平らに反転して互に密着し、相互間に空隙がなく、よく詰って稜角が正しく、図-7の如く多少丸味のある壟条の二面がよくきちんと揃って一様にあらわれているのが良い。写真では、壟は多少砕かれているが、形をよく維持している。播種床を作るか、冬耕向きの壟条にするか、しかもコネ土にするか否かにか

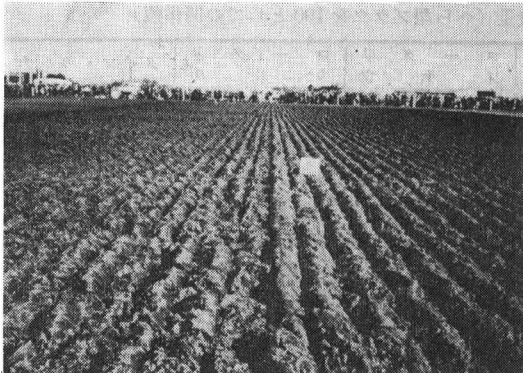


図-7 中央の合せ目が中高でない

かわらず農家はよく形の整った壟条で細かくとも粗くとも地表面が平らであることを希望する。冬耕に普通壟頂の高さが未耕地より約12cm高い場合、春には大体6cmに沈下する。西ドイツ国立農業機械研究所のH. Ridは表-6の如き成績を耕器別に報告している。また、続いて耕起による粗らさの相違について粗らさの係数をKuipers法で測定し表-7の結果を得ている。

表-6 各種耕器の均平成果の格付

耕 器	格付	備 考
デスクプラウ } デスクハロー }	6	若し速度が1.5 m/secより速いときは厚い土塊に斜に掛ける。
ロータリ・プラウ	—	へら型プラウに対し130%
ロータリ・カルチペータ	1	—
タイン・カルチペータ	7	小さい壟条
タイン・ハロー	3	—
タイン・ハロー	5	スプーンのような爪
タイン・ハロー	4	上と同じ爪+ロータリ・ホ
フ ロ ー ト	2	—

表-7 粗らさの係数

耕 器	粘 土 質 土	沈 泥 質 土	砂 質
へら型プラウ	48	—	29
ロータリ・プラウ	44	14	7
スピード・マシン	54	37	13
ロータリ・カルチペータ	16	5	2

註：測定法 (1) プロフィール記録計

(2) 粗らさ係数記録計・垂直針が5又は10cm毎の区間に記録。

6) 土壌の移動 (すき溝開き)

プラウ耕起は進行方向と横方向の両方向に多量の土壌を移動する。表-8に二つの異なる速度で、異なる犁体による耕起に基づく土壌の移動距離(cm)の測定値を示す。表の数値は壟条の平均移動距離を示す。速度の増加は土の移動距離に影響し準深耕プラウの方が汎用プラウより一層影響した。溝開きの幅は、前の末耕起地の表面に沿って測定できるすき開きの幅から数値が求められる。表-9に示すように溝開きの幅は速度の増加によって大きくな

り、0.5 m/s の増加毎に5 cm の増加となっている。

普通のトラクタ・タイヤが通るのに十分な間隔をとるには、溝開きは37 cm が適当な数値とされている。スキ幅は耕深に関連し、例えば耕深30 cm にはスキ幅70 cm が必要である。高速度のときはこの溝開きの幅はあまり大きくすべきではない。

表-8 異なる速度におけるプラウ耕起による土の移動距離

墾体の形式と速度	準深耕プラウ		汎用型プラウ	
	1.25 m/s	3.3 m/s	1.25 m/s	3.3 m/s
側方向移動距離	33.5 ^{cm}	76.0 ^{cm}	35.0 ^{cm}	44.5 ^{cm}
進行方向移動距離	20.0	73.5	20.0	24.5

註：成績の出所は表-1 と同じ

表-9 溝開きの幅

土 壌	1.1 m/s	3.3 m/s
砂質ローム	43 cm	70 cm
粘 土	46	73

註：成績の出所は表-1 と同じ

III 作物の収量

種々な試験の結果では、高い腐植質含量または高い粘土含量の特殊な条件の下ではへら型プラウはデスク及びロータリ・プラウ、ロータリ・カルチベータまたはティン・ハローによってさえも立派に置き換えられる。また多くの他の試験では一般の輪作条件の下で、あまり高くない腐植または粘土含量の土壤でへら型プラウは優秀であることも同様に立証されている。

プラウの代りにロータリ・カルチベータを利用した場合の試験では、ロータリ・カルチがプラウより優れていることを示している。この場合耕地に沢山の有機物が含有していることが重要である。例えばレープの後にビートを作る場合に、若しレープの残留物(茎葉根屑)を圃

場から全部取り除かれた場合は、ロータリ・カルチ区の収量はへら型プラウ区の収量の90%に過ぎない。しかるにレープをスキ込んだ場合はビートの収量はへら型プラウ区の106%に当り5%以上の増収を示している。この二つの成績の相違はへら型プラウは混ぜ込む率がロータリ・カルチより非常に劣っていることによると判断される。

へら型プラウは有機物の少ない鉱物質土壤であまり細かい粒子の組織の土壤構造でない場合に適合する。重粘な土地では時々土塊が粗過ぎる。この種の土では細かい構造にする耕器の方が一層適合している(表-10参照)。沢山の腐植質を含む土壤にはへら型プラウは利点を示さない。結局、次のような場合にプラウ耕の主な効果があると結論できる。

- 1 適当な深さに有機物をすき込む場合。その位置で好気性菌及び嫌気性菌の働きで腐植質が形成される。
- 2 永続性のある膨軟な土壤組織の中に空気を送り込む場合。このことはこねまわす土には必ず必要なこととされている。
- 3 剪断手段で土を砕く場合。ロータリ・カルチやデスクのような剪断手段よりも安定した粒子集団ができる。
- 4 同期的に深耕を必要とする場合。昭和の初期より当時の自動耕転機と畜力利用の和犁の収量に及ぼす影響について岡山、愛知等の各県農業試験場で試験されたが5ヶ年以内の連年継続試験では両者の間に大きな差がなく、それ以上継続する場合は5ヶ年に1回位の割合ですき起した方がよいということが常識的な結論であった。その理由は浅耕になりやすい意味が強かった。このような比較試験には両者の条件を同じにするのが普通であるから前に述べたロータリ・カルチベータは有機物を混ぜ込む場合に効果があるという特性は全く無視されていた欠点がある。

表-10 普通の土壤、輪作条件における作物収量(へら型プラウを100としての関係値)

試験と土壤	へら型プラウ	デスク・プラウ	ロータリプラウ	ロータリカルチ	ティン・カルチ
砂質土ローム	100	91 88.5 77 83	99	73.6	78 (攪土) Sweep
4年間継続					
粘 土	100		108	—	—
腐 植 質	100		—	116.1	—

註：成績の出所は表-1 と同じ