

トラクタの側方けん引と重量転移

田 辺 一・中 尾 清 治

Hajime TANABE and Seiji NAKAO

Weight Transfer caused by the Side Draft of Tractor

I. 結 論

作業機をけん引するトラクタは、その負荷によって影響を受け車輪荷重の配分が変化する。この重量配分の変化を *weight transfer* と言う。左右駆動輪の状態（車輪の大きさ、荷重、回転速度）が、けん引線に対して左右対称であるトラクタの *weight transfer* の計算は容易であるが、左右駆動輪の状態が対称でない、または負荷を側方けん引する場合、トラクタが偏角（トラクタの機体中心線と前進方向との間にはさまれる角）を持つ場合の *weight transfer* は容易に予測できない。そこで側方けん引、とくに *offset pull*（トラクタの前進方向に平行で、しかもけん引点を側方に偏心して作業機をけん引する方法）の場合の *weight transfer* を実測し、また理論計算式を作成してその性格を明らかにする。

II. 実 験 方 法

筆者はこれまで駆動空気タイヤの荷重、タイヤの大きさが違う場合、左右駆動輪に荷重差がある場合、およびけん引点が側方に偏心する場合のトラクタのけん引性能を、とくに傾斜地を走行する場合を想定してトラクタが偏角を持つ場合のけん引性能を系統的に検討してきた^{(1)~(6)}。

Table 1 Specification of test tractor

Test tractor	2 wheel tractor
Type of engine	Air cooled, kerosine Engine 6 ps/ε600rpm
Pneumatic tire size	4.00-10
Gross weight	2.58kg
No-load running speed	0.23m/sec.

※農業機械工学研究室

また *weight transfer* については、昭和42年度卒業論文⁽⁷⁾ 実験として、車輪荷重差、偏角を持たない場合の簡単な実験を行なった。今回の実験は左右駆動輪に車輪荷重差があり、しかもトラクタが偏角を持つ場合の *weight transfer* を調査したもので、とくに考察には前記諸研究との関連を持たせる意味において、実験装置は「けん引点の側方偏心とけん引性能」⁽⁶⁾⁽⁷⁾ についての研究に用いた装置をそのまま用い、*weight transfer* は駆動軸を中心として、これによって生じる後方への回転モーメントを駆動軸中央後方 ($L=550mm$) の対地荷重から求めた。測定値はすべて供試トラクタ重量で除し、後方回転モーメント係数として表わした。

第1図は実験装置で、偏角を保持した状態でトラクタを一定の方向に走行させるために、10°間隔にけん引かんを装着できる円形枠をトラクタに装着した。けん引点を側方に偏心させるためには、円形枠の中心を車軸の左右の方向に移動できるようにした。この側方への移動量

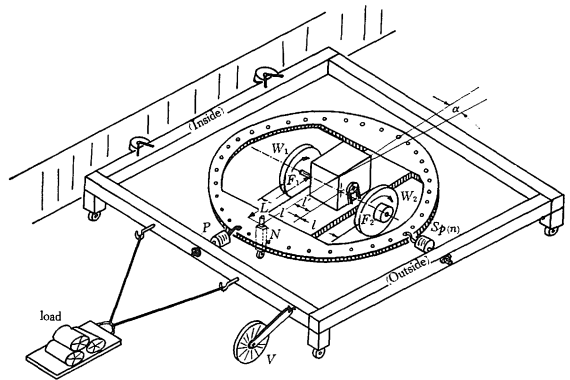


Fig. 1 Experimental apparatus

Table 2 Weight on the each wheels

(unit kg)

The condition of added weight (Inside-Outside)		0-0	0-20	20-0	0-40	40-0	0-60	60-0	0-80	80-0
Eccentricity to inside $l'=150mm$	W_1	134	126	160	120	185	110	213	106	246
	W_2	124	152	118	178	113	208	105	232	92
	λ	-0.039	0.094	-0.151	0.195	-0.242	0.292	-0.340	0.373	-0.455
Eccentricity to inside $l'=80mm$	W_1	129	122	156	117	181	108	210	100	238
	W_2	129	156	122	181	117	210	108	238	100
	λ	0	0.122	-0.122	0.215	-0.215	0.321	-0.321	0.408	-0.408
The center of driving schaft $l'=0$	W_1	123	117	150	110	174	101	202	91	228
	W_2	135	161	128	188	124	217	116	247	110
	λ	0.046	0.158	-0.079	0.262	-0.168	0.365	-0.270	0.462	-0.350
Eccentricity to outside $l'=80mm$	W_1	114	108	142	103	167	93	193	84	221
	W_2	144	170	136	195	131	225	125	254	117
	λ	0.155	0.223	-0.022	0.308	-0.121	0.415	-0.214	0.530	-0.304
Eccentricity to outside $l'=150mm$	W_1	108	100	134	94	158	85	184	76	211
	W_2	150	178	144	204	140	233	134	262	127
	λ	0.170	0.280	0.036	0.370	-0.061	0.466	-0.157	0.550	-0.248
Gross weight		258	278	278	298	298	318	318	338	338

W_1 : Weight of inside wheel, W_2 : Weight of outside wheel, λ : Ratio of weight difference
 $\lambda = (W_2 - W_1) / W$

l' をけん引点の側方偏心量, l' と輪距の $\frac{1}{2}$ との比 l'/l を側方偏心率と呼ぶことにする。この場合, けん引点が偏角の付く方向に移動した場合は内側偏心, 反対側に移動した場合は外側偏心とし, 実験時の偏心量は内側偏心, 外側偏心とも $l'=80mm, 150mm$ で, $l=250mm$ である。けん引荷重 P と横方向の力 (押圧力) $S_p(n)$ は, ともに常に駆動軸上の側方偏心点に作用するようにした。トラクタの諸元および実験条件は第1表および第2表のとおりで, けん引荷重は前記諸実験と同様地面に平行な単純けん引荷重とした。

III. 実験結果

第3, 4図は最大けん引荷重 (車輪のすべり率100%) の時の荷重差率とけん引点側方偏心による後方回転モーメント係数 $\frac{N}{W}L$ で, 荷重差率による変化は少ないが, 偏心によって若干低下する。またトラクタが偏角を持って *weight transfer* の大きさは変わらない。

第6, 8図はトラクタが一定の荷重をけん引しながら前進している場合 (部分けん引荷重時) の後方回転モーメント係数の値で, 偏角の増加にしたがってトラクタは押圧力を増加するので, 後方回転モーメント係数は次第に増加する。

IV. 理論式の検討

1. けん引点が駆動軸中央の場合

トラクタのけん引状態の基本として駆動軸中央でけん引する場合をまず検討する。

(a) けん引線に対し左右駆動輪の状態が対称の場合
 この場合のけん引力 P および押圧力 $S_p(n)$ は次式で表わされる。

$$P_{max} = K_3 W \cos \alpha \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} S_p(n) &= S_p(max) + S_r \left(1 - \frac{P}{P_{max}}\right) \left(1 - \frac{\alpha}{90}\right) \\ S_p(max) &= K_4 W \sin \alpha \\ S_r &= K_2 W \sin(A\alpha B) \end{aligned} \right\} (2)$$

ここに, S_r は回転押圧力 (この実験装置を他のトラクタでけん引したときに発生する横方向の力), α は偏角, A, B, K_2, K_3, K_4 は係数, 添字 *max* は最大を示す。

偏角を持つトラクタが走行するためには, 常にけん引荷重のほか(2)式で表わされる横方向の力を発揮するので, 車輪回輪面方向のけん引力 P_s は

$$P_s = P \cos \alpha + S_p(n) \sin \alpha \quad (3)$$

トラクタが最大けん引荷重をけん引している場合は

$$P_{s-max} = K_3 W \cos^2 \alpha + K_4 W \sin^2 \alpha$$

$K_3 \doteq K_4$ であるから

$$P_s - max = K_3 W \quad (4)$$

(3), (4)式で表わされる負荷をけん引するトラクタの後方回転モーメント係数は, 第2図において空気タイヤの接地点 Q を中心とするモーメントのつりあいから

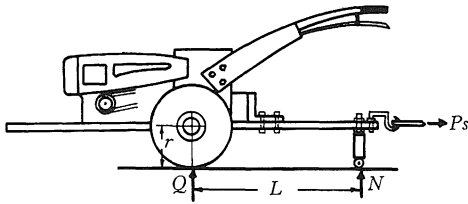


Fig. 2 Acting points of draft (P_s) and driving reaction (N)

$$P_s r = N L$$

$$\frac{P_s}{W} r = \frac{N}{W} L \quad (5)$$

ここで, $r=230mm$, $K_3=0.70$ として(3), (4)式を用いて計算した結果は第3図のけん引点中央の $\lambda=0$ の点となる。(4)式からトラクタは最大けん引負荷をけん引する場合, 偏角に関係なく *weight transfer* は一定で, またそれぞれの計算値は実測値によく合った。

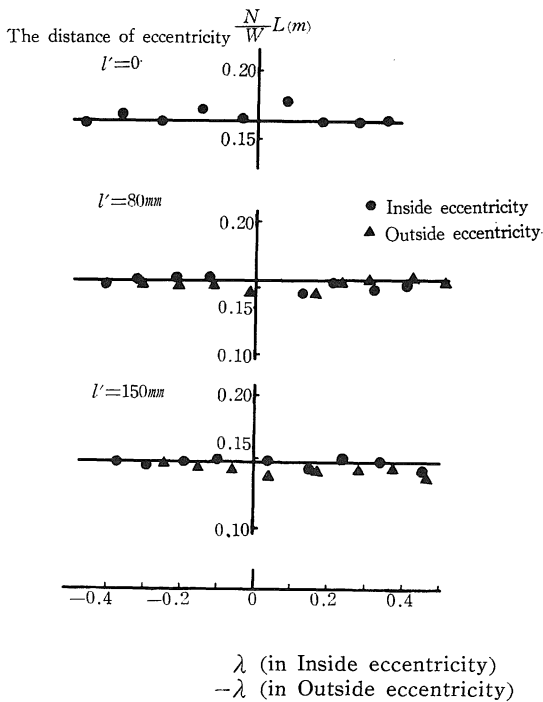


Fig. 3 Coefficient of turning moment in maximum draft.

(b) 車輪荷重差がある場合

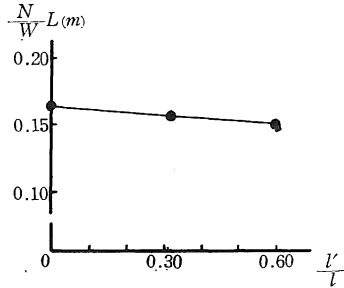


Fig. 4 Relation between coefficient of turning moment and eccentric ratio.

左右駆動輪に車輪荷重差がある場合のけん引力, 押圧力は内側荷重(偏角の付く方向すなわち内側の車輪荷重が大きいとき)および外側荷重(その逆)とによ

って, 大きさは異なり次式で示される。(2)

内側荷重のとき

$$P_{max} = K_3 W \cos(\alpha - \beta)$$

$$S_{D(n)} = K_4 W \sin(\alpha - S\beta)$$

$$+ S_r \left(1 - \frac{P}{P_{max}} \right) \left(1 - \frac{\alpha}{90} \right) (1 + K_7 |\lambda|)$$

外側荷重のとき

$$P_{max} = K_3 W \cos(\alpha + \beta)$$

$$S_{D(n)} = K_4 W \sin(\alpha + S\beta)$$

$$+ S_r \left(1 - \frac{P}{P_{max}} \right) \left(1 - \frac{\alpha}{90} \right) (1 - K_7 |\lambda|)$$

(6)

ここに, λ は荷重差率, S はすべり率, β は荷重差率による偏位角で $\beta \approx 18 |\lambda|$ (度), K_7 は係数でほぼ 0.70 である。

ここで, 計算値の変動を調べるために今回の実験中で最大荷重差率の場合を計算すると次の通りである。(6)式の $K_3 = K_4$ は荷重差率によってそれほど変化しない値であるので 0.70 とする。またけん引負荷が駆動軸中央にあるので(5)式が適応するものとする。

$$\lambda = 0.462 \text{ の場合} \quad \beta = 8.3^\circ, \cos \beta = 0.9894$$

$$\frac{N}{W} L = 0.159L$$

$$\lambda = -0.350 \text{ の場合} \quad \beta = 6.3^\circ, \cos \beta = 0.9939$$

$$\frac{N}{W} L = 0.160L$$

前項(a)の結果では, $\lambda=0$ の場合 $\frac{N}{W} L = 0.161L$ であるから, この計算結果からみて, 荷重差率による $\frac{N}{W} L$ の値の変化はわずかで一定とみなしてもよい。すなわち, (5)式を用いた計算結果は第3図のけん引点車軸中央

および第5図の実線で示され実測値とよく合っている。
 第5図は $\frac{P}{W} = 0.20$ の場合を代表に示してあり、い
 ずれも荷重差率による影響はあまり見受けられない。

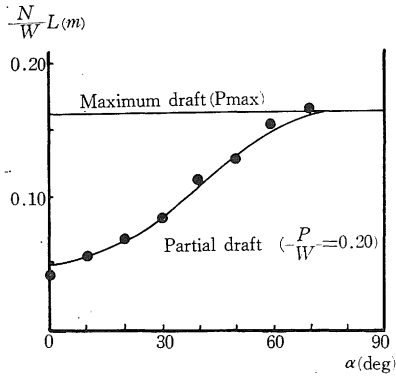


Fig. 5 Relation between coefficient of turning moment and deflection angle (α) at the ordinary pull and no weight difference.

2. けん引点が側方偏心する場合

この場合のけん引力、押圧力は次のように表わされる。⁽⁶⁾

$$\left. \begin{aligned} P_{max} &= K_3 \cos(\alpha + r) \\ S_{p(n)} &= K_4 \sin(\alpha + Sr) \\ &\quad + Sr \left(1 - \frac{P}{P_{max}} \right) \left(1 - \frac{\alpha}{90} \right) \\ S_{p(max)} &= K_4 W \sin(\alpha + r) \\ r &= 18 \lambda p \\ \lambda p &= \frac{l' + \lambda}{1 + \frac{l'}{l} \lambda} \end{aligned} \right\} (7)$$

ここに、 r はけん引点側方偏心偏位角で、内側偏心の場合は正、外側偏心の場合は負である。 K_3, K_4 は第6図に示すように $l' = 80mm$ のとき 0.680 , $l' = 150mm$ のとき 0.660 で、偏心量の増加とともに低下した。

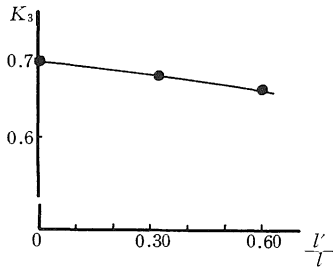


Fig. 6 Relation between coefficient of adhesion K_3 and eccentric ratio.

緒論で述べたように、この場合は前節におけるように

簡単な計算で *weight transfer* を求めることはできない。

すなわち、けん引点が側方に偏心する場合は偏心したけん引力によって水平面上のモーメントが発生し、実測される有効けん引力 P_s は、トラクタに作用する車輪面方向のけん引力 P_0 より大きい値となる筈である。そこで、 P_s を P_0 と M とに分解しトラクタに作用する力を模式的に書き改めると第7図のようになる。

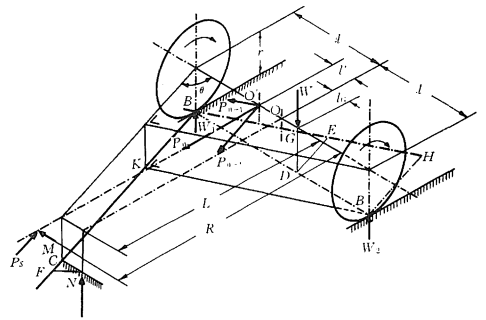


Fig. 7 Schema of actual force on the tractor.

いま、 N 点 (*weight transfer* の測定点) を通り車軸に平行な線と車輪回転面方向のけん引線との交点を C とする。 B (内側車輪接地点) と C とを結び車軸の地表面への投影線 BB' との間にはさまれた角を θ とする。 B' から BC に垂線をおろしその足を K とする。 P_0 および M を $B'K$ と BC の方向に分け、それぞれの分力を P_{0-1}, P_{0-2} および M_1, M_2 とすると幾何学的に次の関係がある。

$$\left. \begin{aligned} BC &= \sqrt{(l-l')^2 + L^2} \\ \sin \theta &= \frac{L}{\sqrt{(l-l')^2 + L^2}} \\ \cos \theta &= \frac{l-l'}{\sqrt{(l-l')^2 + L^2}} \\ BE &= (l+lG) \sin \theta = \frac{L(l+lG)}{\sqrt{(l-l')^2 + L^2}} \\ B'K &= 2l \sin \theta = \frac{2lL}{\sqrt{(l-l')^2 + L^2}} \\ FN &= l' \sin \theta = \frac{l'L}{\sqrt{(l-l')^2 + L^2}} \\ P_{0-1} &= P_0 \cos \theta = \frac{P_0(l-l')}{\sqrt{(l-l')^2 + L^2}} \\ P_{0-2} &= P_0 \sin \theta = \frac{P_0 L}{\sqrt{(l-l')^2 + L^2}} \\ M_1 &= M \sin \theta = \frac{ML}{\sqrt{(l-l')^2 + L^2}} \end{aligned} \right\} (8)$$

$$\left. \begin{aligned} M_2 &= M \cos \theta = \frac{M(l-l')}{\sqrt{(l-l')^2 + L^2}} \\ &= \sqrt{(l-l')^2 + L^2} + \frac{l'(l-l')}{\sqrt{(l-l')^2 + L^2}} \\ \overline{DE} &= (l+lG) \cos \theta = \frac{(l-l')(l+lG)}{\sqrt{(l-l')^2 + L^2}} \\ \overline{B'H} &= 2l \cos \theta = \frac{2l(l-l')}{\sqrt{(l-l')^2 + L^2}} \\ \overline{BF} &= \overline{BC} + \overline{CF} \end{aligned} \right\}$$

ここで，直線 \overline{BC} 回りのモーメントの平衡から

$$W \overline{BE} - W_2 \overline{B'K} - P_{0-1} r - M_1 r - N \overline{FN} = 0 \quad (9)$$

また， B を通り $\overline{B'K}$ に平行な直線 \overline{BH} に B' からの垂線をおろしその足を H とし，直線 \overline{BH} の回りのモーメントの平衡から

$$W \overline{DE} - W_2 \overline{B'H} + P_{0-2} r - M_2 r - N \overline{BF} = 0 \quad (10)$$

(8)，(9)，(10)式から

$$W_2 = \frac{l+lG}{2l} W - \frac{P_0 r}{2L} - \frac{M r}{2l} \quad (11)$$

$$\frac{N}{W} L = \frac{P_0 r}{W} \quad (12)$$

$$W_1 = \frac{l-lG}{2l} W - \frac{P_0 r}{2L} + \frac{M r}{2l} \quad (13)$$

(11)，(12)式から W_1 ， W_2 はけん引点の側方偏心によって発生する力 M によって左右駆動輪にかかる荷重は変化するが，他方回転モーメント係数は(5)式に示されたと同じ式となり，偏心によって影響されないことがわかる。

ここで，(3)，(4)式より計算される実測けん引力 P_s から車輪回転方向けん引力 P_0 を計算する。車軸中央点 O まわりの水平面上でのモーメントは，けん引力 P_0 を発生するための W_1 ， W_2 の各車輪の分担けん引力をそれぞれ P_{w-1} ， P_{w-2} とし， M の発生する位置は車軸から R の位置にあるとすると

$$\left. \begin{aligned} Pl' - MR + (P_{w-2} - P_{w-1})l &= 0 \\ M &= \frac{1}{R} \{Pl' + (P_{w-2} - P_{w-1})l\} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

P_0 の分担けん引力 P_{w-1} ， P_{w-2} については， P_s における場合の分担割合とほぼ等しいと仮定すると，次のように表わされる。

$$\left. \begin{aligned} P_{w-1} &= \frac{P_0}{2} - \frac{1}{2(1+K_5)} (A - K_6 \lambda_p W) \\ P_{w-2} &= \frac{P_0}{2} + \frac{1}{2(1+K_5)} (A - K_6 \lambda_p W) \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

ここに， A は左右駆動輪の駆動力差でほぼ $0.82 \lambda_p W$ ， K_5 はけん引力発生のための車輪の摩擦等による損失の係数でほぼ 0.040 ， K_6 はころがり抵抗係数でほぼ 0.040 である。(14)式を(15)式に代入して

$$\left. \begin{aligned} M &= \frac{1}{R} \left\{ P_0 l' + \frac{1}{1+K_5} (A - K_6 \lambda_p W) \right\} \\ &= \frac{1}{R} \{ P_0 l' + 0.75 \lambda_p W \} \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

1.(b)項から，車輪の荷重差率 λ による $\frac{N}{W} L$ の変化はほぼ一定とみなされるから，計算を容易にするために $\lambda=0$ の場合について検討しても誤りは少ない。(7)式に $\lambda=0$ を代入すると $\lambda_p = \frac{l'}{l}$ ，さらにこの式を(16)式に代入すると

$$M = \frac{1}{R} \{ P_0 l' + 0.75 l' W \} \quad (17)$$

すなわち，トラクタは M なる力を受け水平面上で旋回しようとする。しかしながら，トラクタが旋回せず一定の方向へ走行するためには，この力をけん引負荷と押圧力で受け持たねばならない。けん引負荷，押圧力がこの力を等分に負担するとすれば

$$\left. \begin{aligned} P_s &= P_0^2 + \left(\frac{M}{2} \right)^2 \\ P_0 &= \sqrt{P_s^2 - \left(\frac{M}{2} \right)^2} \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

(17)式と(18)式から

$$\left. \begin{aligned} \sqrt{P_s^2 - \left(\frac{M}{2} \right)^2} &= \frac{MR}{l'} - 0.75 W \\ \left\{ \left(\frac{R}{l'} \right)^2 + 1 \right\} \left(\frac{M}{W} \right)^2 - 3.00 \frac{R}{l'} \frac{M}{W} + 2.25 \\ &- 4 \left(\frac{P_s}{W} \right)^2 = 0 \end{aligned} \right\}$$

$\frac{M}{W} =$

$$\frac{3.00 \frac{R}{l'} \pm \sqrt{9.00 \left(\frac{R}{l'} \right)^2 - 4 \left\{ \left(\frac{R}{l'} \right)^2 + 1 \right\} \left\{ 2.25 - 4 \left(\frac{P_s}{W} \right)^2 \right\}}}{2 \left\{ \left(\frac{R}{l'} \right)^2 + 1 \right\}} \quad (19)$$

(19)式から $R=700\text{mm}$ として $l'=80\text{mm}$ ， 150mm についてそれぞれ $\frac{P_s}{W} = 0.680$ ， 0.660 を代入して $\frac{M}{W}$ を計算すると

$$\left. \begin{aligned} l'=80\text{mm} \text{ のとき} & \quad \frac{M}{W} = 0.081\text{m} \\ l'=150\text{mm} \text{ のとき} & \quad \frac{M}{W} = 0.150\text{m} \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

ただし、(9)式の解で負の符号は $\frac{M}{W}$ が非常に小さい値となるので、この場合には適しない。(10)式を(9)式に代入すると、 $l'=80mm, 150mm$ のときそれぞれ $P_0=0.675, 0.643$ となる。この結果を(10)式に代入して回転モーメント係数を計算すると、それぞれ $\frac{N}{W}L=0.155m, 0.148m$ となり第3図のけん引点の側方偏心の実験結果とよく一致した。また部分けん引負荷についても(3)、(7)式から P_s を求めることにより、第8図に示すように $\frac{N}{W}L$ はよく一致した。

以上のことから、けん引点が偏心する場合の *weight transfer* は、実測される有効なけん引力よりやや小さいけん引力により引き起こされることがわかる。

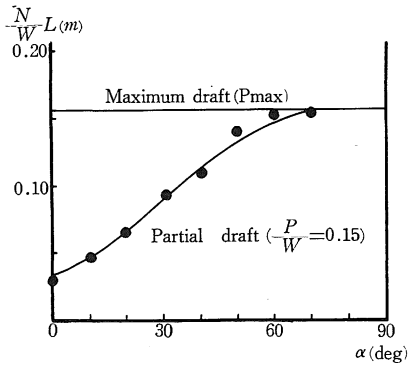


Fig. 8 Relation between coefficient of turning moment and deflection angle at the offset pull ($l'=80mm \lambda=0.215$).

V. 結 び

(7)式で $l'=0$ とすると $M=0$ で(9)式より $P_0=P_s$ となる。また、(10)式から $\frac{N}{W}L = \frac{P_s}{W\tau}$ となり、けん引点車軸中央の場合の(5)式となる。これらの式は実験結果から見ると、荷重差率による影響が少ないので側方偏心の場合も $\lambda=0$ の条件のもとに計算できる。

すなわち、けん引力 P と押圧力 $S_{p(n)}$ の実験式から車輪回転面方向のけん引力 P_s を計算し、トラクタの *weight transfer* を引き起こすけん引力 P_0 を算出することによって $\frac{N}{W}L$ は実測値とよく一致する。

以上のことからトラクタのそれぞれの条件に応じたけん引負荷の大きさを計算すれば、(10)式によって *weight transfer* が計算される。

二輪トラクタは *weight transfer* によって駆動輪荷重がそれだけ減少してけん引力は低下し、また、その *weight transfer* の量はハンドルにかかるので手でさええねばならないから、けん引負荷に応じてあらかじめトラクタの前方にそれだけのおもりを乗せておかねばならない。後二輪駆動のトラクタは前輪荷重が少なくなり、後駆動輪に荷重が加わる。また側方けん引の場合は、(7)~(10)式で示されるように、実けん引力より少ない力が *weight transfer* に作用する。すなわち、これらの *weight transfer* の量はけん引点中央のとき最大で、側方けん引になると減少するので、(10)式で示されるその最大値をあらかじめ知ることによって、トラクタの重量配分をより正しく、より安全に設計することができる。

引用文献

1. 田辺一・岩尾俊男・中尾清治：農業機械学会誌 28 : 136-140, 1966
2. 田辺一・中尾清治：農業機械学会誌 29 : 186-193, 1968
3. 田辺一・中尾清治：農業機械学会誌 30 : 投稿中 (第3報) 1968
4. 田辺一・中尾清治：農業機械学会誌 30 : 投稿中 (第4報) 1968
5. 田辺一・中尾清治：農業機械学会誌投稿中(第5報)
6. 田辺一・中尾清治：農業機械学会誌投稿中(第6報)
7. 田辺一・中尾清治・細越俊雄・斉藤正昭・森山国久：農業機械学会関西支部報 25 : 51-53, 1968

Summary

We studied on the quantity of weight *weight transfer* of tractor, pulling load by the method of offset pull, especially, having weight difference on the each side wheel and yet deflection angle for travelling direction. The results are as follows ;

(1) *Weight transfer* is not so influenced from the weight difference, but is influenced from the traction force along the center line of tractor.

(2) When the hitch point is eccentric from the center of driving shaft, *weight transfer* can be also calculated with the same equation above. But in this case, we must use the smaller value than the actual force, because it is influenced from the turning moment of tractor caused by the eccentricity of load.

These results may be useful for design and operation of tractor.