

## 水稻栽培の機械化における土壌物理学的諸問題

安田 与七郎\*

### まえがき

水稻栽培は、我国農業における最も重要な作業であり、これの機械化が目下大いに脚光をあびていることも事実である。最近の専門技術員の農機具部門における研究発表をみて半数以上は水稻の機械化直播栽培に関するものであり、いかに現地において水稻の機械化栽培の確立が緊急を要しているかがうかがわれる。学会における研究発表も水田におけるトラクタの問題が続々と出て来ている<sup>1,2)</sup>。これらにおける共通の問題点は、元來如用として開発されて来た農業機械を水田において、水稻栽培をする際に起る問題点がそれで、例えば水田で、如用輸入トラクタにロータベータをつけて乾田状態にして耕耘し、ドリル(条播機)で稲をまいたら、非常に発芽率が悪かったという報告がある。これなどは明らかに耕耘における土壌の細粒化をおろそかにした結果であり、稲の種子の大きさに比し、ロータベータによって耕耘した土粒子が桁違いに大きくて、覆土した場合は、種子の上に3cm径位の土粒子がかぶさり、他は種子が露出するという結果である。一方ドリルを使用するために要する土壌の細粒化過程はブラウイング、ハローイング、均平、転圧の過程を要し、而も土壌水分は水田を乾田にしただけでは水分が多すぎてロータベータによる一回耕では充分細粒化し得ないのが普通である。水分の多い土壌で何回も土壌面をトラクタで作業上往復することは、走行可能性および土壌の圧密度の問題から好ましくないということがあり、我国水田では極力ロータベータを使用して往復回数を減少させようとするので、以上の如き結果をまねている。更に報告にあるように、我国でも結局は耕盤のある水田でなければトラクタの進入および作業は不能ということであり、中国でもそうである。筆者は耕盤のない場合の機械導入に対しては、土壌の軟化現象を伴う場合にも沈下せず、且つ液体に対する浮力を考慮した様な方式を考え、而も汎用トラクタの附属品としての車輪を試作した<sup>4)</sup>。近時土壌物理学におけるレオロジーの導入があるが、当然考えられるべきは土壌の変形における時間的考察である。即ち土壌が衝撃ないし、振動に対して起す挙動を動力学的に把握することである。機械は元來時間節約を目的とする事、即ち仕事をする速度が大なること

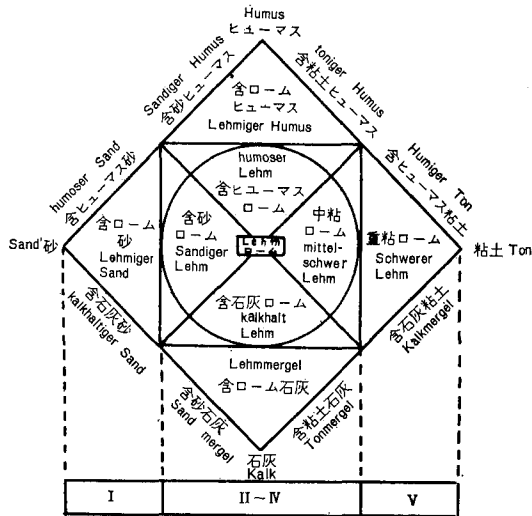
を目的とすることも重要である。機械が土壌に接触するとき、衝撃ないし、振動を土壌に与え、土壌はその反作用として、機械の進入可能性を左右する。土壌の耐震性を問題にした報告は振動締め機を始めとし、筆者も<sup>5,6)</sup> 2,3の報告で機械の起す振動中特にクロウラがローラチェンの伝達切断と同じ作用を有し、それが土に及ぼす状況を或程度解析した。

これらの事を考えると、水田に農業機械を導入させ作業させるには、土壌そのものの計測の再検討は勿論、土壌の分類方法も問題にする必要があると思われる。それで以上のべた事項の解説を行ない、今後の研究の問題点を種々のべ特に接地圧に代る面ばね常数 ( $\text{kg/cm, cm}^2$ ) を提唱した。

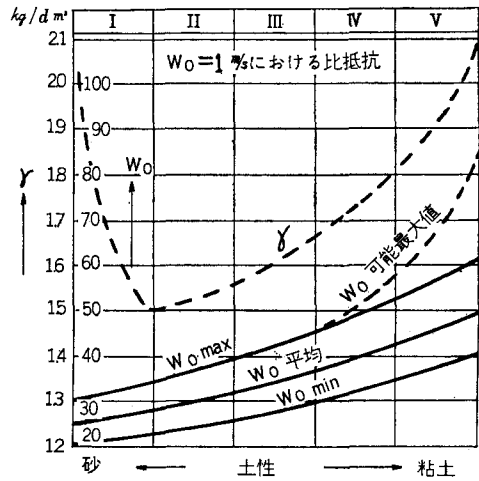
### 1. 土壌分類法

土に関する農業機械が土工機械と異なるのは、作物を生育するベッドを作る機械であることで、作業する土壌が、鋤物粒子と水および空気のみ集まりであっては不充分である。しかるに従来土壌の機械に対する抵抗、支持力を測定する際に基本となる土壌の分類は、粘土、シルト、砂等の鋤物体粒径による種類のものの組合わせによる粒度分析のみが基準とされ、それに水分、空隙が条件として加えられていた。所が土壌の剪断抵抗のみを考慮しても、土粒子間の粘着力、摩擦抵抗の合成される場合は、特に粘着力は、粒子表面に附着する水分に含有される化学的成分によって大いに左右され、それは同時に作物生育に関係ある肥料分にも影響する。即ち農業機械導入乃至作業をさせる土壌の物理的性質をあらわす土壌の分類は、従来砂、シルト、粘土を基盤とするもののみでは不充分で、更に作物生育に関係ある因子、即ち化学成分の関係を附加する必要がある。即ち従来<sup>9)</sup>の三角座標による土壌表示でなく、例えば第1a図のように砂、ヒューマス、石灰、ローム、粘土の主成分からなる5つの土壌グループを示したものは、ドイツの農業機械の土に関する作業機的设计用に用いられる土の分類ある。でこの図と、土の5グループの関係およびその密度  $\gamma \text{kg/dm}^3$ 、摩擦角  $\alpha^\circ$ 、内部摩擦係数  $\mu_1$ 、 $1\text{m/s}$ で作業機を引張ったときの比抵抗  $\text{kg/dm}^2$ は第1表および第1b図に示されている。尚第1a図中円内の部分は作物生育上最良の土壌としており、いわゆる営農耕作の場合に到達すべき土壌を示し

\* 東大農学部



第 1 a 図



第 1 b 図

第 1 表

グループ	土 性		土 壤 主 成 分	評 価*	密 度	摩 擦 角	内部摩擦係数	比 抵 抗	
	呼 称	符 号			$\gamma$	$\alpha$	$\mu_1$	$w_0$ (速度 1m/s)	
					kg/dm <sup>3</sup>	°		kg/dm <sup>2</sup>	
I	leicht 軽 鬆 土	S	砂	Sand	20	1.40	30	0.577	20
		SI	含ヒューマス砂	humoser Sand	~	~	~	~	~
		IS	含ローム砂	lehmiger Sand	30	2.20	40(~45)	0.84	30
II	leicht bis mittelschwer 軽 ~ 中 重 粘 土	IS	ヒューマス	Humus	20	1.50	35	0.70	25
		SL	含砂ヒューマス	sandiger Humus	~	~	~	~	~
			含ロームヒューマス	lehmiger Humus	60	1.60	45	1.00	35
III	mittel schwer 中 重 粘 土	sL	石灰	Kalk	25	1.60	40	0.84	30
			含砂石灰	Sandmergel	~	~	~	~	~
			含ローム石灰	Lehmmergel	~	~	~	~	~
			含粘土石灰	Tonmergel	90	1.75	50	1.20	40(~45)
IV	mittel schwer bis schwer 中 重 粘 土 重 粘 土	L	ローム	Lehm	30	1.75	45	1.00	35
			含砂ローム	sandiger Lehm	~	~	~	~	~
			含ヒューマスローム	humoser Lehm	~	~	~	~	~
			含石灰中粘ローム	kalkhalt. milder Lehm	100	1.90	55	1.43	45(~60)
V	Schwer 重 粘 土	LT	粘 土	Ton	20	1.85	55	1.43	45
		T	含ヒューマス粘土	humoser Ton	~	~	~	~	~
			重粘ローム	schwerer Lehm	80	2.30	65	2.15	65(~80)
			含石灰粘土	kalkhalt. Ton					

\* 第 1 a 図円内を 100 とする。

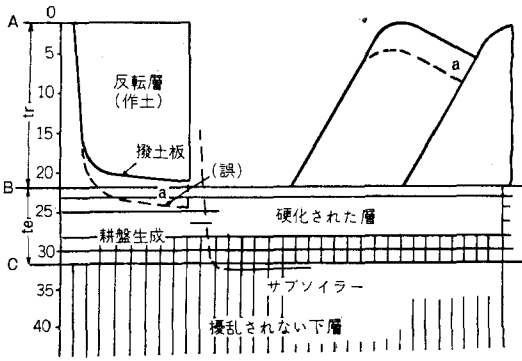
ている。ドイツの用農業機械において既にこの様な土性分類を行なっているのに対し、我国では未だに国際土性分類法の三角図表を用い、あとは極めて個人差の危険の多い判定法を行なっている。殊に水田土<sup>10)</sup>の形態分類は非常に詳細に亘っているが、これらについて第 1 表の如きものを作成することは、現在行なわれている農業機械設計に直ちに有用なものとならう。第 1 表の各数値のもつ設計的意義ならびに計測法については後述する。

## 2. 耕耘作業における問題

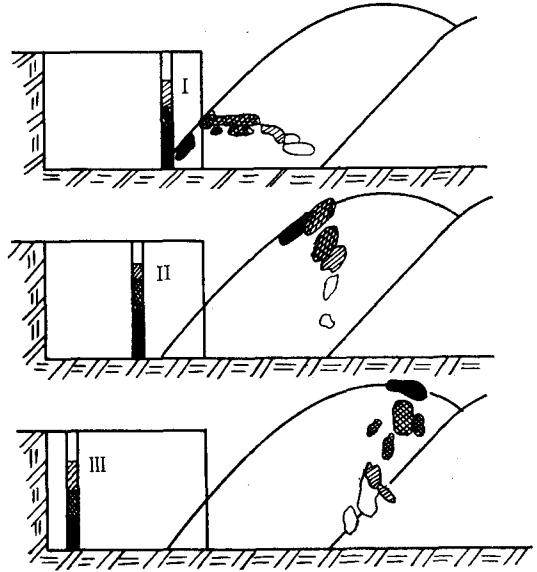
プラウによる作業は、模式的に後方からみると第 2 図<sup>11)</sup>の如くであり、上部からみると第 3 図<sup>12)</sup>の如くなる。第 2 図 AB 間に作土があり実線の撥土板の位置では丁度作土層は右側に反転され、点線 a の撥土板の位置では B 以下の心土を耕起するので正しい耕耘ができないことを示している。BC 間は耕盤が出来硬化された層を示す。従ってサブソイラで数年に 1 回耕盤を起すのは C 以下にサ

ブソイラの撥土板が来なくてはならない。C以下は攪乱されない層である。第3図はプラウを固定し土が $v_0$ で動いていると考えた時の平面図でプラウにより土が横に移動するためプラウ上の速度は減少し、その際土は圧密され、進行方向に対して約45°の方向の剪断面に亀裂を生じ、それがプラウをすぎると、進行方向の速度が $v_0$ になるために亀裂面で土は間隔を拡げる。第4図は亀裂部の詳細を

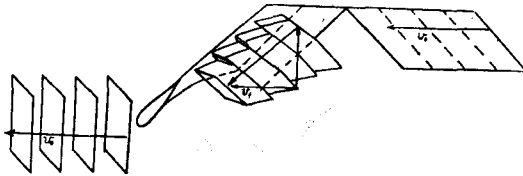
示す。即ち土は反転すると同時に進行方向に一度縮んで後再びのびる。その際土質あるいは水分により、亀裂が入った場合は間隔が開く。第5図および第6図はプラウによる土の移動状況を更に詳細にしらべたもので、第5図は第2図の如くプラウ進行の後ろよりみた図で、第6図は第3図の如く平面図である。両図のI、IIおよびIIIの



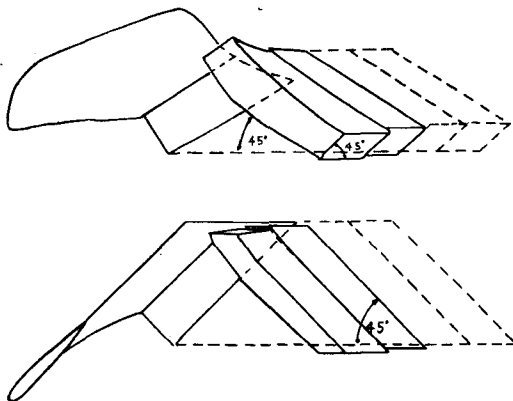
第 2 図



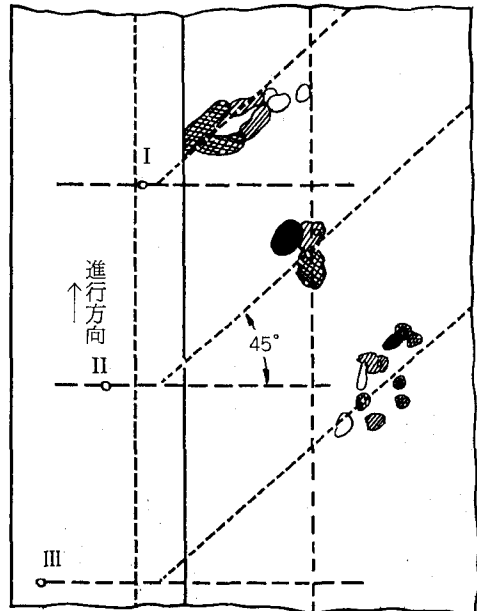
第 5 図



第 3 図



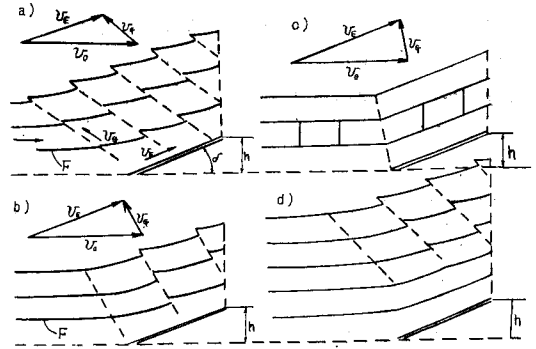
第 4 図



第 6 図

所にあらかじめ穴を掘り、その部分に色分けした土をつめこんで、耕耘後の移動をしらべた。その移動状況は I 即ちプラウの既耕面側では上部が右前に移動して上下反転なく、II 即ち中央部では上下反転して左右、前後の相対的移動なく、III のランドサイド側では上下反転して下部が右方および前方へ更に投てきされている。I, II, III とも進行方向に 45° の傾きをなしている。したがって第 7 図<sup>15)</sup>の如く、元の断面 F に対し、進行方向に直角な断面で 31% 増、進行方向に 45° の断面において 83% も増している。即ちプラウ自身、反転のみならず破砕膨軟化作用を有している。プラウ耕に際しての土壤の三相(固相, 液相, 気相)の変化は第 8 図<sup>16)</sup>の如くであり、第 2 図の B-C 間に耕盤の出来る状況が定量的に示されている。プラウ耕時、土の圧密により剪断面を生ずる状況は土

質、水分および圧密度により異なることをしめしたのが第 9 図<sup>17)</sup>で、土壤槽において、 $\delta$  だけ傾き、上辺の高さ  $h$  の板を動かして、亀裂の出来具合を示した。



第 9 図

図では板を固定し、土壤が移動するように書いてある。

- a) は緊密につめられた水分の多くない砂
- b) は細砂を含んだロームの水分が適當のもの
- c) は湿潤な、プラスチック変形可能な土
- d) は緊密につめられた水分の多くない砂の厚い層である。

剪断面の間隔の精度は  $\pm 50\%$  位である。図中 F は土中の面に色分けした部分である。 $v_0$  は傾斜面に対する土の速度、 $v_E$  は土壤の傾斜面に沿っての相対速度、 $v_G$  は剪断面にそつ土の相対速度である。即ち水田土壤のような場合は b あるいは c の如くなること分る。

### 3. プラウ耕における土の剪断の解析<sup>19)</sup>

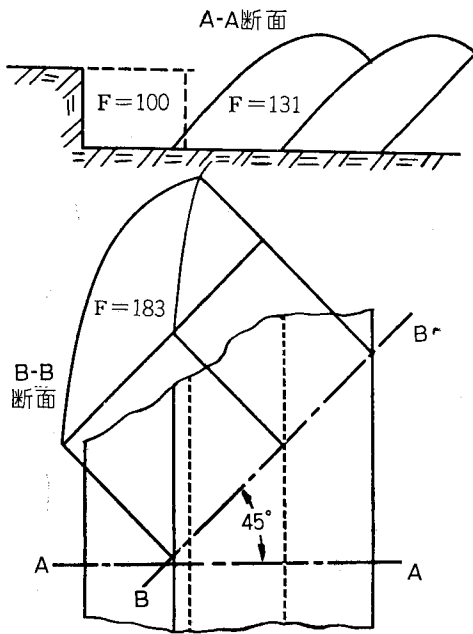
以上の観察の如く、プラウ耕における土の破砕は、剪断によることが解つた。即ち土の粘着力より剪断応力が大きくなつたためであつて、純張力が働いたと考えるべきではない。尚この剪断応力は、直接の剪断歪あるいは捩れ歪からのみならず圧力歪もこれに関与している。即ちモール円における圧応力の異なる場合には必ず剪断応力が生ずるからである。剪断に際し剪断面を生じ、壔土が寸断されることになる。プラウは前述の如く土に対して進行速度を変えることにより、圧力歪<sup>18)</sup>→剪断→剪断面の造成→破砕されるのであつて、木谷の如く振動式によらなくともプラウを離れるときに破砕面による土の分離が行なわれる。

破砕時の剪断力  $\tau_B$  は粘着力の他に垂直力に比例する摩擦力を加えた値である。

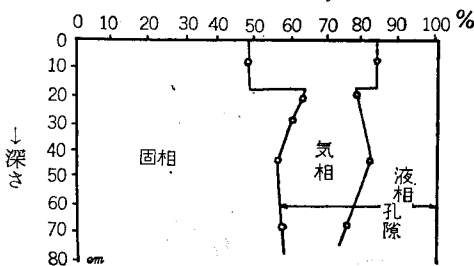
即ち

$$\tau_B = c + \mu \sigma_d \dots \dots \dots (1)$$

c : 粘着係数 kg/cm<sup>2</sup>



第 7 図



第 8 図

$\mu$  : 摩擦係数

$\sigma_d$  : 剪断面における垂直応力  $\text{kg/cm}^2$

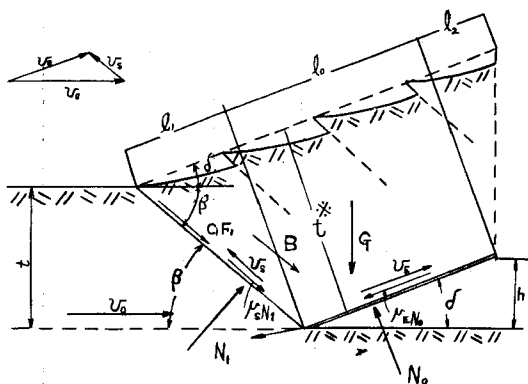
剪断面積  $F$  に対し、剪断力  $T_{\max}$  は

$$T_{\max} = cF + \mu\sigma_d F = cF + \mu N \dots\dots\dots (2)$$

$N$  : 剪断面の垂直力

摩擦力に対抗する仕事は損失仕事である。

傾斜板の土壌槽における切断の場合は第10図において



第 10 図

$G$  : 傾斜板をすべる土の重量

$N_0$  : 傾斜板が土  $G$  に及ぼす垂直力

$\mu_E$  : 同上  $N_0$  による土と傾斜板の摩擦係数  
(砂の場合=0.45)

$F_1$  : 剪断面積

$N_1$  :  $F_1$  に働く垂直力

$\mu_s$  : 同上  $N_1$  による土同志の摩擦係数  
(砂の場合=0.70)

$c$  : 土の粘着係数

$B$  : 剪断が  $F_1$  にそっておきたときの加速抵抗

垂直方向の力の平衡により

$$G - N_0(\cos\delta - \mu_E \sin\delta) - N_1(\cos\beta - \mu_s \sin\beta) + (cF_1 + B)\sin\beta = 0 \dots\dots\dots (3)$$

水平方向は

$$N_0(\sin\delta + \mu_E \cos\delta) - N_1(\sin\beta + \mu_s \cos\beta) - (cF_1 + B)\cos\beta = 0 \dots\dots\dots (4)$$

傾斜板の水平切断抵抗は

$$W = N_0(\sin\delta + \mu_E \cos\delta) + k_b \dots\dots\dots (5)$$

茲に  $k_b$  は傾斜板ないしプラウの犁先が土を切りわけるに要する抵抗。根の張っている土塊とか石礫の入った土壌以外は  $k_b$  の値は小さい。以下は

$$W^* = W - k_b \dots\dots\dots (6)$$

即ち  $k_b$  を引いた値を計算する。

(5)より  $N_0$  は

$$N_0 = \frac{W^*}{\sin\delta + \mu_E \cos\delta} \dots\dots\dots (7)$$

$N_1$  は(4)と(5)、(6)から

$$W^* - N_1(\sin\beta + \mu_s \cos\beta) - (cF_1 + B)\cos\beta = 0$$

$$N_1 = \frac{W^* - (cF_1 + B)\cos\beta}{\sin\beta + \mu_s \cos\beta} \dots\dots\dots (8)$$

(7)、(8)を(3)に代入して

$$G - W^* \frac{\cos\delta - \mu_E \sin\delta}{\sin\delta + \mu_E \cos\delta} - [(W^* - (cF_1 + B)\cos\beta) \times \frac{\cos\beta - \mu_s \sin\beta}{\sin\beta + \mu_s \cos\beta} + (cF_1 + B)\sin\beta] = 0 \dots\dots\dots (9)$$

$$\therefore W^* \left( \frac{\cos\beta - \mu_E \sin\beta}{\sin\beta + \mu_E \cos\beta} + \frac{\cos\beta - \mu_s \sin\beta}{\sin\beta + \mu_s \cos\beta} \right) = G + \frac{cF_1 + B}{\sin\beta + \mu_s \cos\beta} \dots\dots\dots (10)$$

$$\zeta = \frac{(1 - \mu_E \mu_s) \sin(\delta + \beta) + (\mu_E + \mu_s) \cos(\delta + \beta)}{(\sin\delta + \mu_E \cos\delta) (\sin\beta + \mu_s \cos\beta)} \dots\dots\dots (11)$$

とすると

$$W^* = \frac{G}{\zeta} + \frac{cF_1 + B}{\zeta(\sin\beta + \mu_s \cos\beta)} \dots\dots\dots (12)$$

傾斜板の巾を  $b$  とすると、土  $G$  の重量は

$$G = \gamma b t^* \left( l_0 + \frac{l_1 + l_2}{2} \right)$$

$$t^* = t \frac{\sin(\delta + \beta)}{\sin\beta}$$

$$l_1 = t \frac{\cos(\delta + \beta)}{\sin\beta}$$

$$l_2 = t^* \tan\delta = t \frac{\sin(\delta + \beta) \tan\delta}{\sin\beta}$$

$$\therefore G = \gamma b t \frac{\sin(\delta + \beta)}{\sin\delta} \left[ l_0 + t \frac{\cos(\delta + \beta) + \sin(\delta + \beta) \tan\delta}{2 \sin\beta} \right] \dots\dots\dots (13)$$

$$= \gamma b t \left[ l_0 \frac{\sin(\delta + \beta)}{\sin\delta} + t \frac{\sin 2(\delta + \beta) + 2 \sin^2(\delta + \beta) \tan\delta}{4 \sin^2\beta} \right] \dots\dots\dots (14)$$

茲に  $\gamma$  : 土の密度

$t$  : 壙の深さ

$l_0$  : 傾斜板の長さ

$v_0$  : 進行速度

傾斜板の面積  $F_0$  は

$$F_0 = b l_0 = \frac{b h}{\sin\delta} \dots\dots\dots (15)$$

土の剪断面積  $F_1$  は

$$F_1 = \frac{b t}{\sin\beta} \dots\dots\dots (16)$$

粘着係数  $c$  は土質、圧密度、水分によって異なり剪断試験により求められる。

加速抵抗は、単位時間に傾斜面にある土の質量に加速度を掛けて求まる。この際加速仕事はこの周期的な過程を連続的なものとおきかえても本質的に変化はない。

平均加速抵抗は

$$B = m \frac{dv}{d\tau}$$

時間  $\tau$  の間に加速されるべき土の質量  $m$  は

$$m = \frac{\gamma}{g} bt v_0 \tau$$

この質量は速度  $v_s$  を得る。加速度は

$$\frac{dv}{d\tau} = \frac{v_s}{\tau}$$

故に  $B = \frac{\gamma}{g} bt v_0 v_s$

再び第10図より

$$\begin{aligned} v_0 &= v_E \cos \delta + v_s \cos \beta \\ v_E \sin \delta &= v_s \sin \beta \\ v_s &= v_0 \frac{\sin \delta}{\sin(\delta + \beta)} \end{aligned} \quad (17)$$

故に  $B = \frac{\gamma}{g} bt v_0^2 \frac{\sin \delta}{\sin(\delta + \beta)}$  (18)

剪断抵抗の分解

(12)により剪断抵抗は次の如く分解される。

1) 土を持ち上げるための分力  $W_H$  および  $W_{RH}$  によりひき起される傾斜板上への摩擦および剪断面における土壤同志の摩擦  $W_{RH}$

2) 粘着力に対抗する分力  $W_C$  および粘着力により起る摩擦  $W_{RC}$

3) 加速抵抗による分力  $W_B$  および加速抵抗により起る摩擦  $W_{RB}$

1)に対しては

$$W_H = \frac{G}{\frac{\cos \delta}{\sin \delta} + \frac{\cos \beta}{\sin \beta}} = \frac{G}{\cot \delta + \cot \beta} \quad (19)$$

又  $W_H + W_{RH} = \frac{G}{\zeta} \quad (20)$

$$W_{RH} = \left( -\frac{1}{\zeta} - \frac{1}{\cot \delta + \cot \beta} \right) \quad (21)$$

2)については

$$\begin{aligned} W_C &= \frac{cF_1}{\sin \beta \left( \frac{\cos \delta}{\sin \delta} + \frac{\cos \beta}{\sin \beta} \right)} \\ &= cF_1 \frac{\sin \delta}{\sin(\delta + \beta)} \end{aligned} \quad (22)$$

$$W_{RC} = cF_1 \left( \frac{1}{(\sin \beta + \mu_s \cos \beta) \zeta} - \frac{\sin \delta}{\sin(\delta + \beta)} \right) \quad (23)$$

3)については

$$W_B = B \frac{\sin \delta}{\sin(\delta + \beta)} \quad (24)$$

$$W_{RB} = B \left( \frac{1}{(\sin \beta + \mu_s \cos \beta) \zeta} - \frac{\sin \delta}{\sin(\delta + \beta)} \right) \quad (25)$$

耕深10cm(=t),  $v_0=1$ m/s,  $\delta=20^\circ$ ,  $h=5$ cm,  $b=10$ cm  
あたり砂の場合は測定値とよく一致して  $W^*=6.8$ kg で

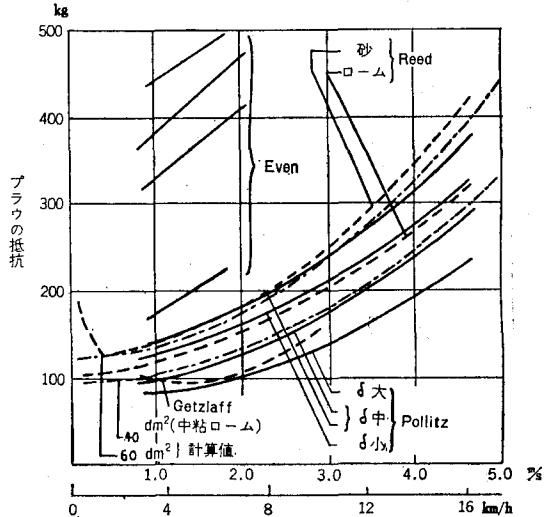
$$W_H=16\% \quad W_{RH}=38\%$$

$$W_B=4\% \quad W_{RB}=3\%$$

$$W_C=20\% \quad W_{RC}=10\%$$

と摩擦の大なることがわかる。

第11図には<sup>20)</sup>プラウの牽引抵抗を色々な人が測定したものを横軸を牽引速度にしてあらわしたものである。一点



第 11 図

鎖線の曲線2本の中、下の1本は牽引方向への斜断断面40 dm<sup>2</sup>、上の1本は同じく60dm<sup>2</sup>とした場合の計算値である。上述の計算式の中  $W_B$  および  $W_{RB}$  即ち土の切断抵抗中の加速抵抗およびそれに引起される摩擦抵抗は、速度の自乗に比例し、加速抵抗に影響する成分は土性に関しては殆んどなく、特に粘性係数に関係なく、密度のみに関係する。これによって作られた2つの切断抵抗曲線が、殆んど全部の実測値をはきんでいることは、速度変化に対して、加速抵抗分の影響が非常に大であり、少なくともプラウの抵抗は速度に関し計算的に予測しうるといえよう。

従って今後プラウ速度を上げるときに、牽引抵抗を少なくするためには、加速抵抗に関する部分を減少させるとよいということが云える。従って高速用プラウの攪土板の上縁と進行方向とのなす角を少なくしたり、砂質土用の  $\delta$  の大きい(急峻型)プラウも、 $\delta$  を小さくすることが予測出来、実績も上っている。<sup>21)</sup>

第11図ではプラウの牽引抵抗についてのべ、以前は傾斜板の切断抵抗で解析し、単位面積あたり即ち比抵抗の形で表現していた。プラウの場合の比抵抗を  $\omega$  とすれば、それと牽引力  $Z_0$  の間には

$$Z_0 = \omega \times t_n \times b_n \quad (27)$$

$t_n$ : 耕深

$b_n$ : 耕巾

なる関係がある。而して Schilling<sup>22)</sup> は牽引速度  $v_r=1\text{m/s}$  の場合の比抵抗を  $\omega_0$  とした場合

$$\omega = \omega_0 \sqrt{v_r} \dots\dots\dots (28)$$

$v_r$  は牽引速度で  $v_r > 1$  のときの実験式としている。これでは第11図と合っていない。而も彼はその直前に、流動体の速度圧の如き考えて

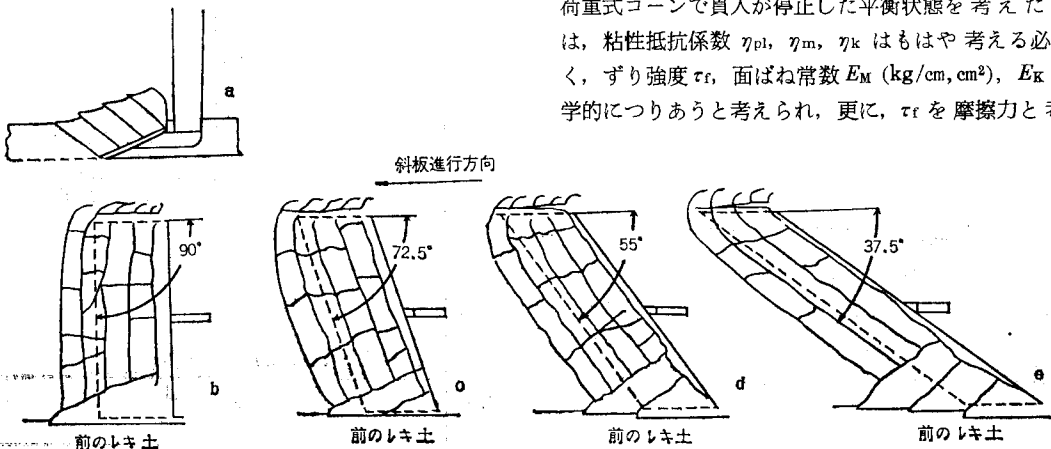
$$\omega = f \left( \frac{v_r^2}{2g} \cdot \gamma \right) \dots\dots\dots (29)$$

$\gamma$ : 土の密度  
 $g$ : 重力加速度

の式をあげている。第11図および前述の解析からすれば、むしろこの式の方が穏当であろう。

上述の解析にしても、加速力の計算を連続的に行なったことは亀裂が出来て不連続を生ずる場合に対して問題があり、解析は振れを考慮していないが、プラウでは振れている点でも今後の改訂を要する。

プラウにおける亀裂の方向が、プラウの進行方向に約  $45^\circ$  であり、傾斜板牽引における亀裂の方向が進行方向に直角であることとの関連性については、第12図<sup>23)</sup>の実験がある。即ち第12図 a, b は従来と同じであるが、傾斜板の進行方向左側には前の壘土が残って居り、即ち左側には土はあふれないようになっている。(以下同様)、この結果進行方向には直角の亀裂の他に進行方向と約  $30^\circ$  をなす亀裂が左から生じ、右へ行くにしたがい、進行方向に平行の亀裂が生じている。傾斜板の向きを c では  $72.5^\circ$ , d,  $55^\circ$ , e,  $37.5^\circ$  とかえると後の亀裂の角度は  $45^\circ$  へ近づき、始めの亀裂は傾斜板の線と平行になる。



第 12 図

プラウの犁先の切断部の進行方向となす角は  $45^\circ$  より小さいから、プラウの亀裂は第12図 e の如きものと似ているとすれば、プラウでも犁先に平行な亀裂がある筈で、これは既に Nicols<sup>24)</sup> が1934年に撮影している。Söhne は進行方向と  $45^\circ$  の亀裂を第1、犁先に平行のを第2亀裂とっている。

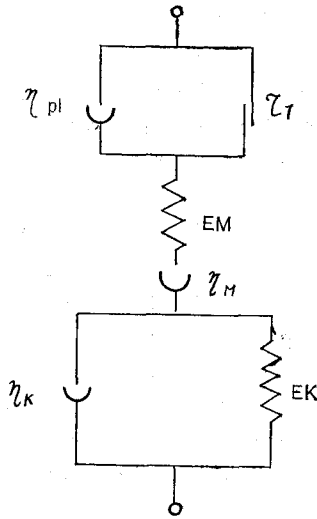
水田の場合は水分が多いので亀裂の間隔が長い、矢張り根本的にはこの現象はおこっている。

何れにしてもプラウで土壌が振られ乍ら圧密され、その際の剪断応力が粘着力に打ちかかって亀裂を生ずる以上、土がプラウ面を上るときの  $\delta$  の変化に応じた圧密度、それに対する剪断応力の試験が必要である。

即ち亀裂も考慮に入れたプラウイングの解析に必要な土壌物理学的値は比抵抗の他に粘着係数、内部摩擦角が必要となり、三軸剪断試験が必要となる。然も現地用のものが、非攪乱試料で作られることが急務であろう。

4) トラクタのトラフィカビリティと牽引力発生機構  
 トラクタのトラフィカビリティに関する計測ないし判定には大別して2つある。1つはコーンインデックスを基本とする Vicksburg 法なる車輛の通行可能性指数を求める方法で、他は Söhne や Bekker の平板式計測を基準とする方法である。前者はコーン penetrometer を使用するのであるが、この測定値の整理の仕方には、山中式のコーンを土中に押しこんだ場合の単位体積あたりの力 ( $\text{kg/cm}^3$ ) というあらゆる方法と、貫入部単位断面あたりの力 ( $\text{kg/cm}^2$ ) であらわす2方法があり、後者が圧倒的に多く用いられている。その理由は支持力と相関させるに単位面積あたりの方が考え易いからであろう。筆者は須藤、東山の論文<sup>25)</sup>から、次の計算をやってみた。

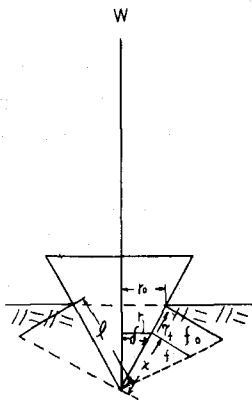
土壌のレオロジカルな模型を第13図<sup>26)</sup>の如く考え、定荷重式コーンで貫入が停止した平衡状態を考えた場合は、粘性抵抗係数  $\eta_{pl}$ ,  $\eta_m$ ,  $\eta_k$  はもはや考える必要なく、ずり強度  $\tau_r$ , 面ばね常数  $E_M$  ( $\text{kg/cm, cm}^2$ ),  $E_K$  で力学的につりあうと考えられ、更に、 $\tau_r$  を摩擦力と考え



第 13 図

$E_M, E_K$  を一つの線型面ばね常数  $K$  (kg/cm, cm<sup>2</sup>) とおきかえてみる。茲に面ばね常数とは単位面積あたり、単位偏位あたりの力というみである。

第14図において、先端角  $2\delta$  のコーンに荷重  $W$  をかけ、半径  $r_0$  の処で平衡した場合、従来のコーン指数は、面圧



第 14 図

式では

$$q_c = \frac{W}{\pi r_0^2} \dots \dots \dots (30)$$

であった。今コーンにより土が横方向のみに排除されたと仮定すると、コーン先端部の土圧は0で、半径  $r_0$  の所の土圧  $f_0$  まで直線的に変化する。先端からコーン母線に沿って測った  $x$  の所の土圧を  $f$  とすれば、次式をうる。

$$\int_0^l 2\pi r f \sin \delta dx + \int_0^l 2\pi r \mu_E f c s dx = W \dots \dots \dots (31)$$

茲に  $l$  は  $r_0$  迄の母線長さで、 $\mu_E$  は土とコーンとの摩擦係数である。

しかるに

$$f = f_0 \frac{x}{l} = Kr = Kr_0 \frac{x}{l} = Kx \sin \delta \dots \dots \dots (32)$$

ここに  $K$  は縮み量  $r = r_0 \frac{x}{l}$  に対し面に直角に単位面積あたり出てくる抵抗で上に言う面ばね常数(kg/cm, cm<sup>2</sup>)である。 $f$  が  $r$  の方向と  $\delta$  だけ傾くことに関しては大いに問題がある。したがって  $K$  は  $\delta$  により変る可能性がある。

$$\int_0^l 2\pi K x^2 \sin^3 \delta dx + \int_0^l 2\pi \mu_E K x^2 \sin^2 \delta \cos \delta dx = W \dots \dots \dots (32)$$

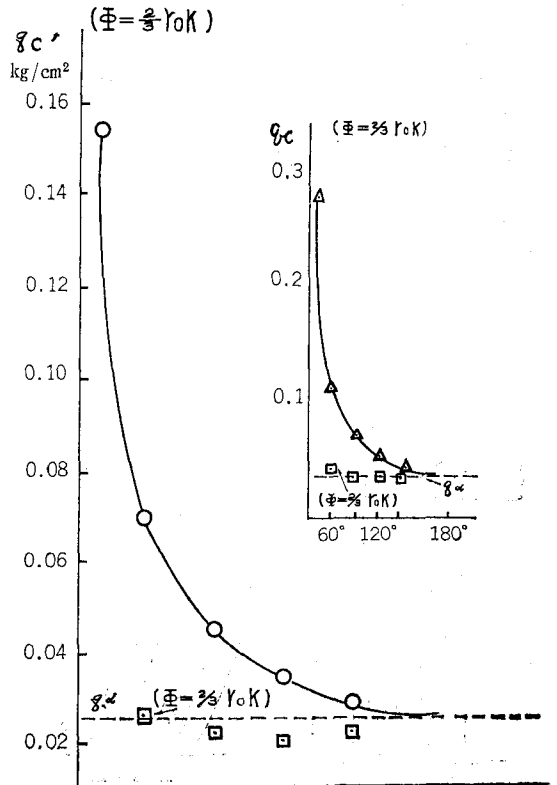
$$\therefore \frac{2}{3} \pi K l^3 \sin^3 \delta + \frac{2}{3} \mu_E \pi K l^3 \sin^2 \delta \cos \delta = W$$

$$\therefore \frac{2}{3} \pi K r_0^3 + \frac{2}{3} \mu_E \pi K r_0^3 \cot \delta = W$$

$$\frac{2}{3} r_0 K \pi r_0^2 (1 + \mu_E \cot \delta) = W$$

$$\therefore \phi = \frac{2}{3} r_0 K = \frac{W}{\pi r_0^2} \frac{1}{1 + \mu_E \cot \delta}$$

$$\therefore \phi = \frac{2}{3} r_0 K = q_c \frac{1}{1 + \mu_E \cot \delta} \dots \dots \dots (33)$$



第 15 図



即ち  $\Phi = \text{綜合面ばね常数} \times \frac{2}{3} r_0$  は従来のコーン指数に (33) の如き補正をすれば得られる。須藤、東山は  $\delta$  により  $q_c$  が大巾に変わる第15図を示したが、 $\mu_E = 0.45$  とすると、 $\Phi$  の値は図のように直線に近くなった。これは  $\cot \delta = 0$  即ち  $\delta = 90^\circ$  即ち、円板のことを考えると、(33)式より

$$\frac{2}{3} r_0 K = \frac{W}{\pi r_0^2} \quad \therefore \quad K = \frac{W}{\frac{3}{2} \pi r_0^3}$$

となり、半径  $r_0$  の円板の面ばね常数は荷重を円板下の土の半球の体積で割ったものになる。計測的にはばねの歪と、先端の円板面積で、ばねの円板下に出来る歪力を割ったものである。

円板下に出来るクルジュモフ核は三角錐であるので、以上の考え方は単純すぎる事がわかるし、(33)式で  $K$  や  $\mu_E$  が  $\delta$  により違うことも問題であるが、地盤の支持力としての接地圧は押された面が(沈下)歪を起こして始めて抵抗力を発生するという考え方に立つならば、面ばね常数の考えで円板測定は妥当であろう。但し、ズリ強度等面積に関係ある因子が入ってくるために  $\Phi$  の如く  $\text{kg/cm}^2$  のディメンションのものが一定値を示すのかも知れない。等圧面等の精密な解析が必要であろう。

Vicksburg 法やその流れをくむ柄付コーンによるコーン全体貫入の場合、柄にばねをつけて沈下量対ばね歪荷重を現わした場合は、更に問題がある。特に沈下量とばね荷重を自記させ、徐々に沈下量を増す場合は、動的抵抗を示し、土の模型の内の粘性抵抗がきいてくる。極端に遅くするか、2つの異なった速度で貫入して、速度の影響を算出すべきであろう。更に柄の摩擦と、土の深さによる土圧の増加を分離しなければならない。

牽引力発生機構も、従来は偏位型スリップ対牽引力を主としていたが、これは相対変位による剪断力より来るものである。しかし、土の模型に粘性抵抗係数のある以上、上述のペネトロメータの沈下速度の問題と同じく、速度により抵抗が生ずる筈で、筆者は前に現象の説明としてスリップに速度型を用いたが、粘性抵抗係数による抵抗も牽引力に役立つ場合も軟弱地では考えられるので、速度型スリップ対牽引力ということは物理的意味を有して来た。今後その定量化を行なうつもりである。この考え方で泥上車<sup>4)</sup>は作られたのであるが、極端に粘性のみの場合即ち液体即ち水の場合は簡単で、浮力のついた車輪と、その先につけた水かきで、水をかく速度により、推進力を得た。しかしヘドロの如く、一見固体のようにみえて、軟化現象をおこすものは、水をかいた処に泥がつまり、車軸迄沈んで、非常に遅く(時速20m位)

なる。沈下防止板をつけ、更に泥かきをつけて漸く直進し得た。

現在の処、耕盤のない水田では、上記の方法が浮力をもつクローラにラグの長いものをつけたものしか出来ないが、水田の場合は耕盤があつたり無かつたりむらの処とか、表面乾燥していて、下が軟いときには沈下防止板がさわると摩擦抵抗が非常に大きくなったり、更にあまり大きなものは入れない筈で、目下の処耕盤の出来ている処のみにトラクタ進入しうるといことの方が無難である。唯陸曳耕法ならば表面のみ硬くてもブラウイング可能である。

中国でも18cm以上の厚さの耕盤のある処ではゴムタイヤのラグを12~3cmにして35PSのドラフトコントロールのついたトラクタが出来ている。このトラクタは何回も圃場に入らぬようにハローイングもディスクと、ロータリーとスパイク籠型と3種類を一度にひき、そのあとに均平板もつけて、いわゆる Minimum tillage を行なっている。

### 5) 結 論

現在の処、水田では耕盤のある処を対象として機械化がすすみ、後の作業機との関連もあって、水田用ロータベータの細粒のもの開発が、ブラウハロー引で Minimum tillage 的に多くの作業機を同時に装置して、多数回水田に入らぬような方法で作業することが主となっている。一方耕盤のない処でも進入出来る作業方法、足廻りの開発、トラフィックビリティや牽引力発生機構の理論的、実験的研究が各人より行なわれている。

以上極めて精粗不同に現状をのべたが、常に自然の動物、人間が水→泥→陸と上って来たり、水田で作業するときの機構をよく観察し、能率を調べ、理論化しつつ、機械と比較して開発研究の参考にすることは、最も大切なことの1つであると思う。

その際、土壌の物理性を現わすばね常数に対し、単位面積あたり、単位歪あたりの力、即ち面ばね常数を提唱した。

### 引 用 文 献

- 1) 田中：軟弱地でのトラクタ通行可否判断に対する基準の確立 農機誌 25/4
- 2) 田中他：水田におけるトラクタ性能判定に関する研究 1~8 農機誌 25/4, 26/3, 27/3, 27/4, 28/1
- 3) 渋谷：機械利用を中心とした水稻集団乾田直播の成績と問題点 千葉農
- 4) 安田：泥上車の研究 農土誌 1965 33/8, 38~41
- 5) Erlenbach : Ein steuerfähiger, selbstbeweglicher Schwingungsverdichter, DIE B autechnik Heft 11. 1953 1~3
- 6) Lorenz : GRUNDBAU DYNAMIK 1960.

- 7) 安田：理論トラクタ工学 1963. 152, 182, 196頁
- 8) 安田：重機械導入による軟弱地盤の振動による沈下と足廻りの関係の検討 農土研 1963 31/3 22~25
- 9) Schilling：Landmaschinen 2. Band 1953. S. 11 Bild 6/II
- 10) 農林省振興局研究部監修：新撰土壌肥料全編 99頁~112頁 1966
- 11) Schilling Landmaschinen 2. Bd. 1963 S. 5 Bild 1/II
- 12) Söhne：Grundlagen für eine Landtechnische Bodenmechanik, Grdln. d. Landtechnik Heft 7/1956 S. 20 Bild 25
- 13) 同前 S.19 Bild 21
- 14) " S.19 Bild 22
- 15) " S.20 Bild 23
- 16) Söhne：Das mechanische Verhalten des Ackerbodens bei Belastungen, unter rollenden Rüdern sowie bei der Bodenbearbeitung Grdlnad, Landtechnik Heft 1/1951 S. 87 Bild 1.
- 17) 12)と同じ, S.13 Bild 1~4
- 18) 木谷：各種耕耘装置比較のための基礎的研究(第9報) 農機誌 27/3, 1965 162
- 19) 12)と同じ, S.13~27
- Söhne：Grundlagen für Landtechnische Bodenmechanik Grdln d. Landtechnik Heft 7/1956 S. 21, Bild 26
- 20) 12)と同じ, S.21 Bild 26
- 21) Söhne：Pflugkörperformen bei erhöhter Fahrgeschwindigkeit Grdln. d. Landtechnik Heft 11/1959, S. 22~39
- 22) Schilling：Landmaschinen 2. B S. 13
- 23) 12)と同じ S.17. Bild 15
- 24) 12)と同じ S.20, Bild 24
- 25) 須藤，東山コーン支持力の意義：昭和40年度八郎濱中央干拓地における耕地条件整備計画に関する報告書 154~162
- 26) 同上：155頁図 IV-15
- 27) 同上：P.157
- 28) Söhne：Kraftübertragung zwischen Schlepperreifen und Ackerboden, Grdln. d. Landtechn. Heft 3/1952 S. 86 Bild 28.
- 29) 土井，安田：ホイルトラクタにおけるすべりと振動現象：農機誌 27巻2号 1965 P. 74