

傾斜地におけるトラクタの形態に関する研究(第4報)

異なる走行路面における横滑り角度についての考察

田 辺 一*

On the Dimension of Tractor on the Slope Field (4)
The Side Slip Angle on the Different Running Surface
Hajime TANABE

To estimate the side slip angle of wheel tractor on the slope, the friction ellipse was applied. Considering the short to long axes of ellipse in length, a ratio of actual to maximum side forces at some traction force, that is ratio of side force, was introduced in the equation of transformed side force. And by only to examine the adhesion and the largest side force of driving tire on the level land, the running characteristics of wheel tractor on the slope was able to be made prediction.

緒 言

トラクタの重量の傾斜面を斜面下方向に向かう分力(接線力)のために、トラクタは機体偏角、前車輪かじ取り角を必要とすることは前報で報告した。そして、トラクタの横滑りについての基本的性格を明らかにする意味において、見掛け上の横滑り角度から、車輪面方向の滑り率の影響を取り除いた基本横滑り角度を用いることを提唱した。しかしながら、これでもトラクタの横滑り角度は、けん引負荷と、車輪の走行路面の影響を依然として受けている。

そこで、タイヤの走行路面との相対的な関係を示す係数である摩擦楕円の短長軸長比 K に着目し、これを利用することにより、路面の状態に関係なく、何処においても適用できる一般式を導き、その適否を実験によって確かめた。

なお、この実験の遂行には、昭和60年度農業機械学専攻学生梶原正勝、光井英視両君の助力を得た。ここにその労を感謝する。また、この研究は、文部省科学研究費補助金による研究の一部である。

横滑り角度の測定

実験装置は前報と同じ模型トラクタを用いた。

走行路面として、これまでのベニヤ板の外に、コンクリート、アスファルト、硬い土面、硬い草生面を追加した。

模型トラクタは、全車輪を駆動車輪、転動車輪とすることは同様であるが、けん引負荷、サイドフォースが完全にトラクタの重心に作用するように配慮するとともに、トラクタが移動しても、これらの負荷が、つねにトラクタに対して、平行および直角方向に作用するよう、負荷のけん引綱を長くして、誤差が現れないようにした。

表一 供試タイヤと走行路面

走行路面	粘着係数	最大サイドフォース係数	K	土壌水分(%)
ベニヤ板	0.35	0.86	0.40	27.6
硬い土面	0.39	0.80	0.49	
アスファルト	0.59	1.14	0.51	
草生地	0.44	0.97	0.45	28.4
コンクリート	0.46	0.95	0.49	

* 農業機械工学研究室

また、これまでの理論の正しさを証明するために、傾斜実験台を傾斜させ、その上を、後車輪駆動型模型トラクタが、前車輪にかじ取り角を付けないで、直線に進行する機体偏角を求めた。この場合の走行路面は、ベニヤ板、および特性コンクリート板である。そして、これまで求めてきた理論による推定偏角値と比較した。

走行路面と車輪の粘着係数、最大サイドフォース係数等の関係は表一に示す通りで、供試タイヤが大分摩擦し、粘着係数値が大分低下している。

また、現地における実験では、負荷が一定で、しかもトラクタは直線走行するので、ビデオカメラによる観察は取り止めた。

サイドフォース比

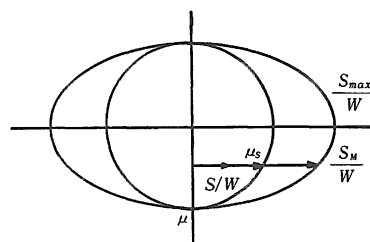
これまで、タイヤの横滑り角度とサイドフォースの関係を調査するに際し、式(1)に示すようにタイヤの横滑り抵抗係数 μ_s を定義し、これでサイドフォースを除すことにより、修正サイドフォースとして、横滑り角度との関係を検討してきた。

$$\mu_s = \mu \sqrt{1 - \left(\frac{P}{P_{\max}}\right)^2} \quad (1)$$

そして、タイヤおよび走行路面が同一の場合は、それなりに目的を達成し、普通の使用状態における横滑り角度が5°以下の所では、両者は線形関係にあるとしても差し支えないとして実験式を導き、トラクタの挙動を予測してきた。

しかしながら、走行路面が異なった場合は、タイヤと走行路面の間の粘着係数が異なり、それによって実験式の係数値が異なるので、予め走行路面ごとに係数値を調査しておく必要がある。

表一は修正サイドフォース係数とタイヤの横滑り角度の関係を表す勾配の値 C の値で、基本横滑り角度にしても、土とアスファルトの間に1.7倍の差がある。ただし、最大サイドフォース係数の0.8倍以上の値は β, β_0



図一 摩擦楕円

の値が急増するので、省いてある。また、 K の値が大きいほど横滑り角度が小さい。このことは、横滑り角度に、タイヤおよび路面の影響があることを示している。

そこで、この障害を除去し、走行路面が異なっても一つの式でタイヤの横滑り角度を推定できる式を導く為に、タイヤと走行路面の間の関係を示す係数 K を利用する方法を考える。

幸いなことに、極大横滑り抵抗係数 μ_s と K は比例関係にある。すなわち；

$$K = \frac{\mu_s}{\frac{S_M}{W}} = \frac{\mu W \sqrt{1 - \left(\frac{P}{P_{\max}}\right)^2}}{S_M} = \frac{\sqrt{P_{\max}^2 - P^2}}{S_M} \quad (2)$$

ここで、 $P=0$ のとき $S_M = S_{\max}$

$$\therefore K = \frac{P_{\max}}{S_{\max}} \quad (3)$$

μ_s は摩擦楕円の長軸に平行な摩擦楕円の弦の1/2に相当し、 S_M は摩擦楕円の長軸に平行な摩擦楕円の弦の1/2である。（図一参照）

したがって摩擦楕円の弦の長さは、摩擦円の弦の長さの $1/K$ 倍に相当し、けん引負荷 P の大きさが定まれば、 P の大きさに応じた極大サイドフォース S_M の値が定まる。

式(3)より、 K はタイヤの縦横方向の粘着係数の比を

表一 修正サイドフォース係数と横滑り角度の関係を示す勾配 (C)

走行路面	見掛け上の横滑り角度 β	基本横滑り角度 β_0
ベニヤ板	4.6	3.2
土	6.8	5.0
アスファルト	3.5	3.0
草生地	4.7	4.2
コンクリート	5.3	4.2
平均	5.0	3.9

$$\beta, \beta_0 = C \cdot \left(\frac{S}{W} \cdot \frac{\mu}{\mu_s} \right) + E$$

表-3 サイドフォース比と横滑り角度の関係を示す勾配 (C_s)

走行路面	見掛け上の横滑り角度 β	基本横滑り角度 β ₀
ベニヤ板	4.0	2.8
土	5.4	4.0
アスファルト	4.0	3.4
草生地	4.6	4.1
コンクリート	5.0	4.0
平均	4.6	3.7

$$\beta, \beta_0 = C_s \cdot \left(\frac{S \cdot K}{W \cdot \mu_s} \right) + E$$

示す値で、タイヤと走行路面が定めれば、おのずから定まる定数と考えてよい。したがって、K でもって、タイヤと走行路面の間の相対的な関係が示されると推定できる。

いま、修正サイドフォース係数から、タイヤと走行路面の間の関係を示すタイヤの粘着係数を除き、その代わりに、両者の相対的な関係を示す K を挿入する。すなわち、修正サイドフォース係数を K/μ 倍することにより、式(4)がえられる。

$$\frac{S \cdot \mu \cdot K}{W \cdot \mu_s} = \frac{S \cdot K}{W \cdot \mu_s} = \frac{S}{S_M} \leq 1 \quad (4)$$

ここに、S はタイヤに作用するサイドフォースで、S_M は、けん引力 P が存在するときに発揮し得る極大サイドフォースである。したがって、S は S_M をこえて増大することは不可能で、式(4)は1以下の値である。

式(2)より、S_M は P が定めればおのずからその大きさが定まるので、準定数とみてよい。また、式(4)は実際に作用するサイドフォースと、極大サイドフォースの力比にすぎないので、これを「サイドフォース比」と定義しよう。

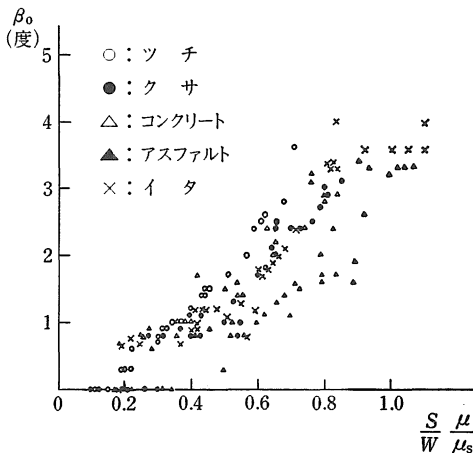


図-2 修正サイドフォースと基本横滑り角度の関係

修正サイドフォース係数およびサイドフォース比と基本横滑り角度の関係を示すと図-2、図-3の通りである。また、その関係を示す勾配の値 C_s を示すと表-3の通りである。ただし、測定値の省略については、表-2と同様である。

表-3と表-2を比較すると、最大と最小の差は、後者は前者の1/2程度となる。また、表-3で、見掛け上の横滑り角度 β を用いても、基本横滑り角度 β₀ を用いても、最大と最小の比は1.4倍で、それぞれに路面による差が小さくなっていることがわかる。

ここで、横滑り角度は小さい値であり、実験値に誤差が入り込む余地が少なくないことを考えると、サイドフォース比 (式(4)) は走行路面との関係はなく、タイヤの状態のみに関する値と考えてよい。したがって、タイヤが定めれば、横滑り角度との関係を示す勾配の値 C_s が定まり、この値は、タイヤの特性を示す一つの指標とみることができる。

なお、β₀ より β を用いる方が、精度が高くなることは、前報¹⁾と同様である。

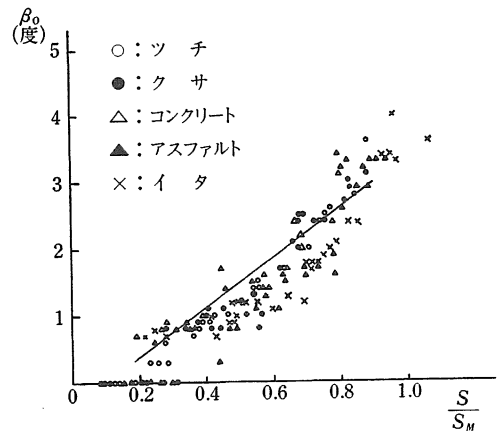


図-3 サイドフォース比と基本横滑り角度の関係

斜面上を直進走行する

トラクタの必要偏角

前節で求めた実験式の実用性を検討するために、ベニヤ板およびコンクリート板上を直進走行するトラクタの必要偏角を求めた。

実験は、傾斜実験台を5°、10°、15°に傾け、その上を、差動装置を持たない後車輪駆動の普通型トラクタに調整した模型トラクタが、前車輪にかじ取り角度を付けずに直進走行できる機体偏角を求めたもので、この場合は、機体偏角と必要偏角は同一となる。

実験遂行は、なんの予備知識もない学生によって進められ、トラクタの直進性はビデオカメラで監視された。

図-4、図-5の実線は、得られた値をプロットしたものである。点線は、これまで求めてきた式を用いて、模型トラクタと同一の諸元を有するトラクタが、直進走行するのに必要な機体偏角の推定値である。第一報、式(1)~式(4)より各車輪荷重を計算し、第3報、式(10)の前輪かじ取り角度 $\delta=0$ として、前後車輪に作用するサイドフォース、および後車輪の駆動力より、次式(5)の条件を満足する機体偏角を求めたものである。

$$\text{前車輪横滑り角度} = \text{後車輪横滑り角度} \quad (5)$$

ただし、表-3の値を用いる場合は、タイヤと走行路面の関係を示す値が入っていないので、横滑り角度の勾配を示す値 C_s を K/μ 倍しなければならない。このことは表-2の値を用いることに他ならない。

図中、 P_c は、機体偏角による走行抵抗の増加分を、トラクタの駆動力より求めたけん引力より差し引いた実けん引力と、最大けん引力との比である。

計算にあたり、タイヤの力率を考慮すれば、計算値はよく一致しているとみてよく、よって、式(4)は、斜面上でのトラクタの挙動を推定するのに用いることができると思われる。

同図中の一点鎖線は、計算より求めたタイヤの横滑り角度で、傾斜角度の増大により横滑り角度は増大するが、けん引負荷の増大によって増大せず、ほぼ一定の大きさであるとみてよい。したがって、トラクタの進行する方向は、必要な機体偏角から、タイヤの横滑り角度を差し引いた方向で、傾斜角度が大きいほど、直進する方向も、等高線からより大きくずれることがわかる。

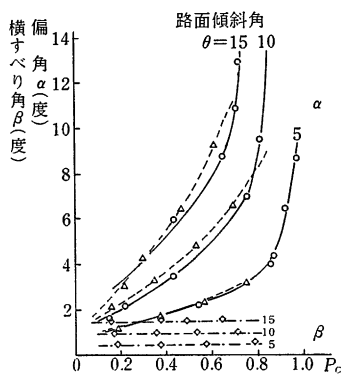


図-4 ベニヤ板上の必要偏角 (—実験値 ---理論値)

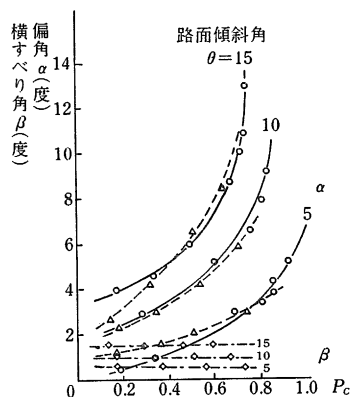


図-5 コンクリート板上の必要偏角 (—実験値 ---理論値)

また、タイヤの横滑り角度は、傾斜現地で、実際感じているほど大きい値ではなく、傾斜20°の圃場で2.5°以下である。サイドフォース比でも、図-2、図-3のように5°以下の大きさで、それ以上の大きさではトラクタは直進できない。

このことは、自動車界で用いられているコーナリングフォースと、ここに用いているサイドフォースとは、タイヤの横滑りに関しては同一視して差し支えないことを示し、自動車の運動理論に用いられている諸式が、トラクタの運動に関しても、そのまま用いられることを意味している。

等高線に沿って走行するトラクタの挙動

傾斜地で、等高線に沿って走行するトラクタは、機体に上向き偏角を与えるだけでは、あるけん引負荷の大きさのとき以外は直進走行することはできない。したがって、前車輪にかじ取り角を与える必要がある。この角度は、タイヤと走行路面の性状、けん引負荷の相互関係によって定まるが、次式(6)の条件を満足する必要がある。

$$\left. \begin{aligned} \text{前車輪の横滑り角度} \\ = \text{前車輪のかじ取り角度} + \text{機体偏角} \\ \text{後車輪の横滑り角度} = \text{機体偏角} \end{aligned} \right\} (6)$$

図-6は、重心の位置が、後車輪より輪距の1/3の所にある差動装置付き後車輪駆動トラクタが、タイヤの粘着係数 $\mu=0.6$ 、基本横滑り角度の勾配 $C_s=6$ の傾斜路面を走行する時に必要な機体偏角、前車輪かじ取り角度を求めたものである。ただし、表-3の値を用いる場合は、タイヤと走行路面の関係を示す値 $K/\mu (=1/\frac{S_{max}}{W})$

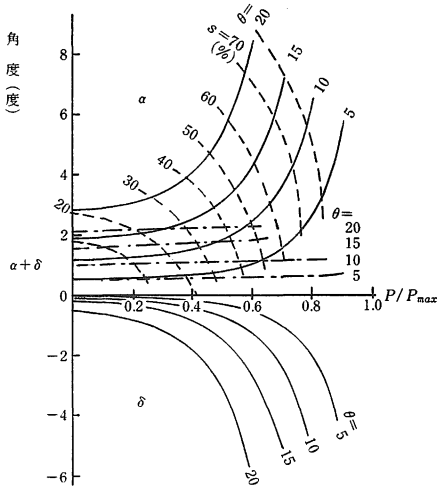


図-6 等高線走行における必要偏角、前輪かじ取り角度、滑り率 ($\mu=0.6, C_s=6$)

を横滑り角度に乘じなければならないことは前節と同様である。

図-6より、トラクタは傾斜上方向に機体偏角を必要とするのに対し、前車輪のかじ取り角度は、機体中心線方向より傾斜下方に向かってることがわかる。ただし、機体偏角と前車輪かじ取り角度の和、すなわち、前車輪の絶対角は、一点鎖線で示すように傾斜上方を向き、傾斜角度の増大につれてその値が大きくなっている。しかし、けん引負荷の増大にはあまり影響されない。

同図中、破線は、車輪の進行低下率 s を表わし、 $s=30\sim 40\%$ 程度から、機体偏角、前車輪かじ取り角度が急に増大し、この付近がトラクタの使用限度であることを物語っている。

前車輪駆動型トラクタについては、前報で報告したとおりで、あまりけん引力は期待できない。

トラクタの最大けん引力 (推進力)

傾斜地において、駆動車輪の車輪荷重 Wt は、圃場傾斜角度、機体偏角によって異なる²⁾。また、けん引力、サイドフォースは、差動装置の影響を受け、これらの総合によってトラクタの挙動が定まる。

ことに、差動装置の影響は、左右駆動車輪に車輪荷重差が存在するときに顕著に現われる。すなわち、差動装置の働きによって、左右車輪の駆動力の間には、差動装置の内部摩擦力の差が存在し、けん引力は、軽い方の車輪荷重の2倍以上を発揮することはできない。

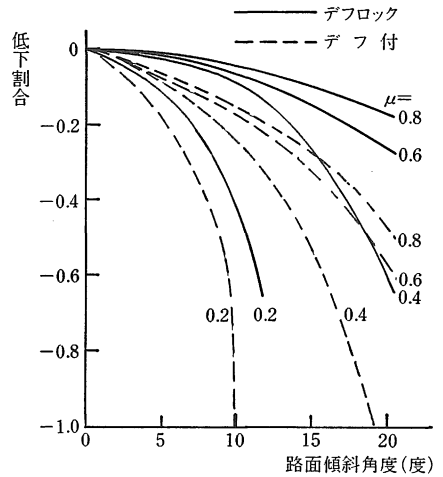


図-7 傾斜角度によるけん引力の低下

したがって、けん引力を要求するときは、差動装置止め装置が装着される。このときの駆動力、けん引力は、車輪荷重に比例し、左右車輪の発揮するけん引力の和となる。すなわち；

$$\left. \begin{aligned} \text{差動装置のないトラクタ } P_{\max} &= \mu \cdot R_R \\ \text{差動装置のあるトラクタ } P_{\max} &= 2 \cdot \mu \cdot R_{RM} \end{aligned} \right\} (7)$$

図-7は、傾斜地で、トラクタの発揮できる最大けん引力からみたトラクタの使用可能範囲を示したものである。

すなわち、けん引力が $P/P_{\max}=0.6\sim 0.8$ のときの機体偏角を用い、差動装置の有無におけるトラクタの最大けん引力を、タイヤの粘着力を指標として示したものである。図では $K=1$ の場合を示すが、 K の大きさによってその値は異なる。

同図から、粘着係数の違いによって、けん引力の低下する割合は同一であるが、低い粘着係数の場合は、利用可能傾斜角度が低く、低下割合が大きくなる。

粘着力の違いとけん引力

タイヤの粘着力の違いによるトラクタの挙動を、図-6と同様の方法で求めたものを図-8に示す。

図-8においては、けん引力比からみれば、粘着係数の小さい場合が、偏角その他の角度が小さく、運転操作がしやすいようにみえるが、けん引係数からすれば、粘着係数が小さい場合は、偏角の小さい所で、発揮しうる最大けん引力になり、トラクタは能力を充分発揮できない。

図-9は、基本横滑り角度の関係を示す勾配の違いと必要偏角等の関係を示すが、当然のことながら、勾配の

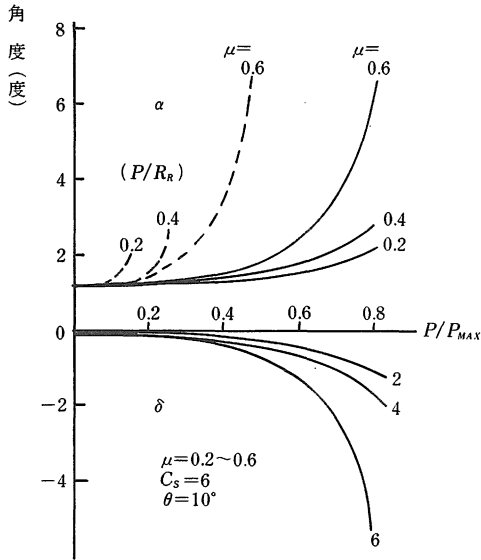


図8 粘着力の違いによる必要偏角，前輪
かじり角度（等高線走行）

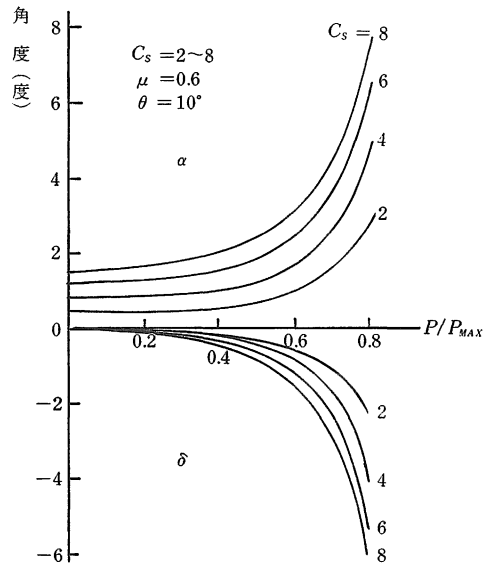


図-9 等高線走行 基本横滑り角度の係数の影響

値が小さい方が、タイヤの横滑り角度が小さいので、偏角、かじり角度は小さくてよい。ただし、この勾配は、タイヤによって値が異なるので、さらに調査を必要とするが、横滑りに強いタイヤ（ K の小さいタイヤ）は傾斜圃場への適応性が大きいといえる。

む す び

駆動車輪に横滑り抵抗係数の概念を導入することにより、これまで理論的解明が困難であった傾斜地にも、その解決法が見出された。ことに、トラクタ側からみて、タイヤと圃場との間の関係を示す K なる因子を導入して、トラクタと圃場の関係が明白に示されるようになった。

このことによって、トラクタは如何なる圃場においても、タイヤの最大けん引力と、最大横滑り抵抗力を把握するだけで、その挙動を予測し、あるいは推定できるようになった。

さらには、これらの計算式は、第3報¹⁾に報じたとおり、トラクタが偏角を持つ場合にも適用され、このことは、傾斜地において、等高線方向から傾斜上下方向、すなわち登降坂方向にわたって、トラクタのあらゆる進行

方向全般にわたって、すべて同一の理論式で計算が可能であることを示している。すなわち、平地から傾斜地への連続性、あるいは、平地におけるトラクタの運動理論を、傾斜地へそのまま導入することも可能となった。

また、これまで、タイヤの側方力としてサイドフォースを中心に検討してきたが、横滑り角度は、従来考えられてきた値とは異なり、意外に小さい値で、サイドフォースとコーナリングフォースを同一視してもよいと考えられる。よって、自動車界で開発されてきた運動理論も、そのままトラクタにも適用され、こんご大いに発展が期待されるところである。

ただ、これらの理論を適用するにあたり、タイヤの特性を示す K 、あるいは、最大のサイドフォースおよび最大のけん引力（粘着力）の値を知ることのみが必要である。

参 考 文 献

1. 田辺他：島大農研報18：159-163, 1984.
2. 田辺他：島大農研報16：130-136, 1982.
3. 田辺他：島大農研報17：123-128, 1983.
4. 田辺他：農機学会関西支部報46：24-25, 1979.