

傾斜地におけるトラクタの形態に関する研究 (1)

— 使用上限傾斜角度の予測 —

田 辺 ^{*}・中 尾 清 治 ^{*}

Hajime TANABE and Seiji NAKAO

On the Dimensions of Tractor on the Slope Field (1)

Prediction of Upper Limit Angle of Tractor Use

結 言

傾斜地におけるトラクタのけん引性能に関しては、車輪の横滑りと、それに伴う偏角の附与、その他車輪の対地姿勢が複雑で、また均一な土壤条件が得にくい等の理由で、概略の把握のみで、未だにはっきりした定説がない。たとえ土壤条件が定まったとしても、そこで発揮する最大けん引力すら予測できず、トラクタを圃場に入れてはじめて、作業の可能、不可能を決定している状態である。

したがって、筆者は、種々の仮定を設けながらも、土壤の状態が定まれば、車輪が横滑りする時に発生する横滑り抵抗力から、そこで発揮し得るけん引力、および、使用可能な上限傾斜角度を予測する方法を考察した。ここにいう上限傾斜角度とは、従来、限界傾斜角度と名付けられていたものであるが、限界の意味が不明確なため、ここでは、使用可能な範囲を指す意味から、使用可能上限傾斜角度と名付けた。

なお、この研究は、文部省科学研究費補助金、総合研究A、「農用トラクタの機能向上のための開発研究」の分担課題「トラクタの形態に関する研究」の一部分である。

研究の方法

等高線方向に正置しているトラクタの発揮するけん引力の大きさは、土地の性状と車輪荷重、および、車輪と車輪が接する地面との関係状態によって決定されるものとする。すなわち、けん引力は、駆動輪荷重と粘着力か

ら計算される大きさで、その最大を最大けん引力 P_{max} とする。 P_{max} は、傾斜地では、差動装置付き (Dつき) トラクタと車軸直結型 (Dなし) トラクタとでは、大きさが異なるが、ここでは主として車軸直結型について考察し、差動装置付きの考察は一部にとどめた。

この研究を進めるにあたって、次の仮定を設けた。

1) 土壤は均一で、場所により、水分、硬さ等の変化がなく、また、トラクタの車輪は、土壤中への沈下や、土壤の掘削は行わないものとする。このように仮定すると、土地の性状は、固乾路面あるいは剛体と考えられ、車輪による剪断力は働かず、トラクタの推進力は、トラクタと地面との摩擦力のみとすることができる。

2) 車輪と地面との間の摩擦係数は、動摩擦係数を採用するのが普通であるが、けん性能を容易に把握するためには、静摩擦係数を用いても、大した差が生じない。

3) タイヤを含むトラクタの車体懸架方式は、バネ等の弾性体を用いない剛体であるとする。このように仮定することにより、トラクタはピッチング、ローリングを行わない。

4) トラクタのけん引力の大きさは、エンジン出力、駆動輪荷重、および走行装置の状態によって定まる。ここで、エンジントルクは駆動輪トルクに置き替え、無限の大きさであるとする。また、差動装置付きのトラクタでも、差動装置内部での摩擦損失等一切の損失を考えない。

5) トラクタの車輪は、四輪とも同じ大きさで、同じ性質を持つものとする。また、走行面は完全に平面である。したがって、車輪は同一平面上にあり、ころがり抵抗はじめ、その他の走行抵抗は一定であるとする。すな

* 農業機械工学研究室

れぞれ山側, 谷側車輪接地点まわりのモーメントをとることにより, 谷側前輪には $\frac{e}{2dL}h \cdot P \cdot \sin \alpha$, $\frac{H}{2dL}n \cdot W_b$, 山側車輪には $-\frac{e \cdot h}{2dL}P \cdot \sin \alpha$, $-\frac{H}{2dL}n \cdot W_b$ の重量転移が生じるものとする。

同様に, 後車輪には $(1 + \frac{e}{L})P \cdot \sin \alpha$, $-\frac{m}{L}W_b$ のサイドフォースが働き, 谷側車輪には $-\frac{(L+e)}{2dL}h \cdot P \cdot \sin \alpha$, ↗

↘ $-\frac{H \cdot m}{d}W_b$ の重量転移が生じるものとする。

けん引力の車体前後軸方向分力 $P \cdot \cos \alpha$ に関しては, 山側車輪には $\frac{d+c}{2d}P \cdot \cos \alpha$, 谷側車輪には $\frac{d-c}{2d}P \cdot \cos \alpha$ の水平力が働き, 前同様のモーメントにより重量転移が生じるものとして, 各車輪それぞれの車輪荷重を分解修正することにより, 次のとおりの車輪荷重が発生するものとする。

前輪山側車輪荷重

$$R_{FM} = W_{FM} = \frac{1}{2L} (n \cdot W_a - \frac{H}{d}n \cdot W_b - H \cdot W_c - \frac{d+c}{d}h \cdot P \cdot \cos \alpha - \frac{e}{d}h \cdot P \cdot \sin \alpha) \quad (5)$$

前輪谷側車輪荷重

$$R_{FV} = W_{FV} = \frac{1}{2L} (n \cdot W_a + \frac{H}{d}n \cdot W_b - H \cdot W_c - \frac{d-c}{d}h \cdot P \cdot \cos \alpha + \frac{e}{d}h \cdot P \cdot \sin \alpha) \quad (6)$$

後輪山側車輪荷重

$$R_{RM} = W_{RM} = \frac{1}{2L} (m \cdot W_a - \frac{H}{d}m \cdot W_b + H \cdot W_c + \frac{d+c}{d}h \cdot P \cdot \cos \alpha + \frac{L+e}{d}h \cdot P \cdot \sin \alpha) \quad (7)$$

後輪谷側車輪荷重

$$R_{RV} = W_{RV} = \frac{1}{2L} (m \cdot W_a + \frac{H}{d}m \cdot W_b + H \cdot W_c + \frac{d-c}{d}h \cdot P \cdot \cos \alpha - \frac{L+e}{d}h \cdot P \cdot \sin \alpha) \quad (8)$$

これらの値は次の様に検算される。

$$R_{FM} + R_{FV} = R_F, \quad R_{FM} + R_{RM} = R_M, \quad R_{RM} + R_{RV} = R_R, \quad R_{FV} + R_{RV} = R_V, \\ R_F + R_R = R_M + R_V = W_a$$

けん引力の計算

1. 最大推進力

トラクタのけん引力とは, 車輪の地面に対する摩擦力, 剪断力を, トラクタの進行方向の力(推進力)に置き替えたものである。しかしながら, 仮定1)より, 固乾路面では, 剪断力は働かないので, 推進力は車輪と地面(走行面)との間の摩擦力のみとなる。

また, 仮定2)より, この摩擦係数を μ_a とすると, トラクタの最大駆動力は, 駆動輪荷重 W_D と μ_a の積として表わされる。

$$F_{max} = \mu_a \cdot W_D$$

さらに, 仮定5)より, 力率はどの様な状態でも, すべて等しいので, この値を K と置くと, 駆動輪の最大推進力 L_{max} は

$$L_{max} = K \cdot \mu_a \cdot W_D = \mu \cdot W_D$$

$$\text{ただし } \mu = K \cdot \mu_a$$

自動車工学では L_{max} を粘着力, μ を粘着係数と呼んでいるが, ここでは, それぞれ最大推進力, 最大推進力係数とも呼ぶことにする。

W_D の値は, 傾斜地では, 傾斜角度, 機体偏角, けん引状態によって, その値が異なる。差動装置の有無によってもその働きが異なる。

差動装置のない車軸直結型車輪(Dなし)トラクタのけん引力は, 左右おのおのの発生するけん引力の和として示されるのに対し, 差動装置のある(Dつき)トラクタでは, 発揮するけん引力は, 左右車輪の軽車輪荷重側

の車輪荷重の2倍にとどまる。

故に, 差動装置のないトラクタの最大推進力は,

$$\text{後輪駆動の場合 } L_{max} = \mu(W_{RM} + W_{RV}) \quad (9)$$

$$\text{前輪駆動の場合 } L_{max} = \mu(W_{FM} + W_{FV}) \quad (10)$$

差動装置のあるトラクタでは, $W_{RM} < W_{RV}$, $W_{FM} < W_{FV}$ とすると,

$$\text{後輪駆動の場合 } L_{max} = 2\mu(W_{RM}) \quad (11)$$

$$\text{前輪駆動の場合 } L_{max} = 2\mu(W_{FM}) \quad (12)$$

2. 推進力, けん引力

仮定5)より, トラクタの走行抵抗等が存在しない理想系システムでは, 車輪の推進力はけん引比に比例する。よって,

$$L = \mu \cdot W_D \cdot \frac{P}{P_{max}} = P_1 \cdot W_D \quad (13)$$

$$\text{ただし } P_1 = \mu \frac{P}{P_{max}}, \quad \frac{P}{P_{max}} \text{ はけん引比}$$

3. 横滑り抵抗力

車輪に側方力(サイドフォース)が作用し, 側方に押された場合は, 車輪は車輪面の方向には進行せず, 押された方向に横滑りして, この力に対抗する力を発揮する。この抵抗力を, 進行方向に直角にとった場合は, コーナリングフォースと呼ばれるが, ここでは, 車輪面に直角にとり, 押す力(サイドフォース)と等しい大きさであるとする。この力を横滑り抵抗力と呼ぶ。

車輪に一定のサイドフォースを働かせて横滑りさせた場合の最大抵抗力の大きさは, 転動輪, あるいはけん引負荷のない駆動輪では, ほゞ粘着力 $\mu \cdot W_T$ に等しく (W_T は車輪荷重), サイドフォースの大きさに応じて

抵抗力を発揮する。粘着力を超えたサイドフォースが働く場合は、車輪は、横滑りのために、前進できない。

駆動輪が負荷をけん引するときは、この抵抗力は減少し、最大けん引力（平地において）のところで、車輪の横滑り抵抗力は0となる。¹⁾

部分けん引負荷のときは、けん引負荷が小さい間は、横滑り抵抗力は、それほど減少しないが、或るけん引負荷のところで急に減少し、横滑りが増加する。

したがって、剪断力を考えない平面上においては、この横滑り抵抗力は、摩擦円の考えから、次のように計算される。（タイヤのラグ等を考えると、摩擦だ円の考えを導入しなければならないが、ここでは考えない）。²⁾

いま半径 μ の円を考えると、最大けん引係数も、横滑り抵抗係数も μ であるので、摩擦円の考えを導入し、けん引力を増加するに伴って、横滑り抵抗力は抵抗係数にして、図-2に示す μ_s に等しいとする。すなわち、

$$\mu_s = \mu \cos \left(\sin^{-1} \frac{\mu \cdot \frac{P}{P_{\max}}}{\sqrt{\left(\frac{S}{W}\right)^2 + \left(\frac{\mu \cdot P}{P_{\max}}\right)^2}} \right)$$

半径の大きさが μ であるから、

$$\frac{\mu_s}{\mu} = \cos \left(\sin^{-1} \frac{P}{P_{\max}} \right) \tag{14}$$

この値を計算すると、表-1のようになる。

表-1 横滑り抵抗係数

$\frac{P}{P_{\max}}$	$\frac{\mu_s}{\mu} = \cos \left(\sin^{-1} \frac{P}{P_{\max}} \right)$
0.1	0.995
0.2	0.980
0.3	0.954
0.4	0.917
0.5	0.866
0.6	0.800
0.7	0.714
0.8	0.600
0.9	0.436
1.0	0

使用上限傾斜角度

傾斜地でトラクタを利用する場合、トラクタの使用可能な上限傾斜角度が問題となり、四輪トラクタは15°まで、二輪トラクタは20°までといった値がよく用いられる。しかし、この値は経験的なもので、理論的に確立されたものではない。⁴⁾

筆者は、かつてこの問題について総括したが、トラク

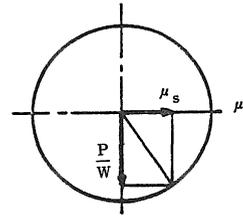


図-2 摩擦円による考え方

タの形態、使用方法、場所によって、この値は大きく変動し、果たして何度までが使用可能かとよく質問される。したがって、トラクタの使用可能と思われる上限傾斜角度を例として引用する機会が多い。この場合でも、車輪と地面との摩擦力が車体重量の傾斜面方向分力（接線力）に等しい傾斜角度を用いるか、あるいは、傾斜面上での車体の側方転倒角度を持って上限傾斜角度を定義している。しかし、この角度では、農作業は不可能である。

それでは、作業可能な上限傾斜角度は何度か？

これに答える意味で、作物にとって必要な作業精度を判断基準として、実用上の上限傾斜角度とする方法が用いられる場合もあるが、作業精度を数値的に表すことが困難なことから、人各々によって上限値がまちまちになることはいぬめない。

人間の脈はく数、その他生理的機能から、これを数値的にとらえる方法を講じた場合もあるが、未だ確立されていない。

一戸らは、全国的にアンケートをとり、運転しやすい、運転しにくい、中庸と各自の運転経験から上限傾斜角度をとらえ、傾斜圃場の利用性を定めようとした。⁵⁾しかしながら、上限傾斜角度内においても、正しい運転方法を定める要素は、未だに定められていない。この原因は、トラクタの諸元をはじめ、作業機の種類、作業方法、必要とする作業精度がまちまちであることにもよるが、トラクタが低速であるがために、このような概念的把握で、これまで見過されてきたのが現状である。

しかし、基礎的な研究を実施するたびに、それが正しい値であるかどうか、疑問をいただく場合も多かったので、筆者は、これまで、トラクタおよび土地の性状を斉一化した場合の、トラクタの挙動を研究してきた。これを、ここでは、その手始めとして、車輪の横滑りを起こさせるサイドフォースの条件から、トラクタの使用可能な上限傾斜角度を求めてみた。

表-2 二輪トラクタの使用上限傾斜角度(度)

車輪	μ	0.8	0.5	0.2
	けん引比			
転動輪	—	38.66	26.57	11.31
駆動輪	0.4	36.26	24.63	10.39
	0.6	32.62	21.80	9.09
	0.8	25.64	16.70	6.83

1. 二輪トラクタ

トラクタが等高線方向に走行するためには、機体偏角が必要である。機体偏角は、通常、傾斜上方側に向けられる。この場合、推進力の一部は、傾斜面を登坂する形に利用されるので、使用可能な上限傾斜角度は若干増加するが、ここでは、等高線に正置して走行する場合をとりあげる。この場合、二輪トラクタは傾斜角の方向に直進し、四輪トラクタは、前後車輪の横滑りに応じて左右に旋回する。

この状態におけるトラクタの使用上限傾斜角度は、車輪の横滑り抵抗力が、サイドフォースに等しくなる傾斜角度と、車体が側方に転倒する傾斜角度の、いずれか小さい方の傾斜角度で制限される。しかしながら、側方に転倒する傾斜角度は、車輪の間隔を拡げること等によって調整できるので、ここでは、前者の場合について考える。すなわち、

$$W \cdot \sin \theta = \mu \cos \left(\sin^{-1} \frac{P}{P_{\max}} \right) \cdot W \cdot \cos \theta$$

$$\therefore \tan \theta = \mu \cos \left(\sin^{-1} \frac{P}{P_{\max}} \right) = \mu_s \quad (15)$$

式(15)を計算したのが、表-2である。ここで、 $\mu=0.8$ は、コンクリート、あるいは固乾路面の場合で、 $\mu=0.2$ は、草生地、あるいは湿った圃場で、 μ が小さくなるにつれて、使用上限傾斜角度が小さくなることが分かる。また、同一圃場でも、けん引負荷の増大につれて小さくなることが分かる。

表-2を傾斜角度ごとに整理したのが図-3である。図中、等粘着抵抗係数線で示される線の右側が使用不能領域であり、左側が使用可能領域である。

したがって、 $\mu=0.2$ の圃場では、平地でも $0.2W_D$ のけん引しか発揮できないのに、傾斜地では、傾斜角度 5° でその0.88倍、 10° では0.37倍、 15° では走行すら不可能ということになる。しかし、実際には、前述の通り機体偏角が必要で、推進力の一部が登坂用として用いられるので、けん引力はさらに小さくなる。

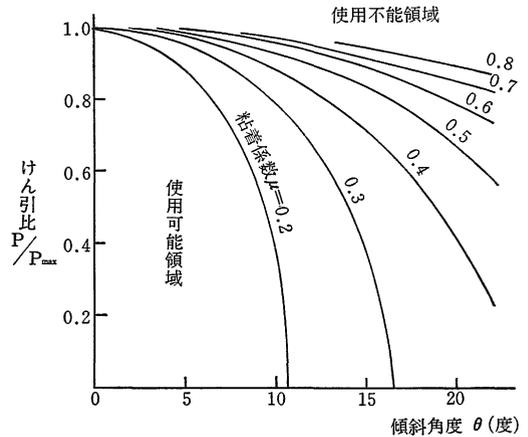


図-3 二輪トラクタの使用上限傾斜角度

2. 四輪トラクタ

四輪トラクタの場合は、前述のように重量転移があり、また、各車輪に加わるサイドフォースが異なるので、二輪トラクタのように簡単でない。そこで、車輪の横滑りは左右車輪で異なるが、平均の横滑り、すなわち車軸中央点における横滑りを持って、前輪および後輪それぞれの横滑りとすることができる。

したがって、前、後輪に加わるサイドフォースをそれぞれ S_F, S_R とすると、サイドフォース係数は、それぞれ

$$\frac{S_F}{W_F} = \frac{n \cdot \sin \theta \cdot \cos \alpha + (e \cdot \sin \alpha - c \cdot \cos \alpha) \frac{P}{W}}{n \cdot \cos \theta - H \cdot \sin \theta \cdot \sin \alpha - h \cdot \frac{P}{W} \cdot \cos \alpha} \quad (16)$$

$$\frac{S_R}{W_R} = \frac{m \cdot \sin \theta \cdot \cos \alpha + \{c \cdot \cos \alpha - (L + e) \cdot \sin \alpha\} \frac{P}{W}}{m \cdot \cos \theta + H \cdot \sin \theta \cdot \sin \alpha + h \cdot \frac{P}{W} \cdot \cos \alpha} \quad (17)$$

ここで、 $c=0, h=0, \alpha=0$ とする。すなわち、重量転移もなく、また等高線に正置した場合で、また、横滑り抵抗係数を、転動輪には μ 、駆動輪には μ_s を用いると、使用上限傾斜角度は

$$\text{転動輪} \quad \frac{S_F}{W_F} = \tan \theta \leq \mu \quad (18)$$

$$\text{駆動輪} \quad \frac{S_R}{W_R} = \tan \theta \leq \mu_s \quad (19)$$

すなわち、駆動輪は、二輪トラクタの場合と同一になる。

しかしながら、 $h=0$ はあり得ないので、 α のみ0とし、同様に μ, μ_s を用いると、

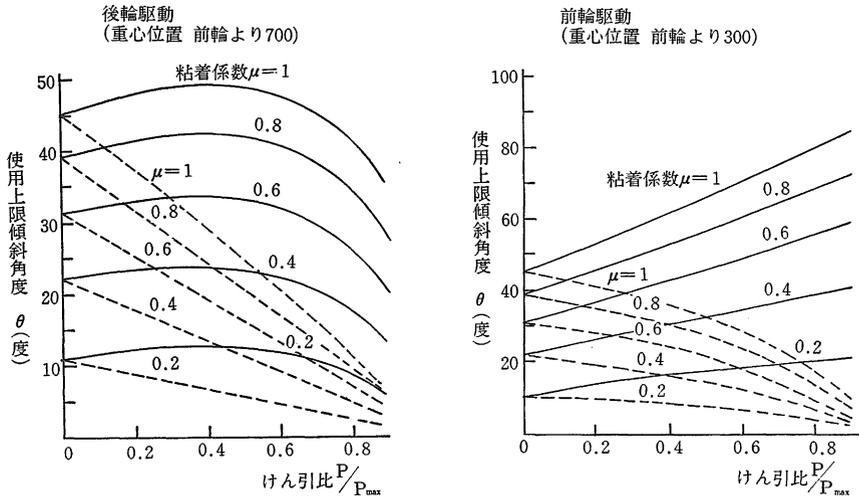


図-4 四輪トラクタの使用上限傾斜角度
 (重心地上高 けん引点位置(後輪より後方) 800 実線 後輪)
 (けん引点地上高 300 破線 前輪)

後輪駆動の場合

$$\text{前輪} \quad \sin \theta - \mu \cdot \cos \theta \leq \frac{1}{n} (c - \mu \cdot h) - \frac{P}{W} \quad (20)$$

$$\text{後輪} \quad \sin \theta - \mu_s \cdot \cos \theta \leq \frac{1}{m} (\mu_s \cdot h - c) - \frac{P}{W} \quad (21)$$

式(20), (21)より, 上限傾斜角度は, 右辺の正負によって, 式(20), (21)の値より増減する。また, この値は, 前輪と後輪とで反対の性質を示す。したがって, 後輪の上限傾斜角度を増加させようとする場合は, m を小さく, しかも, $(\mu_s \cdot h - c)$ の値を正の方向に増加させる必要がある。前輪の上限傾斜角度を増加させるためには, $(c - \mu \cdot h)$ の値を正の方向に増加させる必要がある。しかしながら, 通常は, 後駆動輪の上限傾斜角度の方が大きいので, 前駆動輪の上限傾斜角度の増加に重点が置かれるべきである。

前輪駆動の場合は, 式(20), (21)において, μ と μ_s を交換することによって得られる。すなわち,

前輪駆動の場合

$$\text{前輪} \quad \sin \theta - \mu_s \cdot \cos \theta \leq \frac{1}{n} (c - \mu_s \cdot h) - \frac{P}{W} \quad (22)$$

$$\text{後輪} \quad \sin \theta - \mu \cdot \cos \theta \leq \frac{1}{m} (\mu \cdot h - c) - \frac{P}{W} \quad (23)$$

図-4は, $c=0, \alpha=0$ として, けん引比と, 上限傾斜角度の関係の求めたものである。図から, 前輪駆動, 後輪駆動ともに, 後輪は前輪よりも, 上限傾斜角度が大きく, 特に, 前輪駆動の後駆動輪は, けん引力の増加とともに, 増加が著しい。前輪はいずれにしても, けん引

力の増加とともに減少しているが, 後輪駆動の場合は, 後輪はけん引力の影響を受けにくいので, けん引力の変動があっても, 割合安定して運転できるのではなからうか?

結 語

傾斜地では, 農地造成あるいは圃場整備する場合に, トラクタの使用可能な上限傾斜角度を何度にするべきかが最大の問題点である。それには, トラクタを含む機械の, 圃場の傾斜によって, 使用しにくくなることの何らかの基準が必要である。平地における基準⁶⁾は役に立たない。むしろ, 平地より性能の低下する度合が必要で, その最大限のところは使用不可能になる角度である。その間の角度で, 角度によって低下する度合が使用しにくさの尺度として用いられる。しかしながら, この度合は, すべて経験による判断基準でしかないことは, 前節で述べたとおりである。けん引力の低下状況を示した筆者の論文⁷⁾でも, ある定まった粘着係数のところでのけん引力低下状況であるにすぎない。

そこで, 筆者は, 横滑り抵抗力に, 摩擦円の考えを導入し, 車輪の横滑り抵抗力から, 判断基準の一つである使用上限傾斜角度を導いた。

しかしながら, トラクタに用いる車輪は, スムースタイヤより, ラグ付タイヤを用いることが多い。後者の場合は, 摩擦円の理論を考えに入れる必要があるが, 剪断力を考えない場合は, 摩擦円の考えによっても影響がない。

また、傾斜地では、トラクタは、上向偏角を付けて、横滑りの防止をするが、偏角を付けることにより、横滑り抵抗力も増加する。しかし、こゝでは、多くの仮定のもとでの判断基準であるので、その誤差を考えて、あえて等高線方向に正置するトラクタとした。

しかしながら、上限傾斜角度という極限状態においては、実験は不可能であるばかりでなく、さらに、斉一化された圃場でも、たとえ板上の実験でさえも、その日の天候（日照、気温、湿度）、土壌状態等によって、車輪と地面の間の摩擦力が変化し、たとえ偏角を0としても、トラクタの最大けん引力すら明確につかめない現状で、また危険を伴うものである。したがって、こゝでは、考え方のみを記述した。この考え方が、傾斜地における機械利用、その他圃場整備等上限傾斜角度を決定する際に、参考となれば幸である。

摘 要

1. この研究は、車輪の横滑り抵抗力が0になる条件から、等高線に正置するトラクタの、使用可能な上限傾斜角度を決定する方法について、理論的な考え方を示したものである。
2. トラクタおよび走行面は、変形しない剛体で、また、けん引力は、力率が一定で、車輪と地面との間

の摩擦力のみによって決定される理想系とする。

3. 横滑り抵抗力は、転動輪は摩擦力、駆動輪はけん引力によって影響される、すなわち摩擦円の理論に基づく大きさであるとする。
4. 二輪トラクタの上限傾斜角度は、摩擦力に比例し、けん引負荷に反比例して増減する。
5. 四輪トラクタの上限傾斜角度は、重心位置、けん引高さ、けん引点の偏心度にも関係し、また、これらは、前輪と後輪とでそれぞれ反対に作用する。

参 考 文 献

1. 下田 茂：自動車工学 共立出版 東京 1975, p. 164
2. 樋口健治：自動車工学 朝倉 東京 1980, p. 97
3. 中尾清治：島大農工研報 3号：48, 1981
4. 田辺 一：機械化農業 2640：59-61, 1971 及び 2644：45, 1971
5. 戸刈義治、一戸貞光：土地利用と機械化 農機研大宮 1967
6. 室島錚一郎：農業評価と土地利用計画 養賢堂 東京 1961
7. 田辺 一、他：農機誌 Vol 28(4)：204-207, 1969

Summary

1. This study shows a theoretical prediction method on the upper limit angle of tractor use, facing forward to the contour line of slope field.

2. Tractor and its running surface are assumed to be ideal systems, that is they each are rigid bodies with smooth surfaces. Then traction force is developed only by the friction force between them. The power factor on the traction is also assumed in constant number.

3. The resistance force on the driven wheel for side slip is in proportion to the friction force. But the one on the drive wheel is effected by both the friction force and the traction force, which are in accordance with the principle of friction circle.

4. The upper limit angle of 2 wheel tractor becomes larger with the friction force, and on the contrary smaller with the traction force.

5. The one of 4 wheel tractor is related to the position of center of gravity, hitch height and hitch eccentricity, and they work in adverse effect on front and rear wheel, respectively.