

碎土用ディスクブレードの動特性に関する研究

南部 悟・宮本啓二・松田清明・高橋哲雄

(常広畜産大学農業作業機械学教室)

1973年11月30日受理

Studies on Dynamic Properties of Disk-Harrow Blades

Satoru NAMBU*, Keiji MIYAMOTO*, Kiyooki MATSUDA*
and Tetsuo TAKAHASHI*

I. 緒 言

わが国における円板ハローの普及はトラクタの急速な増加にともなって広く伸び、プラウの後作業用としてきわめて一般化した機械となっている。しかし、播種床準備にトラクタの利用回数が重なると、せつかく耕起した土壌が再び圧縮され、特に円板ハローのかけすぎは地表ではそれほどでもないが、表土下層がきわめて踏圧されやすい。この点に関してはすでに調査報告¹⁾されている。円板ハローの力学的研究は1940年頃から始められ、その後ディスクブレードはアメリカやドイツで ASAE や DIN により規格化された。本研究は改めて碎土用ディスクブレードの基礎的動特性を求め、火山灰地での特性を実験的に見出そうとするものである。

II. ディスクブレードの特性に関する研究経過

ディスクブレードの力学的研究はアメリカにおいて1939年および1941年に、A. W. CLYDE および E. D. GORDON が Tillage Meter を利用して発表している。すなわち、垂直方向力と進行方向力、垂直方向力と側方力との関係、作業速度と3方向力の関係、円板のくぼみの大小、直径の大小、円刃と花型刃の比較等について明らかにした。その後、1956年には W. F. MCCREEY と M. L. NICHOLS が円板角と貫入深、花型刃の特性について発表した。この円板角の問題については1950年に北海道大学で常松・岡村・小野によって実験的に証明された。ドイツでは1959年に G. GETZLAFF と W. SHÖNE がディスクプラウのブレードに作用する合力に関する詳細な研究を報告している。

近年はいわゆるソイルビンによる研究へと移っているが、わが国での研究の歴史は日も浅く、モデル実験においてすらきわめて事例は少ない。ことにディスクブレードの実験例はほとんど見られない。

* Department of Agricultural Engineering, Obihiro Zootechnical University, Obihiro, Hokkaido, Japan.

III. 分力測定装置と土壌反作用の数値解析

円板が土壌中を進行するとき反力が生じ、3方向となってフレームが変形しようとする。このときの力を力量計で計測し、力の方向をも求めることができる。この方法による研究は40年前にドイツの G. KÜHNE (1928) が Landmaschinen Technik⁵⁾ に述べている。この力量計はオイルによる圧力をブルドン管式圧力計で読みとったもので、1950年代までアメリカでも利用していた。その後、ストレンゲージの開発にともない、1960年代には農業試験場、東京大学、三重大学、北海道大学等で簡便な力量計を開発して実用化へと進めている。

1. 試作分力測定装置の構造

本装置に必要な事項として (1) 分力の合成とモーメントの算出が容易で精度が高く、分力相互の干渉が小さいこと、(2) 円板の着脱が容易で円板角、耕深、耕幅の調節ができること、(3) トラクタの3点ヒッチへの装着が可能で、レール上を安定した状態で走行できること、(4) スtrenメータ、オシログラフ等の積載が可能なることを考慮した。

1) 力量計 (図-1)

力量計の構造は断面が 16×16 mm の方形で、力点から支点までの距離を 40 mm とする軟鋼製片持りを4個使用した。力点には玉軸受 (6202) を付し、その周辺に直交する4個の玉軸受 (6201) と点接触している。歪量は荷重 100 kg に対して $+626 \sim 667 \mu$ 、 $-637 \sim 664 \mu$ という範囲を示した。

この力量計の理論歪量は4ゲージ法であるから次式で示される。

$$\varepsilon = \frac{24 \cdot W \cdot l}{E \cdot b \cdot h^2}$$

ただし、 W = 荷重 100 kg、 l = 力点とゲージ貼付中心距離 22.5 mm、 E = ヤング率、軟鋼材では 2.1×10^4 kg/mm²、 b = 幅 16 mm、 h = 高さ 16 mm であるから、

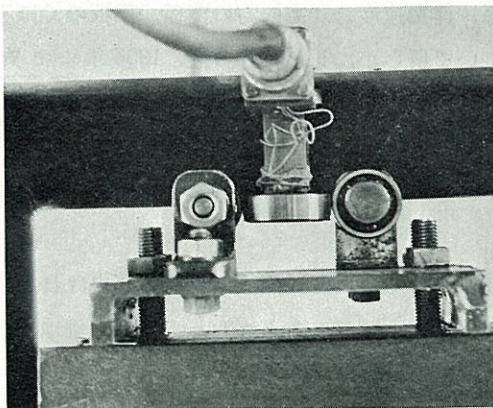


図-1 力量計 (一方向用)

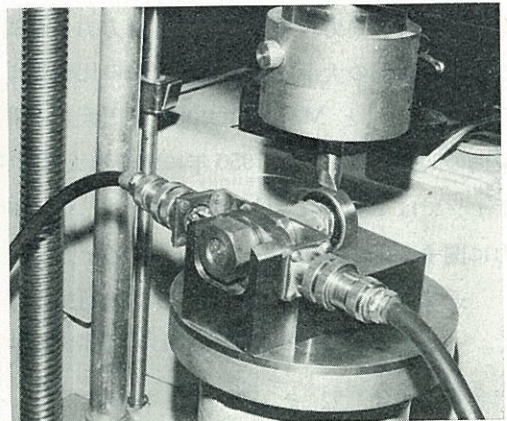


図-2 力量計の較正

$$\varepsilon = \frac{24 \times 100 \times 22.5}{2.1 \times 10^4 \times 16 \times 16^2} = 628 \times 10^{-6}$$

実際には最大容量 100 kg の万能引張試験機によって校正した (図-2)。

4 個のうち、前方左右の力量計はそれぞれ進行方向力と垂直方向力とが同時に検出できるようにになっていて、それぞれ $L_1 V_1$ および $L_2 V_2$ が求められる。その相互干渉の値は最大値で 2% 以下であり、+- 方向での差はなかった。

2) 分力測定装置

フレームの構造は図-3 のように、50 mm の山形鋼を使用し、長さ 600 mm、幅 400 mm の内枠を力量計を介して、70 mm の山形鋼からなる長さ 920 mm、幅 728 mm の外枠で保持している。力量計の分力は進行方向力を L_1 と L_2 で、垂直方向力を $V_1 V_2 V_3$ で、側方力を S でそれぞれ求められる。分力測定の基礎となる校正には容量 500 kg のロードセルを使用し、XYZ の 3 方向を立体的に求めてみた。この場合の合力での誤差は 5% 以内であり、荷重の増加・減少に対して検出する力に直線性のあることが認められた。

3) 円板の取付け

L 方向に対して円板角が $0^\circ \sim 30^\circ$ まで 5° ごとに変化できるようにし、円板の中心部はア

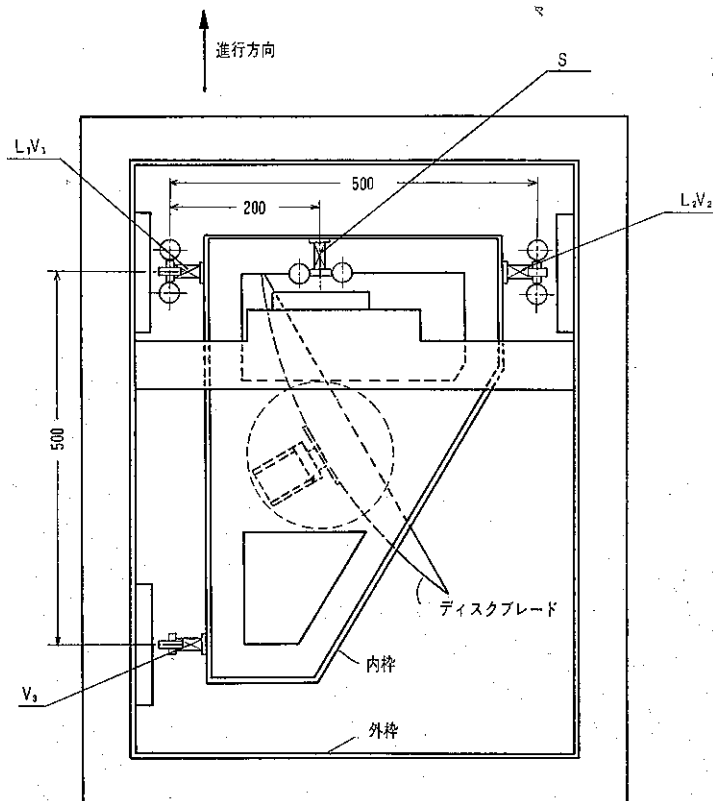


図-3 6分力測定装置 (単位: mm)

ンギユラ玉軸受 (7205) を使用した。なお、円板角は円板の取付部を中心にして変化できるようにしてある。この軸には 1/2 回転ごとにスイッチが作動し、円板の周速度が検出できるようにしてある。これは、円板と土壌との摩擦によって、円板角や耕深に対し円板の回転速度の差を求めるためのものである。

2. フレームおよび台車 (図-4)

フレームは前記の装置を左右に 45 mm ごとに移動しねじ止めできる。ソイルビンの内幅 950 mm に対して 585 mm 移動できる。台車は 4 本の脚があり 25 mm ごとに耕深の調節ができる。脚の下端にはつば付き車輪が装着してあって、溝形鋼製レール上を走行するようになっている。フレームの前部にはトラクタの 3 点リンクに装着できるヒッチピンが付してあり、レールを跨いでトラクタが走行する。レール側方には 0.5 m ごとに丸棒を付し、台車が走行するとき、スイッチがこの丸棒に接して作動し、オンログラフ上で台車の速度が判るようにしてある。トラクタは 40 馬力クラス (前進速度 10 段を有す) を使用した。

3. ソイルビン

レール高さは 450 mm で、内幅は 950 mm、長さ 16 m とし、この中に土壌がつめてあり、ローラで展圧した後の深さがおよそ 30 cm となるようにしている。なお、ローラは幅 800 mm、直径 610 mm 全装備重量は 225 kg で 2~4 回がけとした。耕うんには小型耕うん機を使用した。

4. 土壌反作用の数値解析

1) 図的方法

オンロペーパーより分力 $L_1, L_2, S, V_1, V_2, V_3$ の値が求まると、これにより 1 枚の円板に

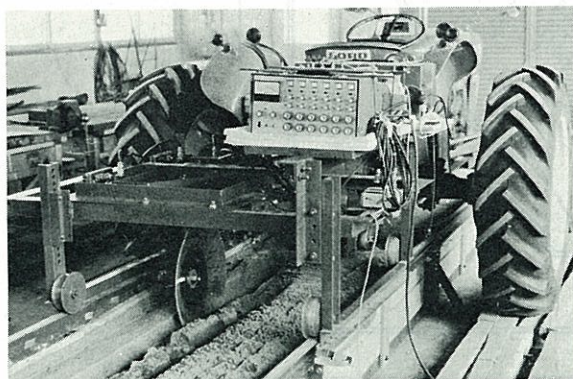


図-4 試作装置とソイルビン

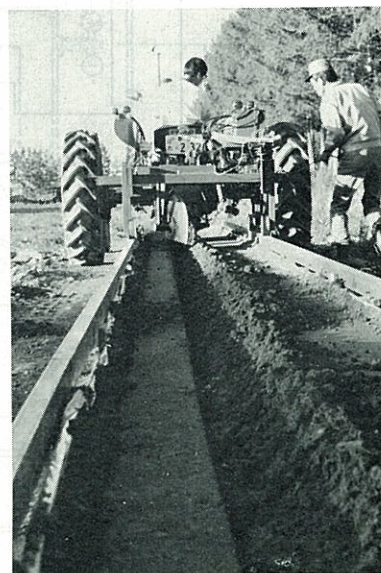


図-5 実験状況

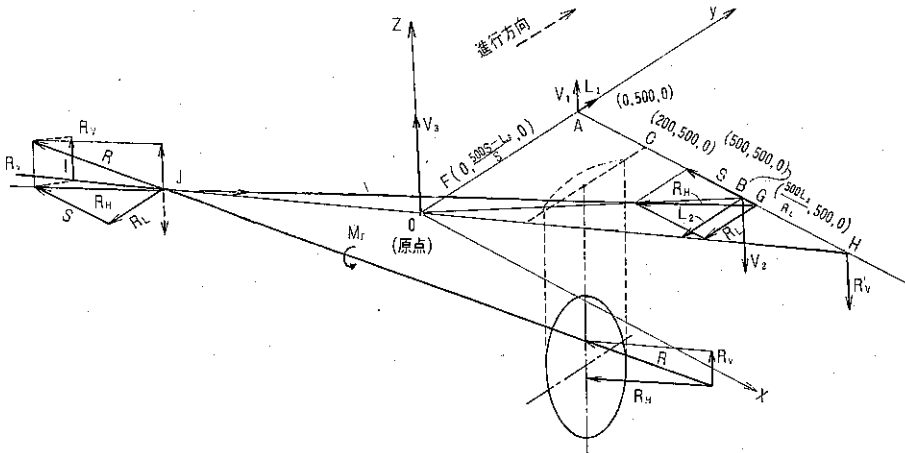


図-6 数値の図的解析図

作用する抵抗の大きさ、および、着力点が求まる。1枚の円板に作用する土壌抵抗力は3次元力で、一般に1力に合成することができず、1力と1偶力になる。力の図的合成法を図-6に基づき手順を述べる。各分力の値は、立体座標の x, y, z の矢印方向を正の値とする。第1に L_1 と L_2 をベクトル合成し、 G 点に R_L を求める。

これをれき断面積(ディスクの投影面積)で除したものが土壌比抵抗である。第2に R_L と S を合成して、水平合力 R_H を求める。第3に垂直力 V_1 と V_2 の合力 R'_V を H 点に求め、 R'_V と V_3 を合成して全垂直力 R_V を I 点に求める。第4に R_H と R_V の作用線の交点 J を求める。

J 点に R_H と R_V の合力と大きさ等しく、方向反対の力を付加して、1合力 R と1偶力 M_r が求まる。 M_r は進行方向に向かって右回りの力である。

この R とディスク面との交点が、求める抵抗中心である。

2) 解析幾何学的方法

数多いデータの処理を行なうには、1) の図的方法では多くの手数がかかり、不正確になり実用性がないので、計算機を使用しやすいように解析幾何学的方法を試みた。なお円板角により各分力の方向が変化するので、計算式は数例となるが、その一例を示す。

(1) 合力の方程式

図-6の原点 O に V_3 をとり、6分力測定装置の支点間距離 x, y を 500 mm とする。

各分力の条件

a. L_1 : 実数 $L_2 < 0$ $|L_1| < |L_2|$

$L_1 > 0$ の場合 (円板角 25° または 20° において)

$$|L_2| - |L_1| = R_L \text{ とする}$$

$L_1 < 0$ の場合 (円板角 20° において)

$$|L_1| + |L_2| = R_L \text{ とする}$$

b. $S < 0$ (円板角 $25^\circ, 20^\circ$ において)

c. V_1 : 実数 $V_2 < 0$ $|V_1| < |V_2|$

$V_1 > 0$ の場合 (円板角 25° または 20° において)

$$|V_2| - |V_1| = R_V \text{ とする}$$

$V_1 < 0$ の場合 (円板角 20° において)

$$|V_1| + |V_2| = R_V \text{ とする}$$

d. つねに $V_3 > 0$

$$|V_3| - |R_V| = R_V \text{ とする}$$

e. $R = \sqrt{R_L^2 + S^2 + R_V^2}$

なお、次の計算式に用いられる各分力 ($L_1, L_2, S, V_1, V_2, V_3$) の値は、すべてその絶対値を用いる。

G 点の座標

$$\left(\frac{500 L_2}{R_L}, 500, 0 \right) \quad (1)$$

G 点を通り、傾き $\frac{R_L}{S}$ の直線の方程式 (R_H の作用線) は

$$\begin{aligned} y - 500 &= \frac{R_L}{S} \left(x - \frac{500 L_2}{R_L} \right) \\ \therefore y &= \frac{R_L}{S} x + \frac{500(S - L_2)}{S} \end{aligned} \quad (2)$$

この直線と軸との交点 F は $\left(0, \frac{500(S - L_2)}{S}, 0 \right)$ であるので、この F 点と G 点を通る直線の方程式は、

$$\begin{aligned} \frac{x - \frac{500 L_2}{R_L}}{-\frac{500 L_2}{R_L}} &= \frac{y - 500}{\frac{500(S - L_2)}{S} - 500} = \frac{z - 0}{0 - 0} \\ \therefore \frac{x - \frac{500 L_2}{R_L}}{-\frac{500 L_2}{R_L}} &= \frac{y - 500}{-\frac{500 L_2}{S}} = \frac{z}{0} \end{aligned} \quad (3)$$

H 点の座標

$$\left(\frac{500 V_2}{R_V}, 500, 0 \right) \quad (4)$$

H 点と原点 O を通り、傾き $\frac{R_V}{V_2}$ の直線の方程式 (R_V の作用線) は

$$y = \frac{R'_V}{V_2} x \quad (5)$$

(5) の式は原点 0 を通るので、立体座標での式は

$$\frac{x - \frac{500 V_2}{R'_V}}{-\frac{500 V_2}{R'_V}} = \frac{y - 500}{-500} = \frac{z}{0}$$

H 点と原点 0 の距離は

$$0H = \frac{500}{R'_V} \sqrt{(V_2)^2 + (R'_V)^2}$$

R'_V の作用点を I とすると、原点 0 と I 点の距離は

$$0I = \frac{0H R'_V}{R'_V} = \frac{500}{R'_V} \sqrt{(V_2)^2 + (R'_V)^2}$$

I 点の座標を求めると、(5) 式より原点 0 と点 (x, y) の距離は $\sqrt{x^2 + \left(\frac{R'_V}{V_2} x\right)^2}$ となるから

$$\sqrt{x^2 + \left(\frac{R'_V}{V_2} x\right)^2} = \frac{500}{R'_V} \sqrt{(V_2)^2 + (R'_V)^2}$$

$$\therefore x = \frac{500 V_2}{R'_V}, \quad y = \frac{500 R'_V}{R'_V}$$

I 点の座標

$$\left(-\frac{500 V_2}{R'_V}, -\frac{500 R'_V}{R'_V}, 0 \right)$$

方程式 (2) と (5) の交点 J は

$$\frac{R'_V}{V_2} = \frac{R_L}{S} x + \frac{500(S - L_2)}{S}$$

$$\therefore x = \frac{500 V_2 (S - L_2)}{S \cdot R'_V - V_2 \cdot R_L} \quad (7)$$

(7) を (5) に代入して

$$y = \frac{500 R'_V (S - L_2)}{S \cdot R'_V - V_2 \cdot R_L}$$

ここで

$$\left. \begin{aligned} S - L_2 &= u \\ S R'_V - V_2 R_L &= v \end{aligned} \right\} \text{とおく}$$

J 点の座標

$$\left(\frac{500 V_2 \cdot u}{v}, \frac{500 R'_V \cdot u}{v}, 0 \right) \quad (8)$$

(8) を通り、方向余弦が $\cos \alpha = \frac{S}{R}$, $\cos \beta = \frac{R_L}{R}$, $\cos \gamma = \frac{R'_V}{R}$ の直線の方程式は

$$\frac{x - \frac{500 V_2 \cdot u}{v}}{\frac{S}{R}} = \frac{y - \frac{500 R_V \cdot u}{v}}{\frac{R_L}{R}} = \frac{z - 0}{\frac{R_V}{R}}$$

これを整理して、求める合力の方程式は

$$\frac{R}{S}x - \frac{500 R \cdot V_2 \cdot u}{S \cdot v} = \frac{R}{R_L}y - \frac{500 R \cdot R_V \cdot u}{R_L \cdot v} = \frac{R}{R_V}z \quad (9)$$

(2) ディスク形状の方程式

W. F. McCREEY⁹⁾によると、ディスクは平面によって切断された球の一部であって、球の半径はディスクの曲率半径である。従ってディスクは球の一部であるので、球の方程式をディスクの方程式とする。中心座標が (a, b, c) で、曲率半径が r の球の方程式は、一般に $(x-a)^2 + (y-b)^2 + (z-c)^2 = r^2$ である。今回使用したディスクの曲率半径 r は、20 インチ円板で $r = 635.1$ mm, 16 インチ円板で $r = 499$ mm, 16 インチ花形円板で $r = 536.1$ mm であって、 a, b は円板角によって異なり、 c はディスク取付軸の中心であるので $c = 430$ mm である。

よって、球の方程式は

$$(x-a)^2 + (y-b)^2 + (z-430)^2 = r^2 \quad (10)$$

なお、 a, b の値を表-1 に示す。

表-1 球の中心座標

単位: mm

a, b 円板角	20" 円 刃		16" 円 刃		16" 花形 刃	
	a	b	a	b	a	b
5°	831.5	307.4	-	-	-	-
10°	827.0	362.3	629.9	338.7	760.9	350.6
15°	815.0	416.4	683.5	381.2	750.1	399.0
20°	798.3	469.2	670.4	422.7	735.2	446.3
25°	777.1	520.4	653.7	462.9	716.3	492.0

(3) ディスク抵抗中心の座標

(9) と (10) の方程式の交点の座標 (x, y, z) がディスクの抵抗中心である。なお、交点の座標は円板角により異なり、式が多くなるので省略する。

(4) 偶 力

残留モーメントといわれている偶力 M_r は、全垂直力 R_V に J 点から R_H の作用線に下した垂線の長さ H を乗じたものである。1 点 $p(x_0, y_0)$ から直線 $ax+by+c=0$ へ下した垂直の長さ PH は

$$PH = \frac{|ax_0 + by_0 + c|}{\sqrt{a^2 + b^2}}$$

であるから、 I 点

$$\left(-\frac{500 V_2}{R_V}, -\frac{500 R'_V}{R_V}, 0 \right)$$

から R_H の作用線の式 (2) に下した垂直の長さ H は

$$H = \frac{|0.5(S \cdot R_V + S \cdot R'_V - V_2 \cdot R_L - L_2 \cdot R_V)|}{R_V \sqrt{S^2 + R_L^2}} \quad (\text{m})$$

従って偶力 M_r は

$$M_r = R_V \cdot H = \frac{|0.5(S \cdot R_V + S \cdot R'_V - V_2 \cdot R_L - L_2 \cdot R_V)|}{\sqrt{S^2 + R_L^2}} \quad (\text{kg-m})$$

(5) 計算例

16 インチ円板, 円板角 25° , 耕深 9.5 cm, 速度 0.5 m/s の場合は

$$\left. \begin{array}{l} L_1 = 1.48 \\ L_2 = -19.76 \\ S = -23.33 \\ V_1 = 7.85 \\ V_2 = -22.89 \\ V_3 = 27.11 \end{array} \right\} \left. \begin{array}{l} R_L = -18.28 \\ \\ \\ \\ \\ \\ \end{array} \right\} \left. \begin{array}{l} R_H = 29.64 \\ \\ \\ \\ \\ \\ \end{array} \right\} R = 32.0$$

$$\left. \begin{array}{l} \\ \\ \\ \\ \\ \\ \end{array} \right\} \left. \begin{array}{l} R'_V = -15.04 \\ \\ \\ \\ \\ \\ \end{array} \right\} \left. \begin{array}{l} \\ \\ \\ \\ \\ \\ \end{array} \right\} R_V = 12.07$$

a. 合力の方程式

G 点 (540.5, 500, 0), y 軸との交点 F (0, 76.5, 0)

H 点 (760.95, 500, 0)

I 点 (-948.2, -623.05, 0)

$$\left\{ \begin{array}{l} u = S - L_2 = 3.57 \\ v = S \cdot R'_V - V_2 \cdot R_L = -67.546 \end{array} \right.$$

J 点 (-604.9, -397.45, 0)

求める合力の方程式は

$$\begin{aligned} & 1.3716 x + 829.6972 \\ & = 1.7505 y + 695.7612 \\ & = 2.6512 z \end{aligned} \quad (1)$$

b. ディスクの方程式とディスクの抵抗中心

$$(x - 653.7)^2 + (y - 462.9)^2 + (z - 430)^2 = 499^2 \quad (2)$$

(1) 式を変形して

$$\left. \begin{array}{l} y = 0.7835 x + 76.513 \\ z = 0.5174 x + 312.9516 \end{array} \right\} \quad (3)$$

(2) の式に (3) を代入して

$$(x - 653.7)^2 + (0.7835 x - 386.39)^2 + (0.5174 x - 117.05)^2 = 499^2$$

$$\therefore 1.8816 x^2 - 2033.99 x + 341317.93 = 0$$

$\sqrt{D} = \pm 1252.29$ ただし、-の値のみ使用する。

$$x = \frac{2033.99 - 1252.29}{3.7632} = 207.7 \quad (4)$$

(4) の値を (3) に代入すると

$$y = 239.3, \quad z = 420.4$$

従って、ディスクの抵抗中心は、(207.7, 239.3, 420.4) である。

c. 偶 力

$$H = 0.0342(\text{m}), \quad R_V = 12.07 \text{ より}$$

$$M_r = R_V \cdot H = 12.07 \times 0.0342 = 0.412(\text{kg}\cdot\text{m})$$

従って、残留モーメントは、0.412 kg-m である。

IV. 供試円板の諸元

円板は 20 インチ円刃, 16 インチ円刃および 16 インチ花形刃でいずれもドイツ・エーベル

表-2 供試ディスク諸元

ディスク諸元	20"円刃	16"円刃	16"花形刃
直 径 (mm)	508.0	404.4	406.4
曲率半径 (mm)	635.1	449.0	536.1
くぼみ (mm)	53.0	42.8	40.0
肉 厚 (mm)	3.5	3.5	2.6
刃縁接線角(度)	23°35'	23°55'	22°16'
重 量 (kg)	5.48	3.58	3.0

表-3 耕深ごとのディスクの刃縁接線角

耕深 (cm)	接線角(度)		
	20"円刃	16"円刃	16"花形刃
5	15°04'	16°33'	15°27'
10	19°23'	21°05'	19°38'
15	21°52'		

表-4 円板角および耕深別支持面積

円板角 (度)	耕 深 (cm)	支 持 面 積 cm ²					
		20インチ円刃		16インチ円刃		16インチ花形刃	
		凸面側	凹面側	凸面側	凹面側	凸面側	凹面側
5	5	8.3	10.0				
	10	21.5	25.9				
	15	37.4	45.1				
10	5	4.8	19.3	4.1	16.5	3.1	18.0
	10	12.2	49.8	10.5	44.0	8.4	46.0
	15	21.6	86.5				
15	5	2.4	28.7	2.1	25.1	2.0	26.4
	10	6.1	74.3	6.0	65.0	5.0	68.5
	15	8.5	131.5				
20	5		37.7	1.0	32.8		36.3
	10		98.4	2.1	87.0		92.7
	15		172.8				
25	5		46.8		40.7		42.1
	10		123.1		107.7		110.3
	15		215.6				

ハルト社製である。円板の諸元を示すと表-2のとおりである。耕深ごとの刃縁接線角を表-3に示す。円板角は 0° の場合は凸面側を押しながら進行するが、ある程度以上の角では凹面側のみが作用するようになる。表-4にその投影面積を示す。すなわち支持面積とは進行方向に対して直交する面での土中の投影面積 cm^2 を示す。

V. 土壌条件および実験方法

1. 土 壌 条 件

供試土壌は砂および火山性砂壤土で、含水比はそれぞれ 12.9% および 44~46% で、仮比重はそれぞれ 1.44 および 0.75~0.82 であった。コーン指数ではそれぞれ 5 cm で 0.3 および 1.5 kg/cm^2 、10 cm で 1.3 および 1.7~2.3 kg/cm^2 であったが、ベーン剪断力は深さ 20 cm までほぼ一定であった。すなわち、粘着力 C は 0.014 および 0.07 で、内部摩擦角は 0° および 36.5° であった。

2. 実 験 方 法

テストする円板は 1 個であり、進行方向力 L_1, L_2 、垂直方向力 V_1, V_2, V_3 、側方力 S は 6 素子のストレンメータを通し、電磁オシログラフに記録させ、作業速度はレール側方の丸棒に接するごとに 0.5 m 間隔で合図が入り、また、円板は 1/2 回転ごとに合図が入るようにしてある。耕深は 5, 10, 15 cm とし、耕幅は 5, 10 cm とした。作業速度は 0.5~1.5 m/s とし、2 m/s 以上は困難なため省略した。円板角は $0^\circ, 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ, 25^\circ$ の 6 段階とした。なお、円板はその凹面側に流動パラフィンを塗り、土付着を防いだが 16 インチ円刃についてのみ付着した場合と比較してみた (図-7)。

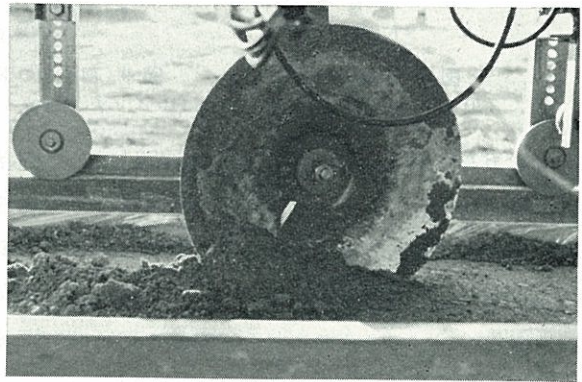


図-7 20 インチ円刃の土付着状況 (円板角 20°)

VI. 実験結果と考察

1. 耕 深 の 影 響

1) 分力, 合力および比抵抗 (図-8)

円板は 20 インチ円刃, 円板角 15° , 速度約 1.0 m/s で比較したもので、A は砂, B は砂壤土の場合である。進行方向力 L は両者とも耕深に比例して増加する。すなわち A が耕深 5~12.5 cm でおよそ 3 倍に、B では 5~15 cm で 7 倍に急増している。側方力 S は上記の耕深の変化に対して 2 倍に増加している。垂直力 V も S と似た傾向を示している。合力 R は

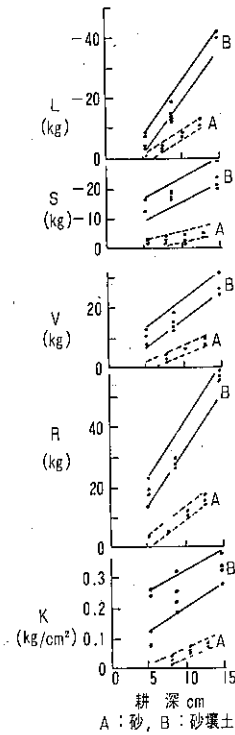


図-8 耕深の影響
(20 インチ, 15°, 1 m/s)

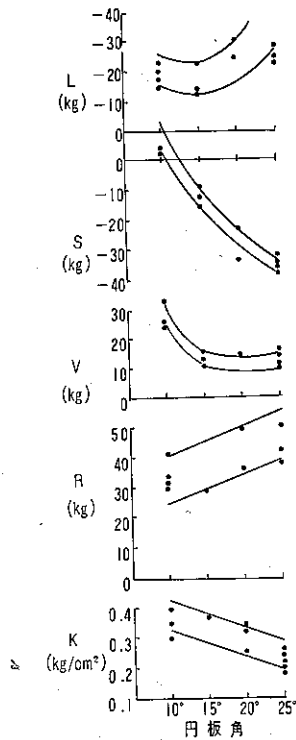


図-9 円板角の影響
(16 インチ, 10 cm, 1 m/s)

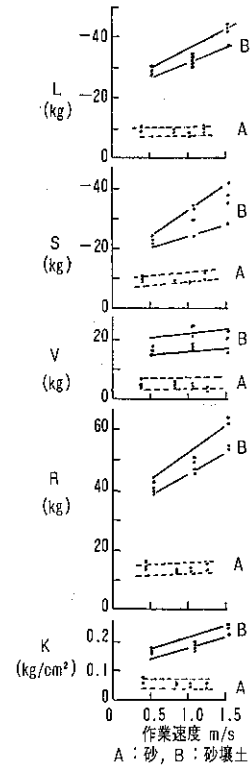


図-10 作業速度の影響
(20 インチ, 20°, 13~15 cm)

A では6倍 (15 kg) に, B では3倍 (56 kg) となった。比抵抗 K は G. GETZLAFF²⁾ らの円板プラウの実験によると, 耕深の増加に対して一定であるとのべており, 一方, 常松¹⁴⁾らの円板ハーローの実験によると増加すると報告している。本実験においては直線的に増加し, A では 0.1 kg/cm^2 以下であるのに対し, B では $0.1 \sim 0.4 \text{ kg/cm}^2$ におよそ2~3倍に増加した。砂の内部摩擦角が 0° であるのに対し, 砂壤土では 36.5° もあったことによるものと考えられる。

2) 合力の垂直角と水平角

合力 R の垂直角 α は A, B ともに 50° から 40° へと似た値を示しており, R の水平角 β は A では 50° から 15° へと下り, B では 60° から 50° へと変化した。A の場合では, 合力 R の方向は浅いときに円板の側方から, 深いときにはほぼ進行方向から円板に作用していると考えられる。

3) 円板に土が付着した場合 (図-11)

円板には流動パラフィンを塗って土付着を防止したが, 円板角 20° で故意に付着した状態と比較してみた。耕深に比例して全般的に増加するが, 特に進行方向力 L と側方力 S の値は耕深にほぼ比例して増加している。土が円板に付着した場合には合力でおよそ3倍となってお

り、水分の多い場合の砕土はきわめて抵抗の増大することが予測できる。

2. 円板角の影響

1) 分力, 合力および比抵抗 (図-9)

円板は16インチ, 速度は1 m/s, 耕深10 cmにおいて円板角の影響を比較してみた。進行方向力 L は円板角 15° で最小値を示し, 10° になるとむしろ増大している。これは円板の凸面側の投影面積が凹面側のそれの $1/4$ を占めていてこれが土壌を圧縮しながら進行するためと考えられる。一方, 円板角が $20^\circ \sim 25^\circ$ となると, 凹面側投影面積が 15° の場合の $1.3 \sim 1.5$ 倍となり, 土壌の放てき作用のため L は増大する。この場合は上から見て右回りのモーメントが作用するため, L_2 は増大するし L_1 は減少する。

この円板角の影響は側方力 S にもきわめて明瞭に現われ, 丘側から作用していたものが, $10 \sim 15^\circ$ を境にして溝側から作用していることがわかる。

垂直力 V では円板角 10° で 30 kg 前後と大きく変わっているのに対して, 15° 以上では 20 kg 以下となる。すなわち, 10° では凸面側の作用が大きいことによるものであり, 15° 以上となるとディスク凹面によるサクションが働くため, V が小さくなるものと考えられる。一般に円板ハローの円板角が 15° 以上になると, 刃縁の切線角に近いかまたはそれ以上となるので貫入しやすい状態になることが証明された。この場合に, 円板を後方からみて, 右回りのモーメントが働くため, V_1 は上向き, V_2 は下向きの分力となる。また, 円板角 10° では凸面側の作用が大きいから, 左回りのモーメントが働き V_1 は下向き, V_2 は上向きの分力となる。ただし, V_3 はいずれもつねに上向きの分力であり, なおかつ 15° で最も低い値を示している。

合力 R は円板角に比例して増加する。しかし比抵抗 K が減少しているのは L の増加割合よりも投影断面積の増加割合の方が大きいことによる。 R の値を垂直角 α および水平角 β で比較してみると, α は 50° から 30° へ移り, β は -10° から $+60^\circ$ へと急激に移っている(側方力 S と似ている)。すなわち, 円板角 $10^\circ \sim 15^\circ$ において $\beta=0^\circ$ (R は進行方向)となり, 15° 以上となると $\beta > 40^\circ$ と大きく変化する。 β の値は作業速度と円板角の増大につれて増

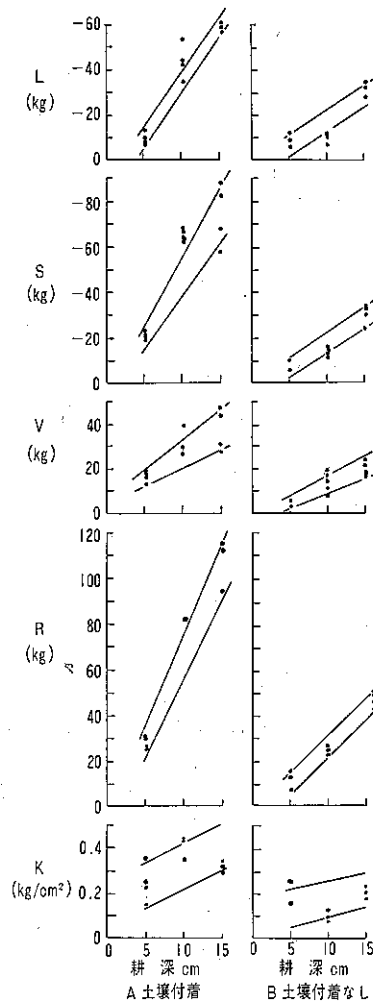


図-11 土壌付着の影響 (20インチ, 20° , 1 m/s)

加し、耕深の増加に対しては逆に小さくなることがわかった。

3. 土性と速度の関係 (図-10)

1) 砂 の 場 合

円板 20 インチで耕深が 12.5 cm の場合に作業速度 0.3~1.3 m/s の間の変化を比較してみた。円板角が 5° では合力 R が 60 kg と最も高い。比抵抗 K も 0.2 kg/cm^2 前後となった。円板角 10° では $R=35 \text{ kg}$ に減少する。これは S と V の減少による。円板角 15° では $R=20 \text{ kg}$ となり、 $K=0.1 \text{ kg/cm}^2$ となる。ここで S は逆向きとなる。円板角 20° ではどの値もさらに減少するが特に V は低下する。ただし、 S は次第に増大してくる。

2) 砂 壤 土 の 場 合

特に円板角 15° と 20° の場合について比較してみた。砂がほとんど速度の影響を受けないのに対し、砂壤土では速度に正比例して分力、合力ともに増大する。比抵抗 K は 15° で 0.3 kg/cm^2 以上、20° で 0.2 kg/cm^2 以上となった。増加割合を比較すると速度が 1.5 m/s ではほぼ 50% 増となった。

以上から砂と砂壤土を比較すると分力、合力、比抵抗ともに砂壤土の方が 2~3 倍高めになっていることがわかった。砂の場合この作業速度の範囲ではほとんど影響がでない。

4. 直径の相違 (図-12)

円板角 15°、砂壤土において、20 インチ円刃と 16 インチ円刃を比較してみた。前者は速度 0.5~1.5 m/s に対して進行方向力 L は 10% 増であるのに対して、後者では 20% 増となっ

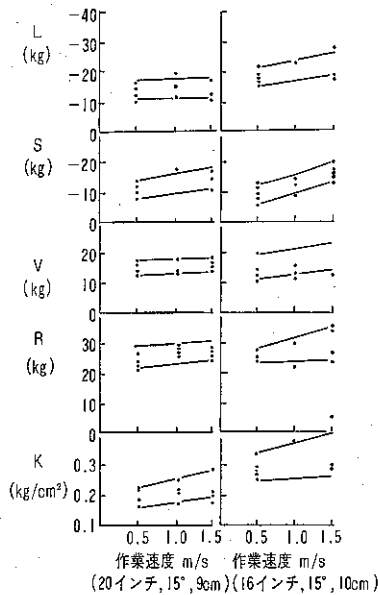


図-12 円板直径と力の相違

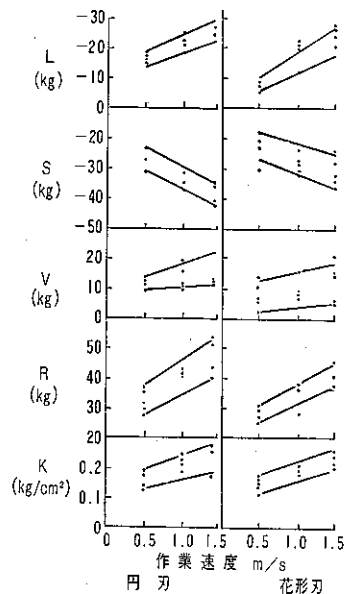


図-13 円刃と花形刃の比較
(16 インチ, 25°, 9.5~10 cm)

た。また両者の比抵抗を比較してみると、20インチ円板で 0.2 kg/cm^2 となっているのに対して、16インチ円板では 0.3 kg/cm^2 と高い値になった。この結果は E. D. GORDON の実験結果⁶⁾ときわめて似ており、同一耕深に対しては直径の大きい円板の方がけん引抵抗が相対的に低く、有利であることが判明したわけである。

5. 円刃と花形刃 (図-13)

16インチの円刃と花形刃について砂壤土で比較してみた。耕深は 9.5~10 cm, 円板角は 20° および 25° の場合において進行方向力 L は速度の増加に対して、花形刃でもおよそ 1.5 倍に増加している。その差はおよそ 1.5:1 となっている。特に垂直力 V は円刃のおよそ 1/2 となっていて花形刃の切断力の大きいことが推測できる。花形刃はその周辺を 9カ所カットしており、投影面積も少なく、垂直的なさきり込みに対して抵抗の少ないことが証明された。また、側方力 S が若干低いことから花形刃による土壌放てき力が円刃よりも小さいことが推定できる。

6. 合力および抵抗中心

16インチ円刃を使用し、耕深 10~11 cm 付近で円板角 20° の場合および抵抗中心の変化を速度別に求めると、図-14b のようになる。

水平面での合力および抵抗中心の変化としては速度が大となると、抵抗力の水平角はほとんど変化しない。抵抗中心点は円板面上を後退してゆく傾向が見られた。

垂直面での変化としては、速度の増加に対して垂直角は減少する傾向が見られた。抵抗中心点は円板軸より上側にあり、中心部から次第に上がり刃縁側へと移動する傾向がある。

A. W. CLYDE²⁾ の円板ハローと円板プラウの実験では、抵抗力は円板軸の下を通り、抵抗中心は回転軸のわずか後方にあると述べているが、それとは異なった結果となった。また、その後の G. GETZLAFF ら⁵⁾ の円板プラウによる合力の変化を図-14a に示したが、速度 1 m/s で抵抗中心点は水平面で円板軸の前方にあり、垂直面では下方の刃縁部と軸の中間部にある。この円板に回転を与えてやると合力は次第に上向きとなり抵抗中心も軸の高さまで上がってくる。この場合は円板軸が傾斜しているため、抵抗中心は軸の前方と下部に分布したが、今回の実験では円板の傾斜角は 0° (垂直) のため抵抗中心点は円板軸中心のやや前方付近にあり、速度を上げるにつれて、さらに上昇してゆく傾向となった。土壌の動きとして考えられることは、円板プラウは傾斜しているため下方から順次すくい上げようとしているのに対して、円板ハローでは土壌をすくい上げるよりも、一旦だきかかえた後に側方へ押し分ける働きとなるため、円板軸の上方へと作用するものと考えられる。この場合は 16インチ円板のため特にこの傾向が顕著に見られる。

なお、図-14a のうち II は自由回転であるが、III, IV はそれぞれ作業速度 1 m/s に対して、円板周速度を 1.2 および 2.5 m/s と上げてみた場合である。本実験においては、図-15に

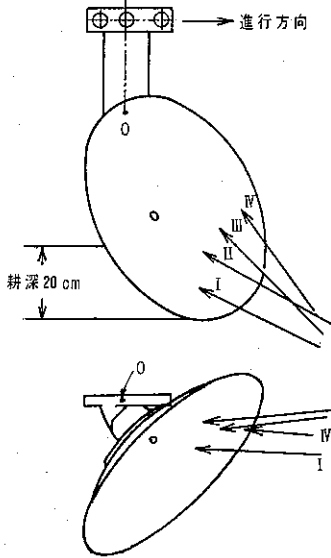


図-14 a プラウ用円板の抵抗中心
(20 インチ, 1.0 m/s, 20 cm)

- I: 円板固定
- II: 自由回転
- III: 円板周速度 1.2 m/s
- IV: 円板周速度 2.5 m/s

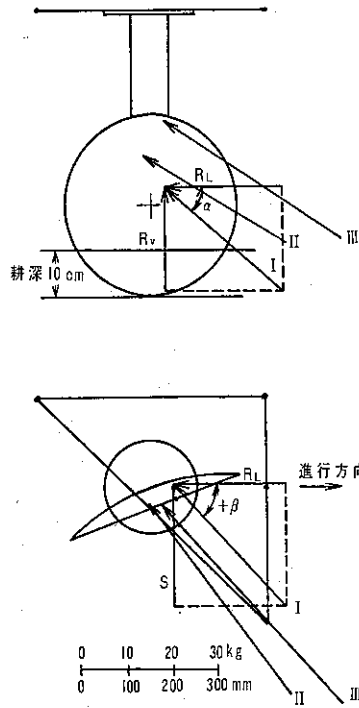


図-14 b ハロー用円板の抵抗中心
(16 インチ, 20°, 10 cm)

- I: 作業速度 0.5 m/s
- II: 作業速度 1.01 m/s
- III: 作業速度 1.42 m/s

示すように周速度の方が作業速度よりもわずかに増加している。すなわち、円板角 10° では 1:1 であるが、25° にもなると 1:1.2 となった。W. F. McCREERY⁹⁾ らの研究によると、土壌の仮比重が小さくなる(膨軟になる)と、円板 1 回転当りの距離は短かくなると述べている。

しかし、円板角 25° までならば、10%の差を示しているので、ほとんど問題とならない。むしろ、円板刃縁の刃のつけ方や鋭利度の方が問題となる。円板の曲率の差によるささえ面の大きさは、本実験での円板の回転に対しても問題となるような差はなく、さらに、花形刃においても、特に影響の出るような回転差は生じなかった。

7. 土壌の移動と反転状況 (図-16 a, b)

円板による速度および円板角の影響をれき土の移動、反転状況から求めてみた。測定には

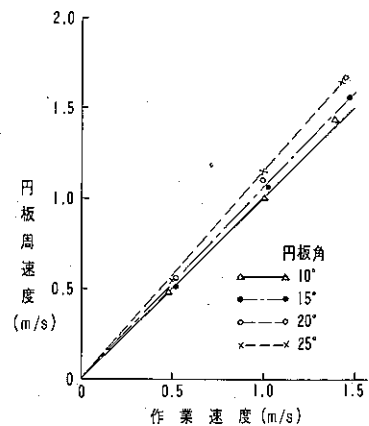


図-15 作業速度と円板周速度
(砂壤土, 16 インチ, 9.5~11 cm)

チェーン溝埋設法を採用し、立体座標を求めることによっておよその移動状況を知ることができた。実験に際しては砂と砂壤土とで同一条件を反復した。表現方法として(1) 押し出し距離(進行方向の移動距離)、(2) 放てき距離(側方向の移動距離)、(3) 放てき角(側方移動を0°、前方移動を90°とした)の3点から比較してみた。

1) 円板直径の相違

円板角を大きくすると、20インチ円板では放てき角は小さくなるのに対して、16インチ円板では円板角が15°と

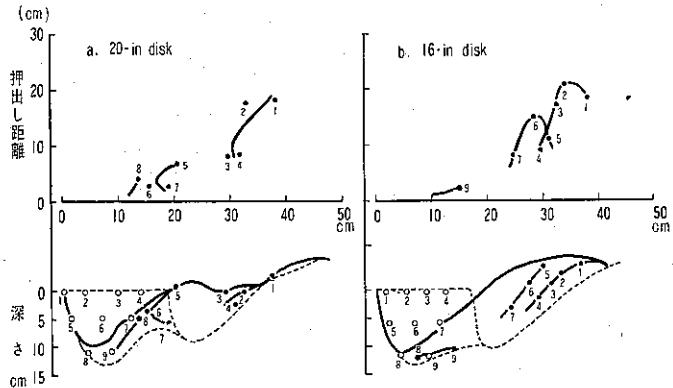


図-16 土壌の移動状況 (砂, 20°, 1.4 m/s)

20°で大差がないのに、25°になるとおよそ2倍に急増する。作業速度を大きくすると(1.7~2 m/s)、放てき角も大となる。特に16インチ円板ではこの傾向が明確となった。また、押し出し距離は主として速度の影響を受けやすい。

同一耕深と速度の場合に、20インチ円板と16インチ円板との押し出し距離を比較すると、後者の方が1.5~2倍となっていることがわかり、放てき距離は最大1.5倍に増加した。特に中層では大きく放てきしている。これはE. D. GORDONが指摘したように、小径の円板はくぼみが比較的大きいため、一旦もち上げた土壌を抱きながら進行する傾向があるためと考えてよい。

なお、砂壤土の押し出し距離は砂のおよそ1.5~2倍となっていて、放てき距離は砂のおよそ1.1~1.5倍となった。

2) 土壌の反転状況

反転状況は垂直断面での上, 中, 下層の変化を比較して求める。円板ハローの場合は図-17に示すように上, 中層が縞状に放てきされていることが多く、円板角が小さく、速度の遅いほど反転したれき条の傾斜度合が急である。逆に、円板角が大きく、速い場合では傾斜度合は緩やかとなる。ここで下層についてであるが、円板角を大としても直径を大きくしても、中層まで混合することはあるが、上層と混合することはないことが判明した。

図-18 a, b はドイツの参考書^{4,11)}に記述された円板による土壌のかくはんと混和の説明図であるが、これによると下層部の土壌はすくい上げられて遠くへ放てきさ

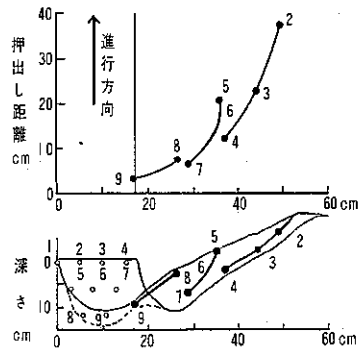


図-17 20インチ円板の土壌移動状況 (25°, 2.0 m/s, 14 cm)

れているようになっているけれども、今回の実験結果からは考えられないということを強く指摘したい。

今、肥料を表土全面に散布したとき、1回かけで上、中層が縞状に分布し、2回かけでかなり混

合することが理解できる。下層まで混和するべく作業速度を上げても表層の放てきが增大するだけで下層の反転、混合は期待できない。

8. 複列円板ハローの土壌移動 (図-19)

トラクタ直装用として一般的な16インチ24枚、18インチ24枚および20インチ24枚についての土壌移動を実際に圃場で測定比較した。作業速度は1 m/s および 1.7 m/s で、貫入深はおよそ 13 cm とした。圃場はロータリハローで碎土均平したもので、膨軟である。使用

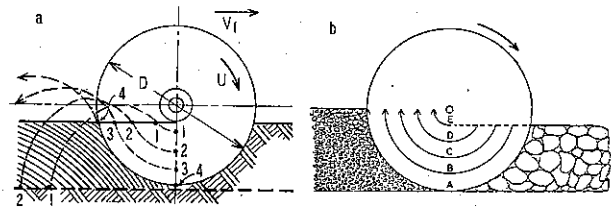


図-18 外国の文献における円板の作用
(a) E. SCHILLING, 1962 (b) W. FEUERLEIN, 1964

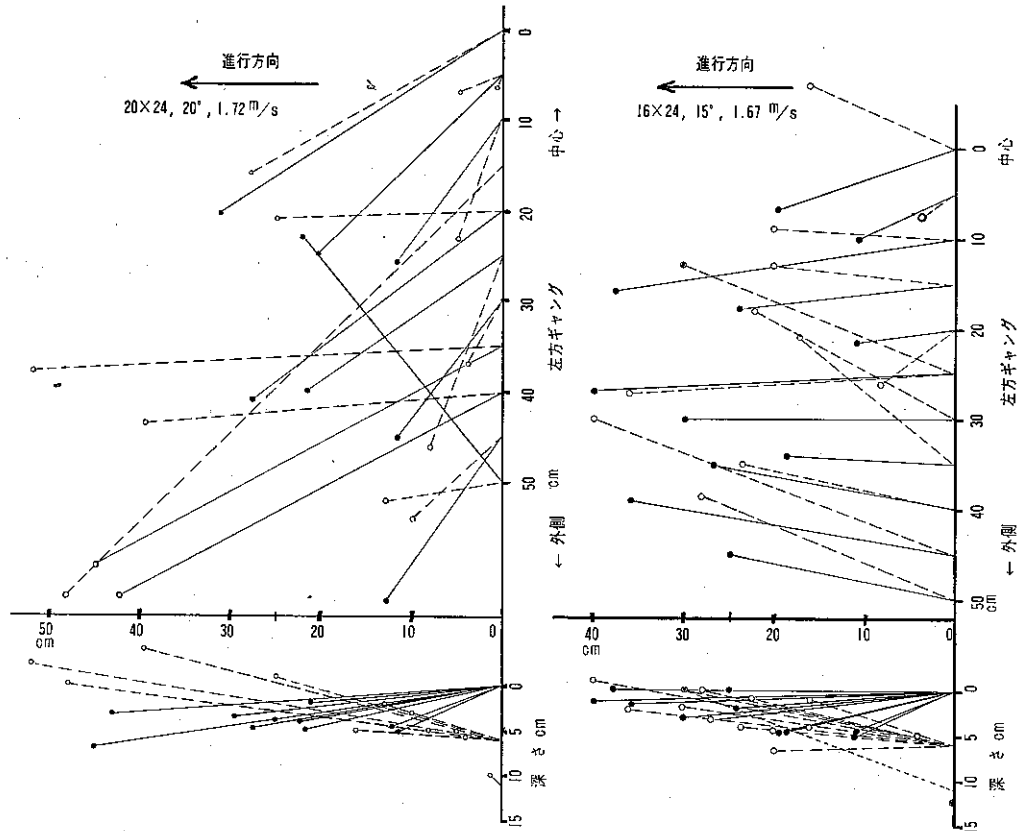


図-19 トラクタ複列円板ハローの土壌移動状況

トラクタは 75 PS のもので、油圧レバー（ポジションコントロール）によって一定貫入深を保持した。

土壌の移動状況はチョーク埋設法によることとした。チョーク埋設位置は左側半分のギヤングが通過し、かつトラクタの車輪が踏みこまないようにした。チョークは左右方向に 50 cm とし、5 cm ごとに埋設した。深さは地表、5 cm および 10 cm の 3 段とした。なお円板間隔は 20 インチ円板が 21.5 cm で、他は 16.5 cm であった。

円板間隔は 20 インチ円板が広いため、16 インチおよび 18 インチ円板の方が押し出し距離は長くなった。一般に円板角が 15° 以上になると、上、中層の前方移動が大きくなる。また作業速度が 1.7 m/s にもなると、この傾向は一段と顕著となる。すなわち、16 インチ円板では上層は中層へと移動し、中層は中、上層へと移動し、どちらも前方へ 20~40 cm も押し出された。しかし、下層はほとんど上がることはなかった。18 インチ円板では 30~70 cm にも押し出し、20 インチ円板では 25~50 cm となった。両者の下層はほとんど持ち上がることはなかった。しかし 20 インチ円板でも円板角が 20° 以上になると、上、中層はそれぞれ反対方向に移動し、特に中層の押し出し距離は 30~50 cm にも達している。

以上要約すれば、円板角は 20° 以上の方が上、中層の移動が目立ち、作業速度も 1 m/s より 1.7 m/s の方がきわめて著しく押し出されることがわかった。ただし、16 インチ円板では 15° でも上・中層の移動が顕著であった。

VII. 結 語

小型のソイルビンに砂と砂壤土を入れ、試作 6 分力計によって円板ハロー用ディスクブレードの特性を求めることができた。本実験は 1970 年から 1972 年にわたって実施したもので、土壌移動についてはトラクタ直装用円板ハローを供試しての実用試験からも検討を加えた。

実験結果を一括して列記すると次の通りである。

1) 使用した力量計はストレンゲージ応用のもので、容量は 100 kg のものを 4 個使用し、そのうち 2 個は 2 方向の応力が同時に計測できる。力量計の相互干渉による誤差は 2% 以下であった。また分力測定 of 誤差は 5% 以内であった。

2) 耕深が 5~15 cm において、作業速度が 1 m/s の場合、砂では合力 R は 6 倍に、砂壤土では 3 倍に増加した。比抵抗はそれぞれ 0.1 kg/cm^2 および $0.1\sim 0.4 \text{ kg/cm}^2$ となった。合力の方向は浅いときに外側から、深いときには次第に進行方向へ向う。土壌が附着した場合は、合力は 3 倍に増大することを知った。

3) 円板角を変化した場合、 15° で進行方向力 L が最小値を示し、もっとも貫入しやすいことを知った。円板角が $20\sim 25^\circ$ となると、凹側の投影面積は 15° のときの 1.3~1.5 倍となり、比抵抗は減少する。円板角が 10° では凸側のささえ面が出るために、側方力は反対方向と

なり、比抵抗も増大している。すなわち、円板角 15° 付近を境にして貫入状況が変化した。

4) 比抵抗は砂壤土において、円板角 15° で 0.3 kg/cm^2 、 20° で 0.2 kg/cm^2 となった。作業速度を 1.5 m/s とすれば、増加割合は 1.5 倍となった。しかし砂においては、速度の影響がほとんどなかった。

5) 20 インチ円板の作業速度による進行方向力 L の増加割合は 10% であるのに対して、16 インチ円板では 20% 増となった。比抵抗 K はそれぞれ 0.2 および 0.3 kg/cm^2 となり、大径の円板の方が有利であることを知った。

6) 円刃と花形刃の比較については、進行方向力 L は $1.5:1$ 、垂直力 V は $1:0.5$ で切断力の大きいことを知った。側方力 S の小さいことから、土壌の放てき力は後者は少ないと考えられる。

7) 合力 R は作業速度を上げると、低速で軸付近にあったものが円板の凹側に沿って次第に上方へ向って分布している。

8) 土壌移動を押し出し距離で表わすと、同一耕深では 16 インチ円板の方がやや大きくなっており、土壌を抱きかかえて進行することを知った。円板角を大にすると、特に顕著となった。円板角を大きくすると、速度による土の移動が一層大となった。円板による土壌の反転は、上層と中層がそれぞれ縞状に反転・放てきするが、下層は全く反転することがないことを知った。この事実を確認するため、トラクタ用円板ハローでの実験をした結果、円板ハローによる土壌の完全な混和と反転作用は期待できないと結論するにいたった。

参 考 文 献

- 1) BARNES, K. K., BOCK, C. W. and MCLEOD, H. E. (1960): Similtiude in Studies of Tillage Implement Forces Agric. Engng. 30 (1): 32-42.
- 2) CLYDE, A. W. (1939): Improvement of Disk Tools Agric. Engng 20 (6): 215-221.
- 3) CLYDE, A. W. (1956): Disk Harrow Design Improvements Agric. Engng. 37 (3): 173-176.
- 4) FEUERLEIN, W. (1964) Geräte zur Bodenbearbeitung, 99-101, Verlag Eugen Ulmer.
- 5) GETZLAFF, G. and SHÖNE, W. (1959): Kräfte-und Leistungsbedarf frei drehender und angetriebener Pflügscheiben auf hartem, trockenem, tonigem Lehm, Grundlagen der Landtechnik, Heft 11: 40-52.
- 6) GORDON, E. D. (1941): Physical of Soil on Plow Disks Agric. Engng. 22 (6): 205-208.
- 7) JOHNSTON, R. C. R. and BIRTWISTLE, R. (1963): Wheatland Disc Plough Investigations J. Agric. Engng. Res. 8 (4): 312-326.
- 8) KÜHNE, G. (1928): Handbuch der Landmaschinentechnik, I Band, 1 Lief., 54-59, 73-78, Verlag von Julius Springer.
- 9) MCCREEY, W. F. and NICHOLS (1956): The Geometry of Disks and Soil Relationships Agri. Engng. 37 (12): 808-812.
- 10) RICHEY, C. B., JACOBSON, P. and HALL, C. W. (1961): Agricultural Engineer's Handbook, 138-147, McGraw-Hill.
- 11) SCHILLING, E. (1962): Landmaschinen 2. Band, 334-341. Du Mont Presse.
- 12) 手塚右門, 小中俊雄 (1960): 小型トラクター用作業機のけん引抵抗に関する研究 (第2報) 農業機械学

- 会誌 22 (4): 123-126.
- 13) 手塚右門, 小中俊雄 (1960): 小型トラクタ用作業機のけん引抵抗に関する研究 (第3報) 農業機械学会誌 26 (1): 30-34.
- 14) 常松 栄, 岡村俊民, 小野哲也 (1950): ディスクハローに関する研究 (第1報) 農業機械学会誌 11 (3): 88-91.
- 15) 常松 栄, 吉田富穂, 松居勝広, 池内義則, 南部 悟, 宮本啓二 (1967): トラクターによる踏圧現象に関する研究 (第1~6報) 農機学会北海道支部会報 9, 126-167.
- 16) 吉田一男 (1956): デスクハローに関する二, 三の知見, 農機学会北海道支部会報 3: 41-44.

Summary

The present investigation was conducted to determine the force component on a disk blade and the movement of the soil by harrowing. The equipment included a small size soil bin and the carrier which moved the disk tool through the soil. Sixteen in. and 20 in. plain disk blades, and 16 in. notched edge disk blades were used. The plots selected for most of the work with the disks were sandy loam soil.

The forces were measured by a six component measuring instrument on which could be mounted six appropriately oriented force transducers. The force transducers consisted of cantilevers each with a strain-gage arrangement. The results were as follows.

1) On a tool subframe with four force transducers, the experimental error measured was less than 5% when calibrating the force component.

2) In the case of the 20 in. disk in sandy loam, the longitudinal force L and the resultant force R at a depth of 15 cm were 3 times the force at 5cm. The side force S and vertical force V varied directly with the depth. The specific force on sand and sandy loam were 0.1 and 0.1 to 0.4 kg/cm² respectively. The direction of R was from lateral in shallow soil to longitudinal in deep soil. When the soil stuck to the blade, R was 3 times the value of the scoured condition.

3) At a disk angle of 15 degrees, L was comparatively lower and penetrated well. When the disk angle was 20 to 25 degrees, the specific force was decreased slightly. On the other hand, at an angle of 10 degrees, the specific force was increased on the bearing area of the backside of the disk. This side force at a disk angle of 10 degrees forced to oposite direction the disk away from the land.

4) The specific forces at disk angles of 15 and 20 degrees were 0.3 and 0.2 kg/cm² on sandy loam. When the travel speed was 1.5 m/s, the specific force was increased 1.5 times the value of a speed of 0.5 m/s. However, there was no variation on sand in this range of speed.

5) The values of L in sandy loam soil for 20 in. and 16 in. blades were 10% and 20% respectively with an increase in speed from 0.5 to 1.5 m/s. The specific force at 20 in. and 16 in. were 0.2 and 0.3 kg/cm² respectively. The draft and penetration factors were reversed in favor of the smaller disk.

6) A comparison of notched and plain-edge disks showed slightly significant differences in draft and ability to penetrate into the soil. The ratio of the L component between notched and plain-edge disks was 1 : 1.5, and the V component was 2 : 1.

7) When the travel speed was increased, the resultant force R had a tendency to

more upward on the concave side of the disk surface, whereas the direction of R was apt to act on the center the blade.

8) Soil was thrown a greater distance forward by the use of the 16 in. blade than with the 20 in. blade at the same depth and same disk angle. Soil turning by a disk makes alternate strips of upper layer and middle layer soil. However, it was found that the lower soil layer does not move upward along the previous furrow. Field tests was conducted to confirm these results by the use of 16, 18 and 20 in. tandem disk harrows with 24 blades. From the results described above, we may conclude that perfect soil mixing and turning action by the use of disk harrows was not achieved.