

トラクタ作業の操縦量について(第1報)

トラクタの走行, 耕うん時の操舵力

遠藤 俊三・西村 功*
笹尾 彰・今井 康弘**

On the Steering Labor of Tractor Operator (I)

Steering force during transport and field operation

Shunzo ENDO, Isao NISHIMURA,
Akira SASAO, Yashuhiro IMAI

The tests were conducted in order to find the characteristics of the steering force of the tractor while running on the asphalt pavement and tilling the field by rotary tiller.

Changing conditions of the tests—vertical loads on the front axle, tractor speeds and the operators—, we measured the horizontal displacement, the real forward angle of front wheels, the steering angle and the steering force under testing.

1. The relation ship between the steering force and the accumulated frequency number (the A. F. N) of the force was quadratic, and the A. F. N was generally numerous under smaller steering force.

When the front load was lighter, the steering force was larger and the number was smaller under condition of fixed handle, and this tendency became reverse during operation. The above mentioned were affected by the tractor speeds and operators.

In the case of tilling, the steering force and the number increased to nearly 3 times the values in the running on the asphalt pavement.

2. The relation ship between the steering horse-power and its relative frequency was hyperbolic, and the latter decreased with the increase of the former. The maximum value of the steering horse-power in the tilling was recorded at 0.003 PS being nearly 6 times in the running on the asphalt pavement.

3. The steering labor per unit time decreased, as the front load became lighter and the working speed slower.

The steering labor per unit running distance hardly changed in spite of the change of the working speed.

In the case of tilling, the steering labor per unit tilling distance was larger by 30 to 40 times than in the running on the asphalt pavement.

I. ま え が き

トラクタの直進作業は、一般に実作業を行なう行程が多く、その直進の良否は作業精度に影響するため、オペレータは常にトラクタの操縦に気をくばり、トラクタのハンドルを保舵しあ

*神戸大学農学部 **岡山興陽高校

るいは操舵を加えることが多い。普通、トラクタの直進作業では保舵という言葉を使用するが、広義には保舵は操舵の一部という解釈ができるので、以下操舵という言葉を使用する。

しかし、この操舵の程度はトラクタのもつ操向機能、オペレータの熟練程度、さらに圃場内外の凹凸などの外的攪乱条件によって変動するもので、その内容は複雑である。

ここでは、トラクタ直進作業時におけるオペレータの操舵に要する仕事量を明らかにするため、トラクタの前後輪荷重、作業速度、操舵法およびオペレータの諸条件をかえ、横変位、実舵角、操舵角、操舵トルクの測定を行ない、これより操舵力の特性を知ることにつとめた。この実験の遂行には須藤繁雄技官に多大の協力を得たので、ここに深謝する。

II. 実験方法

1. 供試トラクタおよび作業機

トラクタはシバウラ S-1100 ホイールトラクタを用い、供試時の主な諸元は全長 2695 mm, 全巾 1400 mm, 全高 1700 mm, 軸距 1530 mm, (前輪) 輪距 1140 mm, タイヤ 4.00-15.4 PLY, 空気圧 2 kg/cm², (後輪) 輪距 1250 mm, タイヤ 8.3/8-24.4 PLY, 空気圧 1 kg/cm², 最大出力 19/2400 ps/rpm であり、また作業機はシバウラ製ロータリ SRD-5, 直結セントドライブ形, 耕巾 1350 mm, 爪本数 36 本, 重量 269 kg である。

2. 実験装置

トラクタ単体およびロータリ装着状態で、操舵トルク、操舵角、実舵角、横変位が測定できるようにトラクタに次の通りの装置をほどこした。

操舵トルク、操舵角の測定には、新興通信工業製操舵力角計を使用した。この定格容量は操舵力 0 ~ 20 kg-m, 操舵角 360° × 3, 舵輪直径 425 mm で、トラクタのハンドル上に直接取付金具で第 1 図に示すように取付けた。

実舵角の測定は、東城計測器製捲線形抵抗変位形を用い、スチールベルトの伸縮により、キングピンの回転角を測定できるようにした。

トラクタの走行、耕うん時の横変位の測定には、トラクタに容量 30 ℓ, エア・コンプレッサで 2 ~ 4 kg/cm² に加圧できる加圧水用タンクを塔載し、これよりゴムホースによってトラクタ前部および後部に取付けたノズルに導き水または着色液を噴出させ路面上に走行残跡を画くようにした。実験の内容によってノズル位置は変えるようにした。

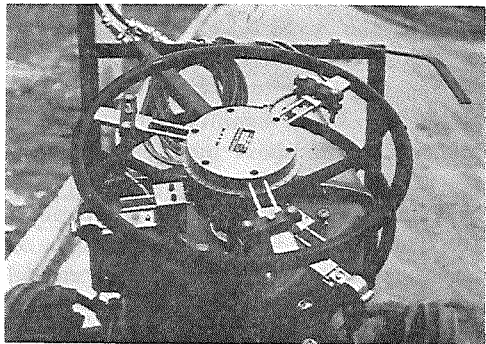
トラクタの滑り率の測定には、トラクタの前輪、後輪の中間に自転車後輪改造によるゲージ・ホイールを取付け、滑り率をえる基準とした。

第 2 図には供試トラクタの寸法、重量配分、重心位置および残跡用ノズル取付位置を示す。

3. 実験場所

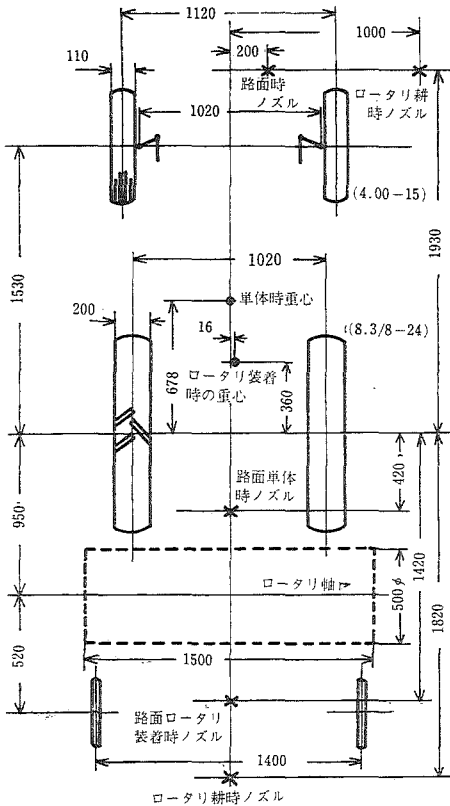
実験場所には岡山大学農学部のアスファルト路および飼料圃、苗圃を用いた。

1) アスファルト路



第 1 図 操舵力角計の装着状況

条件	項目	前輪	後輪	前輪/全重×100
トラクタ単体時重		445 kg	550 kg	44.7%
トラクタロータリ時重		300	964	23.7%



第2図 供試トラクタの寸法および条件

トラクタの走行には道路中央部を用い、測定距離は50 mにとり、測定開始および終了点には石灰により中央位置に目標ラインを入れた。路面は任意選定したもので、その平坦度は±3 cmで比較的平坦であったが、とくに測定開始位置より20 m附近に起伏がみられた。

2) 圃場

圃場1：飼料圃を用いたが熟畑でなく石礫を含む花崗岩質砂壤土で、前日浅くロータリ耕を行なった既耕地を用いた。したがって、碎土耕うんの実験とした。実験時の土壌含水比は7.8~15.9%，平均11.9%で、土壌抵抗はSR-II型土壌測定器の小矩形板で5 cm沈下0.6 kg/cm²、10 cm沈下1.6 kg/cm²であった。

圃場2：砂壤土の苗圃を使用し、圃場1と同様、均平にするためロータリ耕を前日にかけての既耕地とした。実験時の土壌含水比は8.3~12.1%，平均9.8%，土壌抵抗は5 cm沈下で0.6 kg/cm²、10 cm沈下で1.2 kg/cm²であった。

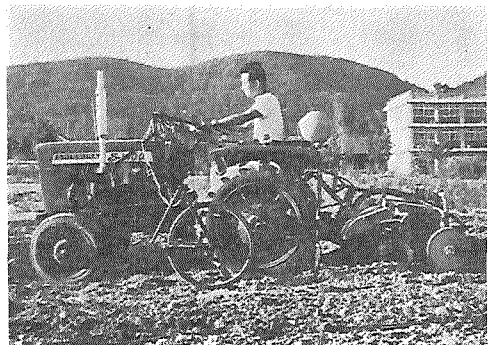
4. 実験区分および測定法

実験区分は、アスファルト路、圃場1で操舵法としてハンドル固定の場合、ハンド

ル手ばなしの場合およびハンドル操舵の場合を、トラクタの作業条件としてトラクタ単体とロータリ装着の場合、作業速度を1, 3, 4速に変えて実施した。ただし、圃場の作業のみは1速に限り、ハンドル操舵の場合のみとし作業者3名が加わった。圃場2では普通の往復連接耕を行ない作業速度は2速とし作業者4名があつた。実験状況の1例を示すと第3図の通りである。

1) ハンドル手ばなしおよびハンドル固定の場合

アスファルト路におけるハンドル手ばなしの場合は、トラクタの任意アスファルト路面での直進性をみるため、操舵システムに人為的な力を加えない状態で、また、ハンドル固定のときはハンドル角が一定で実舵角の遊びの範囲の規制によって走行する状態である。したがって、ハンドル手ばなしでは、路面によっておこる横変位と実舵角、保舵角の関係を、



第3図 実験中の状況

ハンドル固定では横変位と実舵角，保舵トルクとの関係を測定する．ハンドル固定法は，操舵力角計の舵輪をトラクタ本体の一部につけたアングルに固定した．

2) 操舵を加える場合

目標に向かって50m間を直進しようとする作業者が感覚的に操舵を加えるときの操舵トルク，操舵角，横変位を測定した．圃場1，2ともロータリ耕では直進方向のめやすとして側方に白線を入れた．

3) トラクタの前輪荷重

アスファルト路においてトラクタ単体，ロータリ装置の場合について試験したが，このときの前輪分担荷重は第2図のようにトラクタ単体445kgに比してロータリ装着では300kg(約2/3程度)に変わっている．また前輪分担荷重割合もトラクタ単体で約45%，ロータリ装着で約24%とロータリ装着ではかなり前輪分担荷重は小さい状態であった．

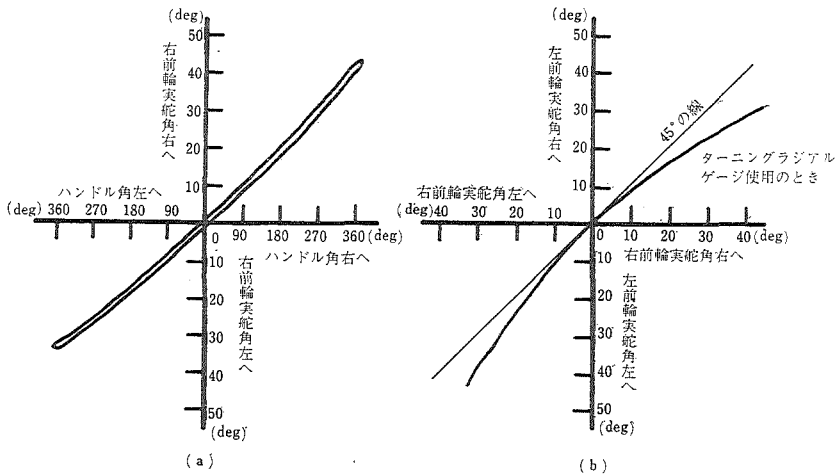
4) 作業速度

アスファルト路ではエンジン回転数を標記回転数2000rpmとして試験を進め，変速位置を1速，2速，3速にかえ，作業速度を0.3~1.8m/secの範囲で行なった．圃場1では1速，圃場2では2速とした．

III. 試験結果および考察

1. トラクタのハンドル角と実舵角との関係

操向系統には，いくらかの遊びが含まれ，また，操舵力がかかるときは弾性変形が起こるが，いま，供試トラクタのハンドル角と右前輪実舵角との関係をターニング・ラジアル・ゲージを使用して測定した結果をみると第4図aの通りである．



第4図 供試トラクタのハンドル角と実舵角との関係

ハンドルを右回しからはじめ，右360°をこえる位置で左回りにかえ，中心位置をこえ，さらに左回りを進め左360°をこえる位置で右回りにして中心位置にもどし，この間90°おきにハンドル角と実舵角の関係を図示したもので，これより履歴曲線の左右のずれはハンドルを回転するときの遊びを表わす．この遊びの角度比=ハンドル角/実舵角は左右前車輪で，またハンドル角の大小によって異なるが，供試トラクタでは角度比=10となった．

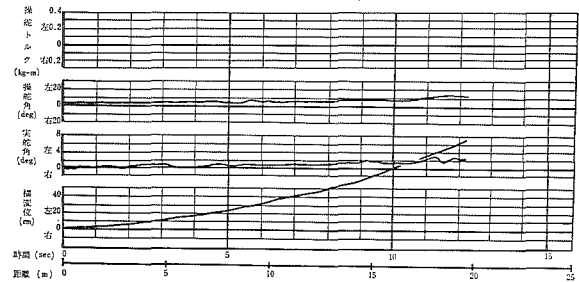
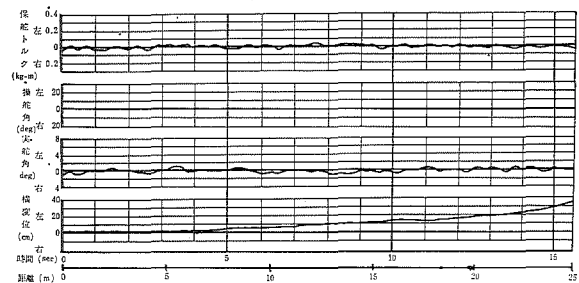
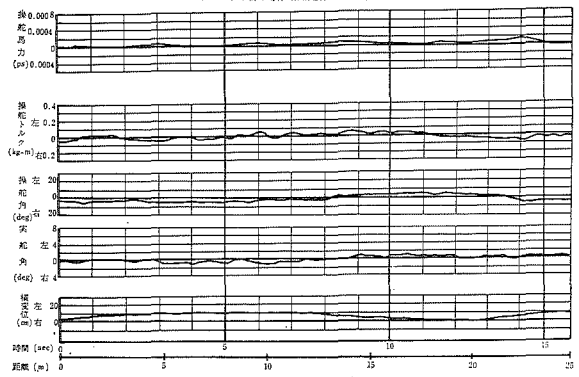
また、供試トラクタの左右前輪の実舵角の関係は第4図bの通りである。45°線に対して実線が前輪荷重のかかったときの関係を示すもので、ハンドル角の移動による左右前車輪の実舵角が異なる。したがって、この実験で実舵角という場合は右実舵角を示す。

2. 操舵の状況

1) ハンドル手放しの場合

アスファルト路面において、トラクタをハンドル手放しで走行させると路面の凹凸あるいは起伏によって横変位をおこす。これは自由にされた操向系統が復原トルクによって動揺しながら横変位をおこすもので、このとき前輪のキングピン軸回りの角運動はリンゲージおよび操向歯車をかいして増巾されメインシャフトの先端のハンドルに伝わる。このハンドル手放しはトラクタ操縦の1つの理想ではあるが、現実的ではない。ハンドル手放しをハンドル操縦時の資料として実験に加えたが、ここで変速位置4速、作業速度1.62 m/sec の場合を例示すると第5図aの通りである。ロータリを装着し、前輪荷重が小さくなった場合で、路面の起伏によって左に横変位をおこし、これにともなって実舵角、ハンドル角が変動する。実舵角は路面の起伏によって直接応答するが、ハンドル角は操舵系統の遊び、摩擦などによって、こきざみな変動がなく、かんまんに伝達される。

トラクタ単体のときは、前輪荷重が増すので実舵角、ハンドル角のこきざみな変動がロータリ装着の走行時より増す。これらの現象はハンドル手放しに共通している。



第5図 トラクタ片運転時の横変位、実舵角、操舵角、操舵トルクおよび操舵力の変化例【ロータリ装着】

2) ハンドル固定の場合

ハンドルを固定しアスファルト路面を走行するときは、路面起伏による実舵角変位が操向系統の遊び、摩擦、剛性のゆるす範囲で変動する。第5図bはこの例を示すが、ハンドル手放しの場合と同じオペレータが、同作業速度で走行した結果で、これより横変位は少なくなっている。これは操行系統の弾性などの影響をうける結果とみられる。ハンドル手放しのときに比し、実舵角はこきざみな変化が増大する。

3) ハンドル操舵の場合

(1) アスファルト路面走行

トラクタの直進走行では、オペレータが路面の起伏に応答して横変位がおこるときにハンドルにかかる力を保舵しようとする場合と、オペレータの操縦感覚によって横変位をおこし、これを修正しようとハンドルに操舵を加える場合とがある。前者はハンドル固定の実験でその状況を考察することができるが、実際場面ではこの両者が同時に起る。

オペレータの操縦感覚からみれば、①トラクタの変位や目標に対しての偏角に敏感で目標進路に近接して直進または小蛇行しながら目標に近づくと、②トラクタの変位や偏角にやや敏感をかくが、目標進路に沿って蛇行しながら目標に近づくにつれて蛇行が減衰するとき、③トラクタの変位や偏角に対する反応が鈍く目標進路からしだいに離れ、目標に近づくにつれて修正し目標進路に近接するときなどそれぞれオペレータによって異なる。この実験に加わったオペレータA, B, Cは上記①, ②, ③の順の傾向をそれぞれ持っている。

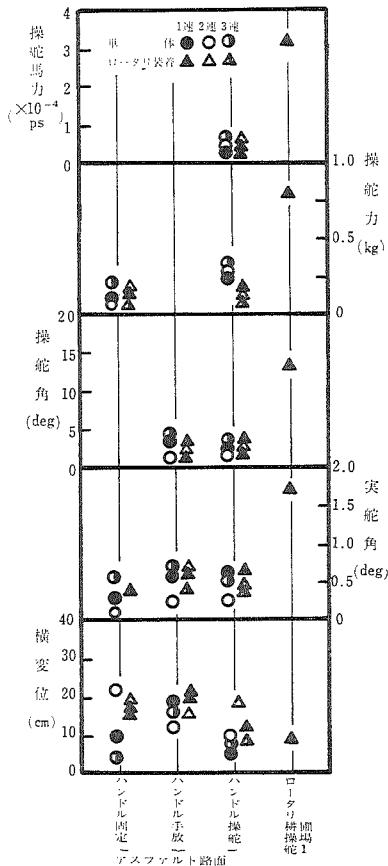
いま、アスファルト路面走行におけるハンドル操舵の例をみれば第5図cの通りである。トラクタをはじめ横変位があり、これを修正し直進走行を持続しようとして小蛇行しながら前進している。これに対して実舵角、操舵角はこきざみな変動をおこしながら右から左にと偏角を持つ。また、ハンドル操作により舵角を変化させた場合、操向系統の遊び、摩擦および剛性によって実舵角への応答は時間的ずれがでる。

(2) ロータリ耕

耕うん作業における操舵の状況を例示すれば第5図dの通りである。横変位の記録で実線は両後輪の中央を、点線は両前輪中央の残跡から求めた軌跡である。実舵角、操舵角、操舵トルクはアスファルト路面走行の場合よりはるかに大きい値を示し、またその回数も多くなる。

3. 操舵の数値的比較

アスファルト路におけるハンドル固定、ハ



第6図 各直進と平均の横変位、実舵角、操舵角、操舵力、操舵馬力。

ンドル手放し、ハンドル操舵による自走およびロータリ耕において、トラクタの前輪荷重、作業速度、直進法およびオペレータによる操舵特性を横変位、実舵角、操舵角、操舵馬力の平均値から比較すると第6図の通りである。

1) 直進法の影響

横変位はハンドル固定あるいは手放しにするよりもハンドリ操舵による自走あるいは耕うんの場合に小さい。当然3名のオペレータとも同様の傾向を示す。

実舵角、操舵角の変動は、アスファルト路でのハンドル手放し、ハンドル操舵が同程度であるが、ロータリ耕においては自走の場合に比して4～5倍のハンドル角変位を必要とする。また、ハンドル固定のような特殊な状態では、実舵角はハンドルの遊びの範囲にあって角変位は小さい値を示す。

操舵力はハンドル固定の場合も操舵を加えた場合もその力は数値的には大きい変動がみられない。ただ、ロータリ耕のときは操舵力の平均値からみても数倍の力となる。したがって、操舵馬力でみるとその値に開きが大きくなる。

2) 前後輪荷重の影響

アスファルト路面の自走の場合、単体の場合とロータリ装着のときのように前後輪荷重が変ることによってハンドル操作に影響がある。トラクタの全重量に対する前輪荷重の割合は単体の場合35～45%とみられるが、供試トラクタでは44.7%と比較的前輪荷重が大きい。これにロータリを装着したとき前輪荷重割合は23.7%に減少している。この影響は、全般にロータリ装着によって前輪荷重を軽減すると横変位は大きい値を示し、実舵角、操舵角においては、その影響は少なく、操舵力は小さい値となる。このことは操舵馬力を小さくする。

さらに、トラクタが路面の起伏によってかく乱をうけ、姿勢角が左回りに 4θ だけ変化し、トラクタの重心はそのまま直進を持続するものとして考察する。この場合、対地右横すべり角を 4β とすれば $4\beta=4\theta$ で運動することになる。またトラクタ作業は低速であるので空気抵抗を省略して考える。トラクタの重心まわりに働くモーメントは次のようになる。

前輪のコーナーリング・フォースによるモーメント

$$-2K_r \cdot 4\beta \cdot \ell_1 \quad (\cos 4\beta = 1 \text{ と仮定})$$

後輪のコーナーリング・フォースによるモーメント

$$2K_r \cdot 4\beta \cdot \ell_2$$

前輪のころがり抵抗によるモーメント

$$-U_r \cdot W_1 \cdot \ell_1 \cdot 4\beta$$

後輪に作用する駆動力は空気抵抗を省略すれば、前輪のころがり抵抗に釣合い、そのモーメントは

$$-U_r \cdot W_1 \cdot \ell \cdot 4\beta$$

したがって静的復原モーメント $4M$ は次式で示される。

$$4M = \{2(K_r \ell_2 - K_r \ell_1) - U_r W_1 \ell\} 4\beta$$

ここに K_r : 前輪のコーナーリングパワー

K_r : 後輪のコーナーリングパワー

U_r : ころがり抵抗係数

W_1 : 前輪荷重

ℓ : 前後輪間の距離(軸距)

ℓ_1 : 前軸輪と重心との水平距離

ℓ_2 : 後軸輪と重心との水平距離

一般に静的方向安定の条件としては、ここで正の右横すべり 4β に対して正の右回りモーメント $4M$ が生ずる $4M/4\beta > 0$ の場合である。したがって方向安定のためには K_r を大きく、 K_f を小さくするか、重心位置を前にすることが必要である。しかし、 K_r 、 K_f はタイヤの種類、形式、空気圧に関係し、この実験では一定としている。次にロータリを装着させ重心位置を後にすることはトラクタ単体の場合に比して方向不安定となる。また前輪荷重を軽くすることは方向安定をよくすることになり、トラクタにロータリを装着させる場合は方向安定性を増減する両要因があるとみられる。

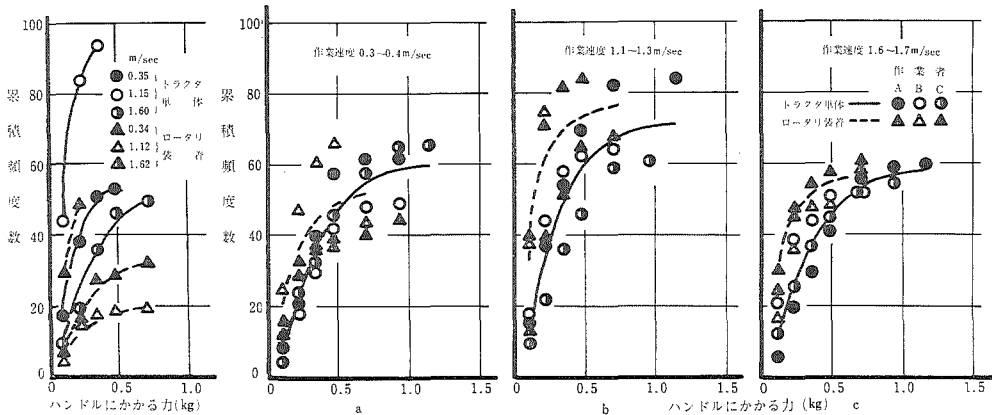
4. 操舵力とその頻度

トラクタの直進作業において、オペレータはできるだけ操舵を加えることなく軽く保舵するだけで作業が進められることが望ましいが、これには操舵力の強弱とその頻度の多少が関係する。これには、オペレータの熟練程度あるいは路面の起伏、凹凸の程度によって変ることはいうまでもない。そのほかトラクタの操向系統特性、タイヤおよび操向系統の共振などによる振動特性にも影響を受ける。

いま、トラクタに操舵を加えないで、路面の起伏によってハンドルに伝達される力とその頻度を知るためにハンドルを固定したときの操舵力とその頻度の関係をみると第7図の通りである。累積頻度数は50m間にハンドルにかかる力を階級別にその頻度を調査し、これを累積で示したもので、操舵角 0° を中心にして左右に繰返される操舵力の数値で頻度をよんでいる。図のようにハンドルにかかる力と累積頻度との間には曲線的関係を示し、ハンドルにかかる力が小さいものの頻度数は多い。

トラクタ単体では、ロータリ装着のときに比して、一般にハンドルに与える力の頻度数は大きく50m間に50~95回、ロータリ装着で20~50回の範囲、ハンドルにかかる力はいずれも0.7kg以下であった。このようにアスファルト路面において、前輪荷重の増減はハンドル固定のときにも影響し、ロータリ装着によってハンドルにかかる力の累積頻度数は少なくなる。

つぎに、50m間、操舵を加えたアスファルト路面での直進走行では、第8図に示す通り作業速度別にa、b、cで表わされる。オペレータによって多少の変動がみられるが、一般に頻



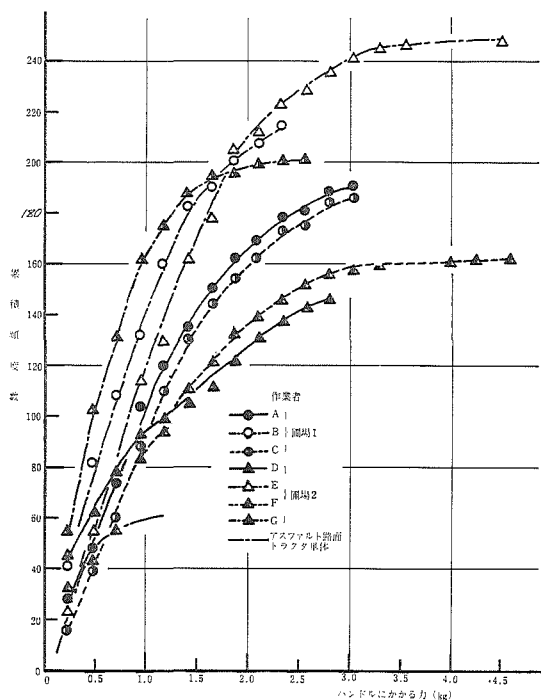
第7図 アスファルト路、ハンドル固定直進作業時のハンドルにかかる力と累積頻度との関係 (50m間)

第8図 アスファルト路直進作業時のハンドルにかかる力と累積頻度との関係 (50m間)

似した傾向を示し、トラクタ単体のときとロータリ装着のときを比較すると、トラクタ単体の走行ではハンドルにかかる力が 1.2kg 以下、ロータリ装着では 0.7kg 以下となり、ロータリ装着ではハンドルが軽いことを示す。また、b図で累積頻度数が大きくなっているのはトラクタ操向系統の特性あるいは振動特性によるものと推察される。

さらに、ハンドル固定と比較すると、ロータリ装着のときは、ハンドル固定の累積頻度が小さいのに比してハンドル操舵では逆に大きい値を示し路面起伏からの応答による保舵より、オペレータの直進感覚から加える操舵が増大することを示している。

ロータリ耕の場合は、第9図のようにハンドルにかかる力、累積頻度数ともアスファルト路



第9図 ロータリ耕におけるハンドルにかかる力と累積頻度との関係(50m間)

面走行にくらべてかけはなれて大きくなる。普通の耕うん状態で最大 4.5kg の力をかけることもあり、その累積頻度数も $140\sim 245$ となり、アスファルト路面でトラクタ単体走行にくらべて、いずれも $2.5\sim 4$ 倍に近い。このためオペレータは路面走行にくらべてロータリ耕では直進を保持するためかなりの仕事を要求される。

5. 操舵馬力

オペレータがトラクタを操縦し、ハンドルを操作するために消費するエネルギーは、これを各瞬間ごとに考えると馬力で示され、これを操舵馬力とすれば次式で表わされる。

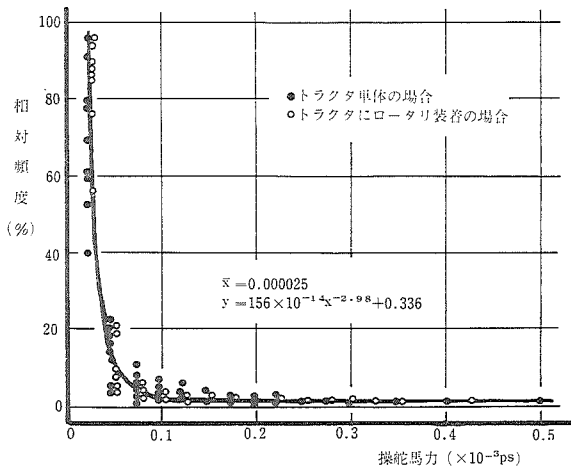
$$P_s = \frac{P_h \cdot r_h \cdot \omega_h}{75}$$

ここに P_s : 操舵馬力 (ps)

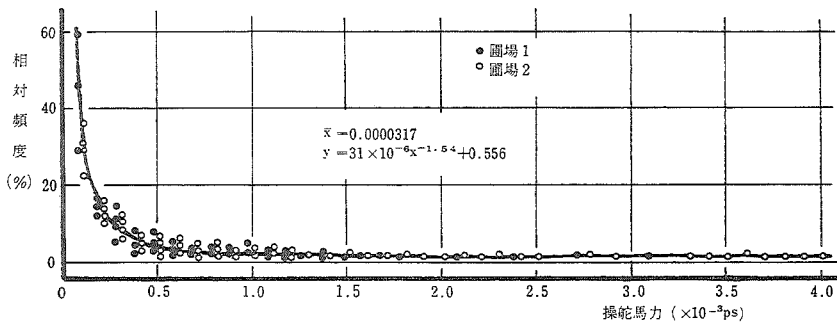
- P_h : 操舵力 (kg)
- r_h : ハンドル半径 (m)
- ω_h : ハンドル回転角速度 (rad/sec)

したがって、操舵力とハンドル角の時間的変化を同時に測定した結果から、ハンドル角曲線を図式に微分し、ハンドル角速度を算出して上式より操舵馬力を求め、例示すれば第5図c、dの通りである。操舵馬力が正となっているのは操舵角、操舵力が同方向で操舵を加えている状態を示し、負となっているのは操舵角、操舵力が反対方向になった場合で、ハンドルがもどろうとするのを手で押さえていることを示す。

トラクタがアスファルト路面走行のときとロータリ耕のときでは大きい差があり、操舵馬力とその相対頻度との関係を示すと第10図、第11図の通りであって、何れも双曲線的関係がみ



第10図 トラクタのアスファルト路走行時の操舵馬力の頻度

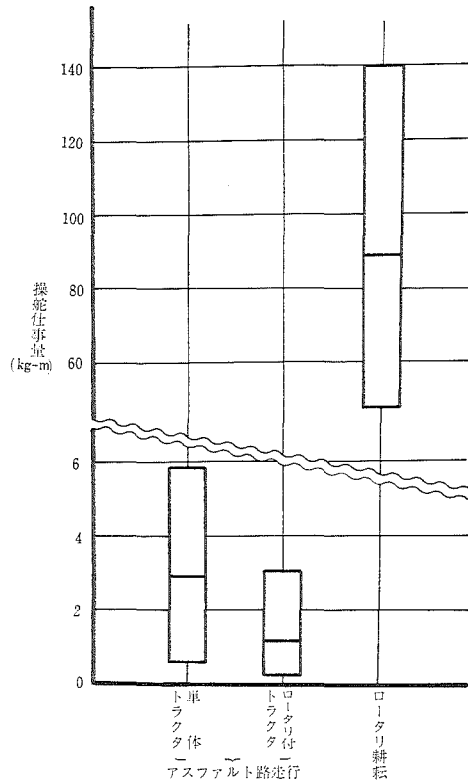


第11図 トラクタのロータリ耕における操舵馬力の頻度

られる。一般に操舵馬力が小なるときは相対頻度は大きく、操舵馬力の大きいときの相対頻度は小さくなる。アスファルト路面走行での最大操舵馬力は $0.0005 ps$ 、平均で $0.000025 ps$ で、この場合のハンドル回転の瞬間最大速度は $0.32 deg/sec$ 程度であるが、ロータリ耕においては最大操舵馬力は $0.004 ps$ 、平均で $0.00037 ps$ 、ハンドル回転最大角速度で $0.63 deg/sec$ となり、その両者には大きい開きがある。自動車では、操舵に困難を感じない限界操舵馬力を

0.25 ps¹⁾とみているが、これからすればトラクタの直進作業時の操舵馬力は小さい値で操舵に余裕のあることがわかる。

さらに操舵に要する仕事量を考察するために、いま1kmの距離を走行あるいはロータリ耕を行なったときの操舵に要するオペレータの仕事量を示すと第12図の通りである。



第12図 オペレータの1km当りトラクタ操舵仕事量

この仕事量はトラクタの前輪荷重、作業速度、路面状態あるいはオペレータによって変動するが、大体アスファルト路面では0.1~6kgmの範囲、ロータリ耕では50~140kgmとなっており、ロータリ耕での操舵に要する仕事量がかなり大きいことがわかる。

IV. 摘 要

1. トラクタのアスファルト路面走行および畑地ロータリ耕における操舵力を知るため、トラクタの前輪荷重、作業速度およびオペレータの諸条件をかえ、作業中のトラクタの横変位、実舵角、操舵角および操舵力を測定した。

2. ハンドルにかかる力とその累積頻度数との間には曲線的関係があり、ハンドルにかかる小さい力の頻度は一般に多い。前輪荷重を軽くした場合、ハンドル固定の走行ではハンドルにかかる力が大きく、累積頻度数は少なくなるが、ハンドル操舵の走行では逆にハンドルにかかる力が小さく、累積頻度数は多くなる。また、作業速度、オペレータによって影響を受ける。ロータリ耕においてはアスファルト路面走行に比してハンドルにかかる力および累積頻度は増加

し、3倍近くなる。

3. ハンドルにかかる力とハンドル回転角速度から求めた操舵馬力と相対頻度との間には双曲線の関係があり、操舵馬力の大きいときの相対頻度は小さくなる。ロータリ耕での最大操舵馬力は0.003 ps が記録され、アスファルト路面走行の場合と比して6倍近い。

4. 単位時間当りの操舵に要する仕事量はトラクタの前輪荷重が軽いとき、作業速度が低いときに少なくなる。作業速度が変動しても単位時間当りの操舵に要する仕事量は同じ程度となる。ロータリ耕での単位耕うん距離当りの仕事量は走行時のそれと比して30~40倍近い。

参 考 文 献

- 1) 山本峰雄・近藤政市・平尾 収・亘理 厚(1969)：自動車ハンドブック(6版), 440~443, 朝倉書店, 東京
- 2) 近藤政市(1956)：日本機械学会誌, 448, 370~375
- 3) Dupuis, H. (1959) : Agr. Eng., 40 (9), 510~519, 525