

傾斜地におけるトラクタの形態に関する研究 (2)

等高線方向に正置したトラクタの横滑り角

田 辺 一・中 尾 清 治*

Hajime TANABE and Seiji NAKAO

On the Dimensions of Tractor on the Slope Field (2)
Side Slip Angle of Tractor Keeping the Direction
to the Contour Line

緒 言

第1報では、等高線に正置したトラクタの使用上限傾斜角度を求め、土地（走行路面）に対する空気タイヤの粘着係数、けん引負荷によって、上限傾斜角度の変化する状態を考察した¹⁾。すなわち、同一圃場においても、けん引負荷によって、タイヤの横滑り抵抗力が変化し、その横滑り抵抗力が、土地の傾斜その他によるトラクタのサイドフォースに等しくなる角度をもって使用上限傾斜角度を定義した。

しかしながら、傾斜地においては、横滑りは、機体偏角によって半登坂の形で、駆動力の一部をこれに対抗させるので、トラクタのけん引力は減少し、運転操作も困難となる。よって、安定したけん引走行状態を維持するためには、必要なけん引力の発揮とともに、必要な傾斜上向き偏角を保たねばならないが、この必要にして充分な上向き偏角の角度を決める定説は未だ存在しない。

必要上向き偏角は、前輪かじ取り角によって与えられるが、本報告では、その手始めとして、かじ取り角を付けないトラクタが、安定して走行する必要上向き偏角の大きさを、タイヤの横滑り角度から推定する。

空気タイヤの横滑り角度の測定

まず、タイヤに加わるサイドフォースの大きさと、タイヤの横滑り角度の関係を調査する。ここに、タイヤの横滑り角度とは、タイヤに側方からサイドフォースが作用すると、タイヤの向きと進行方向が異なるようになる。この両者の挟む角度が横滑り角度で、サイドフォースが大きくなるにつれて、横滑り角度が大きくなること

は容易に想像されるが、けん引負荷によっても大きさが異なり、その関係は一次的でない。この関係を模型四輪トラクタを用いて確かめた。

供試した模型四輪トラクタの諸元を表-1に示す。

トラクタの走行する地表面は、無節のベニヤ板（シナの木）を用い、トラクタは、四車輪とも駆動タイヤ、転動タイヤとする。しかも、以後の解析を容易にするために、四車輪とも車輪荷重を等しくしてあるので、その挙動は、単車輪の駆動タイヤ、転動タイヤとして扱うことができる。

しかしながら、トラクタは、走行中、各車輪は、けん引負荷およびサイドフォース（側方けん引力）によって重量転移を受けるが、この影響を少なくするために、けん引点、サイドフォースの作用点を、できる限り地表面に近付けた。

なお、走行面が傾斜するときは、傾斜上方側タイヤと傾斜下方側タイヤとで車輪荷重に差が生じるので、走行面は水平にし、傾斜方向の力（傾斜接線力）は、側方けん引力すなわちサイドフォースによって、トラクタの向きに直角、水平方向に与えた。しかも、常に車輪に一定の大きさのサイドフォースが加わるように、滑車にて分

表-1 供試模型四輪トラクタの諸元

全長	801mm	輪距	280mm
全幅	514mm	軸距	400mm
全高	465mm	慣性モーメント	
全重	47.2kgf		0.25kgf・m・s ²
空気タイヤ			
直径	210mm	粘着係数	0.28
幅	60mm		

・農業機械学会関西支部第70回例会発表（昭和58年11月）

* 農業機械工学研究室

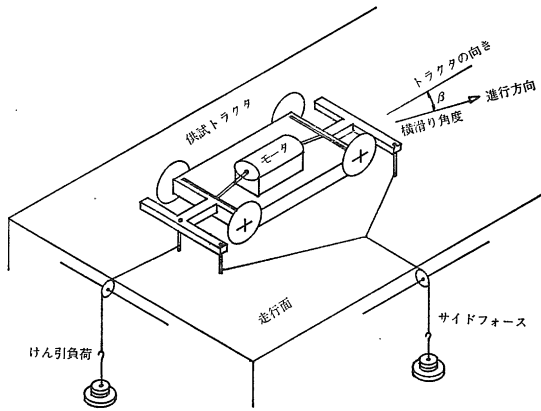


図1 実験装置

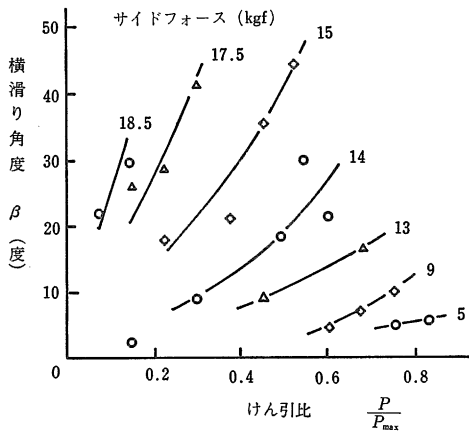


図2 駆動タイヤのけん引負荷、サイドフォースと横滑り角度の関係

銅をつるし、トラクタの進行と同時に滑車を移動し、しかも、前後車輪ともサイドフォースの大きさが等しくなるよう配慮した。サイドフォースおよびけん引力の負荷

の与え方を図-1に示す。

トラクタは、走行中常に等高線方向に向いているように配慮したが、進行と同時に、サイドフォースによりけん引された方向に、最初は大きく横滑りする。そして、タイヤの横滑り抵抗力が次第に増加して、サイドフォースの大きさと等しくなる時点で、一定の方向に直進する。この一定の進行方向と、トラクタの向きに挟まれた角度がタイヤの定常横滑り角度である。横滑り角度は、トラクタの走行軌跡から計測した。

トラクタの走行軌跡は、走行路面の直上で、約1.5mの、トラクタの走行状態が全写観察できる位置から、ビデオカメラで観察した。なお、誤差を少なくするために、前後それぞれ車軸中央上に豆ランプを点灯し、その点灯位置をあらかじめビデオ上で正確に確認しておくことによって、トラクタの現在位置を把握する方法を採用した。

実験結果および考察

図-2は、けん引負荷、サイドフォースと横滑り角度の関係である。けん引負荷、サイドフォースいずれの外力が増加しても、トラクタの横滑り角度が大きくなることがわかる。しかも、駆動タイヤの横滑り角度は一次関数的でなく、外力の増加により、より大きい横滑り角度となる。

第1報では、横滑り抵抗力の大きさは摩擦円の法則に従うと推定したので、おのおののサイドフォースにおける最大のけん引力 P_M の大きさから摩擦係数(粘着係数)を計算すると、表-2の粘着係数 μ となり、すべてタイヤと走行面の摩擦係数に等しくなる。

表-2の中での μ_{SM} は、サイドフォースが働くときの最大のけん引力時の駆動タイヤの横滑り抵抗係数 μ_S で、摩擦円の法則から、

表-2 サイドフォースが働く場合の最大のけん引力

サイドフォース S (kgf)	最大のけん引力 P_M (kgf)	けん引比 $\frac{P}{P_{max}}$	横滑り抵抗係数 μ_{SM}	粘着係数* μ
0	13.2	1.00	—	0.280
5	12.2	0.92	0.107	0.270
9	11.2	0.85	0.148	0.275
13	10	0.76	0.192	0.292
15	9	0.68	0.216	0.300
17.5	4	0.30	0.267	0.284
18.5	1.9	0.14	0.277	0.289

* 式(6)による ($K=0.73$)

$$\mu_{SM} = \mu_S = \mu \cos\left(\sin^{-1} \frac{P_M}{P_{max}}\right) = \mu \sqrt{1 - \left(\frac{P_M}{P_{max}}\right)^2} \quad \dots\dots(1)$$

これより

$$\mu = \sqrt{\mu_{SM}^2 + \mu^2 \left(\frac{P_M}{P_{max}}\right)^2} = \sqrt{\mu_{SM}^2 + \left(\frac{P_M}{W}\right)^2} \quad \dots\dots(2)$$

すなわち、サイドフォース S が働く場合に発揮できる最大のけん引力 P_M は、横滑り抵抗係数 μ_{SM} と、それに応じたけん引係数 $\left(\frac{P_M}{W}\right)$ の合力係数が、最大けん引係数 $\left(\frac{P_{max}}{W}\right)$ に等しい大きさのけん引力であるといえる。

しかしながら、サイドフォースと横滑り抵抗力の大きさは等しい大きさであるとして、これまで論を進めてきたが¹⁾²⁾³⁾、両者は、タイヤパターンその他の理由によって値が異なる場合が多い。

図-3は、今回の供試タイヤのサイドフォースが働く場合に発揮できる最大のけん引力時(表-2)のサイドフォース係数 $\left(\frac{S}{W}\right)$ と、横滑り抵抗力係数 (μ_{SM}) の関係で、両者の関係はほぼ直線の関係にあるとみてよい。そして、若干の誤差は伴うが、 μ_{SM} と $\frac{S}{W}$ の比は平均0.73程度である。

いま、 μ_{SM} と $\frac{S}{W}$ の比をとり、式(1)を用いて変形すると、

$$K = \frac{\mu_{SM}}{\frac{S}{W}} = \frac{\sqrt{\mu^2 - \left(\mu \frac{P_M}{P_{max}}\right)^2}}{\frac{S}{W}} = \frac{\sqrt{\left(\frac{P_{max}}{W}\right)^2 - \left(\frac{P_M}{W}\right)^2}}{\frac{S}{W}} \quad \dots\dots(3)$$

ここで、 $P_M=0$ のとき $S=S_{max}$ であるから

$$K = \frac{P_{max}}{S_{max}} \quad \dots\dots(4)$$

表-2より、 $P_{max}=13.2\text{kgf}$ 、および $P_M=0$ における S_{max} は $18.1\sim 18.5\text{kgf}$ の範囲内にあるので、 $K=0.71\sim 0.73$ の範囲にある。よって、 K はタイヤによって定まる定数とみてよい。そして、図-3および式(3)より、

$$\mu_{SM} = K \cdot \frac{S}{W} \quad \dots\dots(5)$$

したがって、サイドフォースが働く場合の最大のけん引力 P_M は、粘着係数 μ と、定数 K を乗じたサイドフォース係数、あるいはサイドフォース比 $\left(\frac{S}{S_{max}}\right)$ によって決定される。すなわち

$$\mu = \sqrt{\left(K \cdot \frac{S}{W}\right)^2 + \left(\frac{P_M}{W}\right)^2} \quad \dots\dots(6)$$

これより、

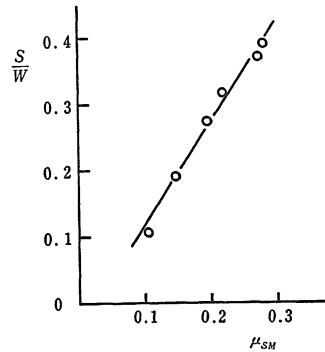


図3 サイドフォース係数 $\left(\frac{S}{W}\right)$ と横滑り抵抗係数 (μ_{SM}) の関係

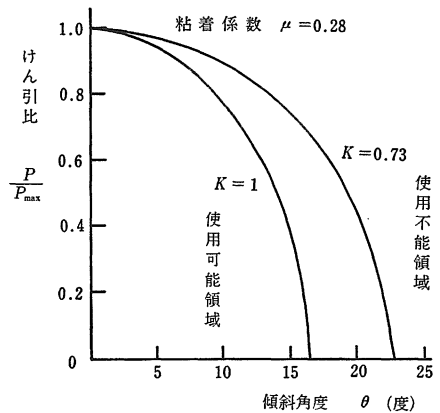


図4 トラクタの使用上限傾斜角度

$$\frac{P_M}{W} = \sqrt{\mu^2 - \left(K \cdot \frac{S}{W}\right)^2} = \mu \sqrt{1 - \left(\frac{S}{S_{max}}\right)^2} \quad \dots\dots(7)$$

摩擦円の法則に従って計算した傾斜地等高線方向に発揮できる最大のけん引力は、それぞれの走行路面におけるタイヤの粘着係数に応じて、第1報図-3の¹⁾ような大きくなり、これ以上のけん引力を発揮できない。ただし、この図は $K=1$ として計算してある。

図-4は粘着係数 $\mu=0.28$ のときの、 $K=1$ と $K=0.73$ の比較である。 $K=0.73$ の方が横滑りが少なく、それだけ使用可能領域が広がる。これは、横滑り防止車輪が有効であることを示すものである。

見方を変えれば、傾斜地のようにサイドフォースが働く場合、ある走行路面(一定の粘着係数)の所でけん引走行するトラクタは、その時のけん引負荷の大きさによって、横滑り抵抗力の大きさが変るといふことで、この横滑り抵抗力の大きさと横滑り角度の関係を、一つの実験式にまとめておけば、今後利用しやすくなる。

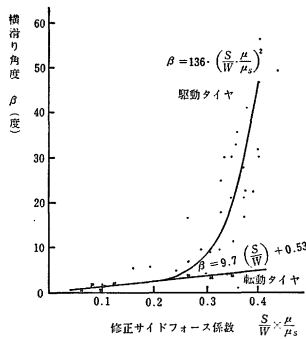


図5 修正サイドフォース係数と横滑り角度

幸いなことに、サイドフォースの測定値を、それぞれの場合のけん引負荷の値を用いて式(1)より求めた μ_s で除すことにより、図-5のように、横滑り角 β は一つの曲線にまとめることができる。図-5は一般性を持たせるために、横軸は無次元数 $(\frac{S}{W} \cdot \frac{\mu}{\mu_s})$ として表してある。

この関係を実験式で表すと次のようになる。

$$\beta = 136 \cdot \left(\frac{S}{W} \cdot \frac{\mu}{\mu_s} \right)^2$$

ここに、 β は横滑り角度 (度)

ただし、駆動タイヤの横滑り角度が急激に増加する位置は、転動タイヤの粘着係数 $\frac{S}{W} = \mu = 0.28$ をこえる所にある。もちろん、この点をこえる修正サイドフォースの所では、トラクタは横滑りも大きく、有効なけん引力を発揮することができない。したがって、横滑り角度の必要な部分は $\mu < 0.28$ 以下の修正サイドフォースの所である。

また、タイヤの粘着係数に近い部分を除いて、それ以下の修正サイドフォースの所では、転動タイヤの横滑り角度にほぼ等しいとして誤りは少ない。したがって、駆動タイヤの横滑り角度も、サイドフォースを μ_s で補正することにより、転動タイヤと同等に取り扱うことができる。

転動タイヤのサイドフォースに対する横滑り角度の実験式は

$$\beta = 10 \cdot \left(\frac{S}{W} \right)^{0.87}$$

この式はほぼ直線式で、駆動、転動両タイヤに適用できる形として、次のように示すことができる。

$$\beta = 9.7 \cdot \left(\frac{S}{W} \cdot \frac{\mu}{\mu_s} \right) + 0.53 \quad \dots\dots(8)$$

式(8)は横軸に無次元の値を用い、一般性を持たせてはいるが、粘着係数が異なれば、当然直線の傾斜が異なり、横滑り角度の大きさも異なるので、異なった地表面

表-3 仮想四輪トラクタ諸元

機体重量	1	重心 地上高	300
輪 距	1000	後輪からの距離	
軸 距	1000	後輪駆動	300
空気タイヤ		前輪駆動	700
	四輪とも同一性状	けん引点 地上高	0
粘着係数	0.28	偏心	0
かじ取り角	0	後輪より後方	300

での実験を必要とするが、ここでは、摩擦円の法則を用いた横滑り角度の性質を示すにとどめる。

必要 偏 角

傾斜地においては、トラクタは、傾斜接線力のために横滑りするので、トラクタは傾斜上方側に偏角を持って走行する必要がある。しかしながら、四輪トラクタにあっては、各タイヤの車輪荷重が異なり、また、けん引負荷その他による外力の作用が加わるので、これらを前輪かじ取り角度で調整補正しながら作業するのが実態である。

したがって、傾斜地でも安定した走行を求めるためには、まず、トラクタの諸元および使用条件に応じた必要偏角の大きさを求めておく必要がある。このうち、トラクタの諸元および土地の性状の影響については次報にゆずるが、手始めとして、実態に近いトラクタの諸元を持つトラクタの、前輪かじ取り角度を付けない場合の必要偏角の大きさを、式(8)を用いて求める。

機体諸元を表-3のように仮定する。そして、車軸直結型トラクタと仮定する。

ここで、傾斜地で、トラクタが等高線方向に直進するためには、前車輪と後車輪の横滑り角度が等しくなければならない。

$$\text{すなわち} \quad \beta_F = \beta_R$$

ただし、車輪荷重は、前車輪、後車輪それぞれ R_F , R_R 、サイドフォースは、それぞれ S_F , S_R とし、第1報式(1), (2), (16), (17)を用いるものとする。添字 F, R は、それぞれ前車輪、後車輪を示す。

また、第1報のサイドフォースには、駆動力の影響が入っていないので、第1報式(13)を用い、推進力モーメントを考慮する。すなわち推進力モーメント M は、

後輪駆動トラクタ

$$M_R = \mu \frac{P}{P_{\max}} \cdot (R_{RV} - R_{RM}) \cdot d$$

前輪駆動トラクタ

$$M_F = \mu \frac{P}{P_{\max}} \cdot (R_{FV} - R_{FM}) \cdot d$$

.....(9)

ただし、 d は軸距の $\frac{1}{2}$ 、添字 V, M はそれぞれ谷側山側車輪を示す。

よって、横滑り角度はそれぞれ
後輪駆動トラクタ

$$\left. \begin{aligned} \text{前車輪 } \beta_F &= 9.7 \cdot \left(S_F - \frac{M_R}{L} \right) / R_F + 0.53 \\ \text{後車輪 } \beta_R &= 9.7 \cdot \left(\frac{S_R}{R_R} \cdot \frac{\mu}{\mu_S} \right) + 0.53 \end{aligned} \right\} \dots(10)$$

前輪駆動トラクタ

$$\left. \begin{aligned} \text{前車輪 } \beta_F &= 9.7 \cdot \left(\frac{S_F}{R_F} \cdot \frac{\mu}{\mu_S} \right) + 0.53 \\ \text{後車輪 } \beta_R &= 9.7 \cdot \left(S_R - \frac{M_F}{L} \right) / R_R + 0.53 \end{aligned} \right\} \dots(11)$$

ただし、 L は軸距

ここで、 $\beta_F = \beta_R = \beta$ とし、その時の機体偏角 α を計算により求め、図-6 に実線で示す。ただし、この図には、図-4 の使用不能領域にわたっても示してある。

図-6 より、後輪駆動トラクタでは、けん引負荷の増加により、また傾斜角度の増加により必要偏角の大きさが大きくなる。このことは、これまでの実験で、けん引負荷、傾斜角度の増加により、駆動タイヤの横滑りが、転動タイヤの横滑りより大きく、トラクタはより大きい偏角となることと一致する⁴⁾⁵⁾。

これに対して、前輪駆動トラクタでは、けん引負荷の増加により必要偏角は小さくなり、負の値となる。

また、この時の車輪の横滑り角度 β を、同図に破線で示し、傾斜角度の増大によって横滑りは大きくなるが、けん引負荷の増加によってはそれほど変化しない。

差動装置付きのトラクタでは、式(9)の推進力モーメントを必要としないので、必要偏角の値はこれより小

い。しかしながら、各タイヤの横滑り角度は、車軸直結型トラクタとあまり変わらない。

さらに、トラクタが、傾斜地等高線に沿って直進するためには、その時の必要偏角の大きさ α が、それぞれタイヤの横滑り角度に等しい大きさの時である。

すなわち、 $\alpha = \beta$

図-6 の、各傾斜角度ごとに、実線と破線の交点がこの状態を示す。

図-6 より、後輪駆動トラクタでは、傾斜角度の増加により、より大きい上向き偏角を必要とするが、各傾斜角度とも、その交点は、あるけん引負荷の大きさの時のみ存在し、それ以外の場合は、前輪にかじ取り角度の必要なことを示唆している。ことに、前輪駆動トラクタでは、交点は存在しない⁶⁾。

結 び

1. トラクタの諸元および土地の性状に応じた必要偏角の大きさは次報で述べることとし、ここでは、標準的と思われる形体のトラクタが、前車輪にかじ取り角度を付けずに、等高線方向に向いて、直進するための機体偏角を、空気タイヤの横滑り角度より求めた。

そのため、まず、サイドフォースが働いた場合の車輪の横滑り角度を調査した。

2. 駆動空気タイヤの横滑り角度は、サイドフォースが働く場合、極端に増加し、その時の最大のけん引力は粘着係数 μ と、タイヤによって定まる定数 $(K = \frac{P_{max}}{S_{max}})$ を乗じたサイドフォース係数、あるいは、サイドフォー

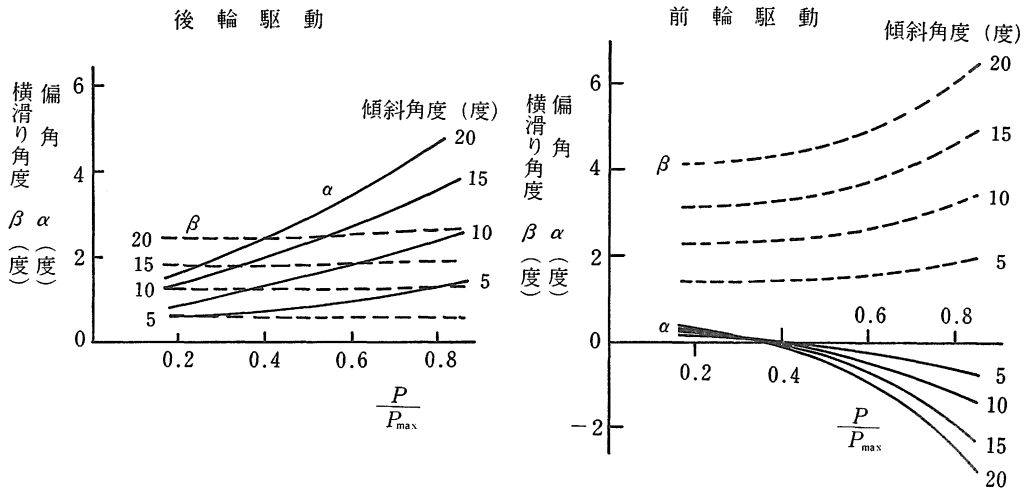


図6 かじ取り角を付けない場合の必要偏角 (実線) 必要偏角 (破線) 横滑り角度

ス比 $\left(\frac{S}{S_{\max}}\right)$ によって決定される(式(7))。

3. また、駆動タイヤのサイドフォースを、その減少した横滑り抵抗係数で除すと、その値と、タイヤの横滑り角度との関係は、一つの指数関数で表され、その曲線の曲率の大きい点以上のサイドフォースでは、横滑りのためにけん引力を発揮することができない。それ以外のサイドフォースでは、転動タイヤの横滑り角度と等しく、ほぼ直線で表される。

4. したがって、前車輪と後車輪の横滑り角度が等しくなる傾斜上向き偏角を計算により求め、後輪駆動トラクタでは、傾斜角、けん引負荷の増加に伴って、必要上向き偏角は大きくなる。ただし、その時のタイヤの横滑り角度は、けん引負荷によってそれほど変わらず、傾斜角度のみの関数である。

前輪駆動トラクタでは、けん引負荷の増加に伴い、必要偏角は減少し、負の値となる。

5. 機体偏角が、タイヤの横滑り角度に等しくなるとき、トラクタは等高線に沿って直進する。この角度は、傾斜角度の増大に伴って大きくなるが、ある傾斜角度では、あるけん引負荷の時にのみ存在し、その他のけん引負荷では、安定した機体偏角が存在しない。とくに、前輪駆動トラクタでは、けん引負荷にかかわらず存在しない。

い。したがって、安定した機体偏角が存在しない場合は、必ず前車輪にかじ取り角度を必要とすることを示唆するものである。

6. この研究は、一つの特定の粘着係数での実験を基にして、摩擦円の法則の適用性を証明し、そして、傾斜地における必要偏角の大きさを求めるまでに発展させた。もちろん、走行路面の状態によりタイヤの粘着係数は異なり、それに応じて、サイドフォースの横滑り角度の関係は異なってくる。しかしながら、得られる数値は異なっても、そこに発生する性格は異ならないと思われ、したがって、その思考の発展過程は異ならない。

従来、機体偏角を何度にするかを論じ、いろいろの考察を進めてきたが、この研究が、今後理論の発展に寄与することを願うものである。

参 考 文 献

1. 田辺他：島大農研報16：130-136, 1982.
2. 田辺一：傾斜地におけるトラクタのけん引性能に関する実験的研究, 1969.
3. 田辺他：島大農研報 1：167-174, 1967.
4. 田辺他：農機誌関西支部報 52：45-46, 1982.
5. 田辺他：農機誌関西支部報 50：49-40, 1981.
6. 田辺他：農機誌関西支部報 46：24-25, 1979.

Summary

1. A yaw angle of tractor with no steering angle was calculated from the side slip angle of pneumatic tire, keeping the direction to the contour line of slope field.

2. The relation between side slip angle of driving tire and transformed side force was expressed by means of an exponential curve, where transformed side force meant side force divided by the coefficient of resistance force for side slipping.

3. But in the larger range over the adhesion of rolling tire on the running surface, the tractor could not develop the traction force, because of larger sideways slipping of tire. In the range under the adhesion, the relation stated above was the same to the one of the rolling tire, and was in linear.

4. From this characteristics, the yaw angle, with the same side slip angle of front tire to rear tire, was in larger value with increase of the traction force and inclination angle of the slope jointly, but side slip angle was nearly in the same value for all traction force.

5. For the purpose of running along the contour line, the yaw angle is needed to be equal to the side slip angle. But it does not always exist, but occasionally, only at a certain traction force at each inclination angle, respectively.