

ホイールトラクタの粘着けん引力

誌名	日本林學會誌 = Journal of the Japanese Forestry Society
ISSN	0021485X
著者	酒井, 秀夫 松尾, 毅 楊, 建華
巻/号	72巻1号
掲載ページ	p. 46-51
発行年月	1990年1月

ホイールトラクタの粘着けん引力

楊 建華*・酒井秀夫*・松尾 毅*・村山茂明*

YANG, Jian Hua, SAKAI, Hideo, MATSUO, Takeshi, and MURAYAMA, Shigeaki: **The drawbar pull of skidders** J. Jpn. For. Soc. 72: 46~51, 1990 The running resistance and the adhesion force of skidders were investigated in relation to the sinkage from BEKKER's resistance theory. 1) The running resistance of hillside skidders whose center of gravity location and wheel-load distribution can be changed is smaller than that of common skidders when climbing slopes because of the sinkage caused by the difference of load distribution between the up-side wheels and the down-side ones. For example, the running resistance of a common small-sized skidder to sinkage is 10 % larger than that of the same-sized hillside skidder when climbing. 2) The increase of the adhesion force is slower than the increase of the running resistance. Therefore, the drawbar pull arising from the difference between the adhesion force and the running resistance turns out to be a convex curve with a maximum value. 3) The running resistance of a hillside skidder will be 14 % smaller than that of a common skidder, and the drawbar pull of the hillside skidder will be 4.6 % larger by a calculation based on the application of UFFELMANN's sinkage equation. 4) It was recognized from our experiments that the difference of drawbar pull between hillside skidder and a common skidder was nearly equal to the above theoretical values on the first pass, and on forest land which skidders had traversed many times, the drawbar pull of the hillside skidder was approximately twice that of the common skidder.

I. はじめに

ホイールトラクタの粘着けん引力にとって、車輪の接地状態と土中の応力の分布状態が問題になる。接地状態はタイヤと地面の相対的な硬さによって変化し、土中の応力の分布状態は輪荷重によって変化する。これらについては、M. G. BEKKER (2) を始めとする多くの研究がある (1, 3~9)。ここでは BEKKER の走行抵抗の理論に基づいて、地面の沈下量と走行抵抗、粘着力との関係を考え、また、沈下量については UFFELMANN の理論 (8) を見直すことにより、ホイールトラクタの走行抵抗、粘着けん引力の検討を行った。とくに重心位置を強制的に移動しうるメカニズムを有する「重心移動形トラクタ」を想定して、その粘着けん引力の検討を行った。

II. 登坂時の沈下量の差による走行抵抗

ホイールトラクタが傾斜度 α の勾配を登坂するときの勾配抵抗 P は、車両の荷重配分の差に基づく地面沈下およびタイヤ変形を考えなければ、

$$P = W \sin \alpha \quad (1)$$

ただし、 W : 全重量, α : 勾配

である。しかし、登坂時においては、重心移動形トラクタが山側車輪に荷重を移すことにより荷重配分を均等化することができるのに対して、普通トラクタは谷側車輪の荷重配分が過大になる。そこで、この荷重配分の違いによって生じる地面沈下によってトラクタ車体が傾斜度 α に対してさらに $\Delta\alpha$ 沈むものとするれば、普通トラクタが立っている斜面の傾斜度は厳密には $\alpha + \Delta\alpha$ となる。したがって図-1 の実線のトラクタを下から支えるには、

$$P_a = W \sin (\alpha + \Delta\alpha) \quad (2)$$

の力を必要とすることになる。 α による勾配抵抗は (1) 式であるが、(2) 式は沈下量によって増加した走行抵抗と考えることができる。

このとき、普通トラクタの重心移動形トラクタに対する走行抵抗の増加量は

$$\Delta P \approx (dP_a/d\alpha)\Delta\alpha = W \cos \alpha \Delta\alpha \quad (3)$$

$$\frac{\Delta P}{P} = \cot \alpha \frac{\Delta Z}{L} \quad (4)$$

ただし、 L : トラクタの軸距, ΔZ : 地面の沈下量, $\Delta\alpha \approx \Delta Z/L$ ($\Delta Z \ll L$)

となる。たとえば $\alpha = 17^\circ$ の林内において小形トラクタを想定して $L = 175$ cm, $\Delta Z = 5$ cm とすると、10 % も

* 宇都宮大学農学部 Fac. of Agric., Utsunomiya Univ., Utsunomiya 321

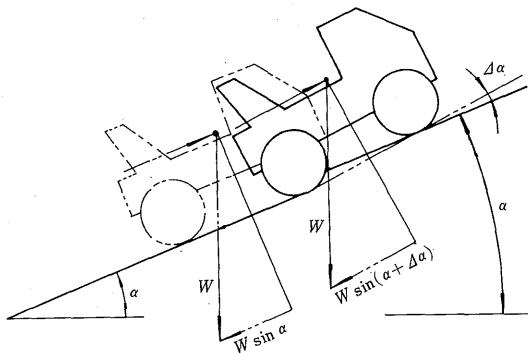


図-1. 沈下量の差による走行抵抗
Running resistance from the difference of sinkage

の走行抵抗の増加となることが予想される。

同様に水平に姿勢制御可能な段軸トラクタにおいても、等高線走行するとき谷側車輪の地面沈下量を普通トラクタより小さく抑えることができれば、段軸トラクタが受ける横滑り力は普通トラクタより小さいと考えることができる。

III. 走行抵抗と粘着けん引力

1. 地面沈下量と走行抵抗の関係

BEKKERは、トラクタが前進するとき車輪前の土の圧縮による反力によって走行抵抗が生じる(8)と述べている。すなわち、半径 R 、単位車輪幅の車輪において、タイヤの変形を考えないことにすれば、車輪が移動することにより車輪前部の土が圧縮されて、反力による応力が車輪の半径方向に働き、この合力の水平分力が走行抵抗 P_1 となる(図-2)。 P_1 は $\sum F_x=0$ より、

$$P_1 = \int_0^{\theta_1} \sigma \sin \theta ds = \int_0^{\theta_1} \sigma R \sin \theta d\theta$$

$$= R\sigma(1 - \cos \theta_1) \quad (5)$$

ただし、 σ は地面の反力

$$\cos \theta_1 = \frac{R-Z}{R}$$

である(8)。

この BEKKER の考え方によれば、さらに車輪が移動して沈下量が kZ になると ($k>1$) (図-2)、走行抵抗 P_2 は

$$P_2 = R\sigma(1 - \cos \theta_2) \quad (6)$$

ただし、

$$\cos \theta_2 = \frac{R-kZ}{R}$$

となる。したがって、

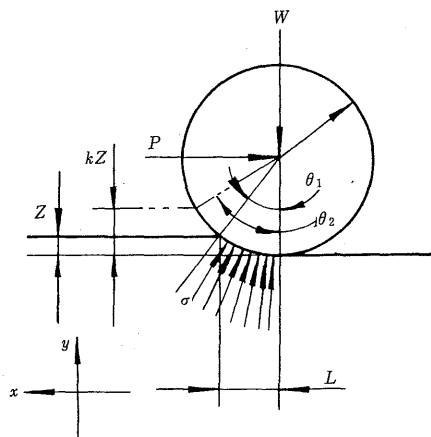


図-2. 走行抵抗
Running resistance

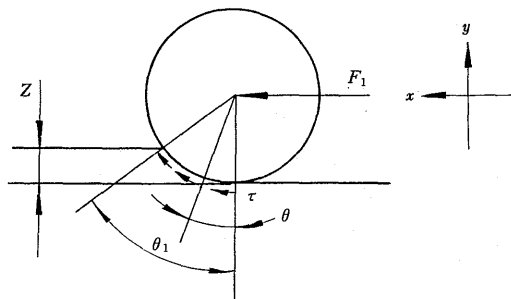


図-3. 粘着力の分布
The distribution of the adhesion force

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{R\sigma(1 - \cos \theta_2)}{R\sigma(1 - \cos \theta_1)} = k \quad (7)$$

より、走行抵抗の増加は沈下量の増加に比例するものと考えられる。

2. 地面沈下量と粘着力の関係

トラクタのけん引力となるタイヤの粘着力は土のせん断抵抗によって得られると考えられる(1)。しかし、猪内によれば、タイヤラグが小さい場合には完全に土をせん断しないために、接地圧の増加とともに理論値とのずれが大きくなるので、集材用トラクタのようにラグの高さがあまり高くない場合には、軟弱な地面においてもタイヤの粘着力を土とタイヤの摩擦によるものと考えることができる(7)。そこで本論ではタイヤの粘着力を土とタイヤとの摩擦によって得られるものと考えことにする。単位面積の摩擦力を τ とし、 τ は図-3のようにタイヤ接地面全面にわたって分布し、かつ、滑り速度に無関係に一定とする。このとき、粘着力 F_1 は $\sum F_x=0$ より、

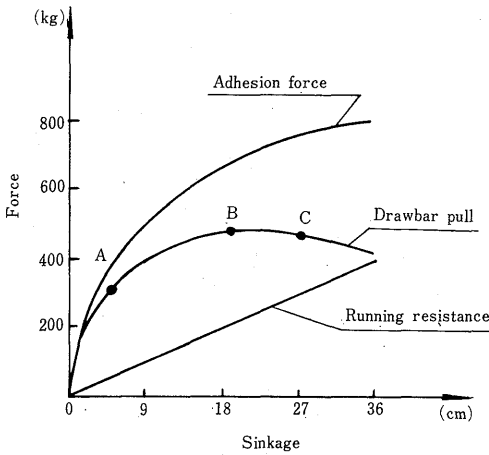


図-4. 粘着けん引力和沈下量
Drawbar pull and sinkage

$$F_1 = \int_0^{\theta_1} \tau \cos \theta ds$$

$$= \int_0^{\theta_1} \tau R \cos \theta d\theta = R\tau \sin \theta_1 \quad (8)$$

とすることができる。沈下量が kZ になると、このときの粘着力 F_2 は同様に

$$F_2 = R\tau \sin \theta_2 \quad (9)$$

となり、

$$\sin \theta_1 = \frac{\sqrt{R^2 - (R - Z)^2}}{R} \quad (10)$$

$$\sin \theta_2 = \frac{\sqrt{R^2 - (R - kZ)^2}}{R} \quad (11)$$

より、

$$F_1 = \tau \sqrt{2RZ - Z^2} \quad (12)$$

$$F_2 = \tau \sqrt{k} \sqrt{2RZ - kZ^2} \quad (13)$$

$$\therefore \frac{F_2}{F_1} = \frac{\tau \sqrt{k} \sqrt{2RZ - kZ^2}}{\tau \sqrt{2RZ - Z^2}} < \frac{\sqrt{k} \sqrt{2RZ - Z^2}}{\sqrt{2RZ - Z^2}}$$

$$= \sqrt{k} < k \quad (14)$$

となる。

(14)式より、沈下量が増加するにつれて、粘着力も増加するが、その増加率は(7)式の走行抵抗の増加よりも小さいので、粘着力から走行抵抗を引いて得られる粘着けん引力は上凸曲線となり、最大値をもつことになる(図-4)。

3. UFFELMANN理論における地面沈下量

UFFELMANNによれば(8)、地面応力の垂直分力の合計 $\Sigma \sigma_y$ は車輪荷重 W に等しい(図-2)。したがって、

$$\Sigma \sigma_y = W = \int_0^{\theta_1} b\sigma \cos \theta ds = \int_0^{\theta_1} b\sigma R \cos \theta d\theta$$

$$= bR\sigma \sin \theta_1 \quad (15)$$

ただし、 b : 車輪幅
となり、(10)、(15)式より、

$$Z^2 - 2RZ + \frac{W^2}{\sigma^2 b^2} = 0 \quad (16)$$

となる。

UFFELMANNは沈下量が微小であれば $Z^2 \approx 0$ として理論を進めているが、本論では沈下量による走行抵抗と粘着けん引力が問題となるので、この省略を行わずに計算を進めることにする。(16)式より、沈下量 Z は

$$Z = R \left[1 \pm \sqrt{1 - \left(\frac{W}{R\sigma b} \right)^2} \right] \quad (17)$$

となるが、実験の結果、沈下量 Z は

$$Z = k_1 R \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{W}{k_0 R\sigma b} \right)^2} \right] \quad (18)$$

となる。ここで、 Rb がタイヤ接触面積の車輪荷重方向の投影面積に等しいことから、車輪の接地状態を表す係数 k_0 を(18)式に組み込むこととし、駆動輪駆動時に車輪が図-3のように車輪前部で接地するときを $k_0=1$ とし、駆動輪が駆動しないで、ただ支持している場合には、車輪後部の接地面積が車輪前部と同じになるので、 $k_0=2$ とする。また、 k_1 はトレッドによってタイヤの支持面積が減少し、沈下量が増加することを表す係数である ($k_1 > 1$)。

なお、 R, b が一定のとき σ が小さすぎると、(18)式のルート内はマイナスとなる。これは以下のような場合が考えられるが、実際にはこのようなことは起こらない。

まず $k_0=1$ の場合は、 $k_0 Rb\sigma$ は車輪の駆動状態での支持力である。 $k_0 Rb\sigma < W$ の場合はタイヤが沈下して、タイヤの接触面積 S がタイヤの後部に $k_0 S\sigma > W$ まで増加し、 $k_0 S\sigma = W$ の時点で、車輪が回転して前進できるようになる。しかし、少し前進すると、タイヤ後部の接地面積が再び減少して $k_0 Rb\sigma < W$ の状態になり、これを繰り返しながら、タイヤは地面を掘りつつ沈んでいき、けん引走行ができなくなる。 $k_0=2$ のときも、 $k_0 Rb\sigma < W$ ならば、上記と同様に駆動輪が駆動しないで、トラクタが地面に沈み込んでしまう。また、 R, b, σ に対して、 W が大きすぎてもルート内はマイナスとなる。これに対しては、 W に応じて R, b が大きくなるように車輪を選ぶことにより、タイヤの沈下を防止することができる。

4. 粘着けん引力

(5), (8), (10), (18)式より, 走行抵抗 P および粘着けん引力 F は

$$P = k_3 b \sigma Z \tag{19}$$

$$F = b k_2 \tau \sqrt{2 R Z - Z^2} - b k_3 \sigma Z \tag{20}$$

となる。ここで, k_2 はトレッドによる粘着力の修正係数, k_3 はトレッドによるタイヤ支持面積の減少による走行抵抗の減少係数である ($k_3 < 1$)。

5. 重心移動形トラクタの粘着けん引力

普通トラクタは斜面の傾斜が増加するにつれて, 山側車輪の荷重が小さくなり, 粘着けん引力が図-4でいえば A 点付近になり, 逆に谷側車輪は荷重が大きすぎて, 図-4 C 点になるおそれがある。したがって, 普通トラクタは山側, 谷側同時に最大粘着けん引力を得ることができない。一方, 重心移動形トラクタは, 山側車輪と谷側車輪の荷重分布を変えることにより両輪同時に最適に近い沈下量を得ることができるので, 粘着けん引力をある程度まで大きくすることができる。また, 地面の反力による走行抵抗および勾配に対する走行抵抗も小さくすることができるので, 重心移動形トラクタの粘着けん引力はさらに増大するものと考えられる。

いま $k_0=1, k_1=1.1, k_2=0.8, k_3=0.4$ とし, 普通トラクタ, 重心移動形トラクタとも $R=42.5 \text{ cm}, b=24 \text{ cm}, \tau=1 \text{ kg/cm}^2, \sigma=1.1 \text{ kg/cm}^2$ とし, W を表-1 の値を用いることにすると, (19), (20)式より, 重心移動形トラクタは普通トラクタより走行抵抗が 14% 小さくなり, 粘着けん引力は 4.6% 大きくすることができる。さらに(5)式より 17° の勾配において地面沈下

による走行抵抗の差を 10% とすれば, 重心移動形トラクタは普通トラクタより登坂時の走行抵抗が 24% 小さくなり, 粘着けん引力は 14.6% 大きくすることができる。同様に, 山側車輪と谷側車輪の荷重分布を変えることができる段軸トラクタの等高線走行についても, 普通トラクタよりも粘着けん引力を大きくすることができるものと考えられる。

IV. 実 験

以上の考え方を確かめるために宇都宮大学船生演習林内の 17° の斜面において, I 社製ホイールトラクタ T 10 (表-1) を用いて実験を行った。

表-1. 実験機の諸元と車輪の荷重分布
Specifications of a skidder examined and the load distribution of the wheels

Wheel base	175 cm
Diameter of tires	85 cm
Width of tires	24 cm
Air pressure in tires	3 kg/cm ²
Weight of skidder	1755 kg
Additional weight of load for adjusting the location of the center of gravity	80 kg
Location of center of gravity :	
(Front shaft—center of gravity)/(center of gravity—rear shaft)	0.7
Height of the center of gravity	55 cm
Load distribution of wheels on a 17° slope	
Up-side two wheels	555 kg
Down-side two wheels	1215 kg
Load distribution of wheels used for hillside skidder	
Up-side two wheels	853 kg
Down-side two wheels	896 kg

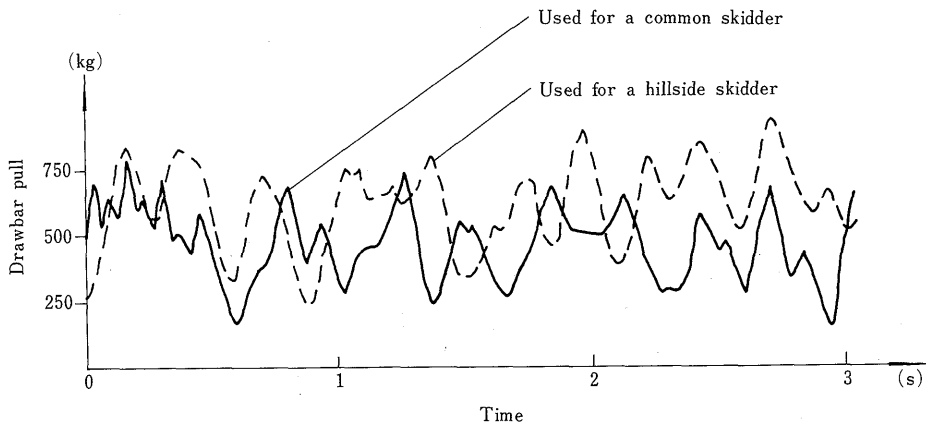


図-5. 粘着けん引力の比較 (一次走行)
Comparison of drawbar pulls (the first pass)

運転手搭乗時のトラクタの重心位置を、車軸にかかる荷重と接地点に関するモーメントから求め(4)、登坂時において山側車輪と谷側車輪の荷重がだいたい同じになるように、実験機前部に付加重量 W_1 を取り付けた。この実験機を引張用ロードセルを介してけん引機(M社製BD-2型3トンプルドーザ)でけん引し、走行抵抗を測定した。次に、このけん引機を充分制動させて実験機でけん引し、実験機のスリップ率が100%の一定状態となって走行できなくなるときのけん引力を粘着けん引力とした。次に実験機の重心位置に同じ付加重量 W_1 を取り付けた普通トラクタの状態に戻して同様に走行抵抗および粘着けん引力を測定した。

実験はまず車輛未走行の状態の路面上で行い(一次走行とする)、さらに数回走行したわだち上での走行(二次走行)について測定した。実験の結果、一次走行では、重心移動形トラクタは普通トラクタより走行抵抗が25%小さく、粘着けん引力は11%大きくなり(表-2、図-5)、前記の理論値に近い値が得られた。二次走行になると、路面が平滑になるために粘着けん引力は小さくなった。しかし、普通トラクタでは粘着けん引力が一次走行より57%も減少したのに対し、重心移動形トラクタでは25%の減少であった。この結果、二次走行では重心移動形トラクタの粘着けん引力が普通トラクタの2倍近くになった(表-3、図-6)。また、粘着けん引力の変化も、重心移動形トラクタの方が安定していた(図-6)。

表-2. 走行抵抗と粘着けん引力の増減(一次走行)
Running resistance and drawbar pull (the first pass)

	Running resistance (kg)	Drawbar pull (kg)
a. Common skidder	140.8	588.1
b. Hillside skidder	104.9	654.4
c. Difference $b-a$	-35.9	66.3
Margin of superiority c/a	25 %	11 %

V. おわりに

地面沈下量に応じて粘着けん引力に最大値が生じ、重心移動形トラクタは普通トラクタより走行抵抗が小さく、粘着けん引力が大きくなること示された。普通トラクタの重心を傾斜度に応じて移動させて重心移動形トラクタとすることができれば、走行抵抗が減少し、粘着けん引力を増加させることができるので、

表-3. 二次走行の粘着けん引力
Drawbar pull on the pass which skidders had traversed many times

	Maximum (kg)	Minimum (kg)	Average (kg)	Difference between the first pass and the pass of several times	Percentage of decrease from the first pass (%)
a. Common skidder	485.1	127.9	253.3	334.8	57
b. Hillside skidder	452.1	242.0	490.2	164.2	25
Margin of superiority $\frac{b-a}{a}$	7 %	89 %	94 %		

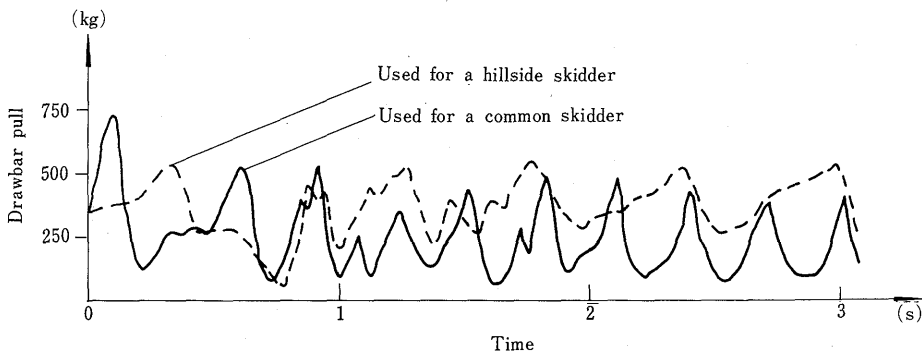


図-6. 粘着けん引力の比較(二次走行)
Comparison of drawbar pulls on the pass which skidders had traversed many times

ん引性能の向上が期待でき、今後の林業用車両の足回りの設計に応用することができる。

上記の理論はタイヤの変形を考えていないが、今後、沈下量を示す k_1, k_2, k_3 などのパラメータも含めて、タイヤの変形やスリップ、タイヤのトレッドの表土への差込み、地面の沈下量について検討を行い、理論値の正確化を図っていく予定である。

引用文献

- (1) BEKKER, M. G.: Theory of land-locomotion, 2nd ed., 522 pp, The Univ. of Michigan Press, Ann Arbor, Mich., 1962
- (2) ———: Introduction to terrain-vehicle system. 864 pp, The Univ. of Michigan Press, Ann Arbor, Mich., 1969
- (3) DAGAN, G., and TULIN, M. P.: A study of the flow of rigid-plastic clay beneath a driven wheel. J. Terramechanics 6(2): 9~27, 1969
- (4) 小林 明: 最新自動車力学. 33~34, 図書出版社, 東京, 1975
- (5) OIDA, A.: Analysis of rheological deformation of soil by means of finite element method. J. Terramechanics 21 (3): 237~251, 1984
- (6) PERUMPRAL, J. V., LIJEDAHL, J. B., and PERLOFF, W. H.: A numerical method for predicting the stress distribution and soil deformation under a tractor wheel. J. Terramechanics 8(1): 9~22, 1971
- (7) 猪内正雄: 集材トラクタの性能解析に関する基礎的研究. 岩手大演報 11: 31~32, 1980
- (8) WILLIS, B. M. D., BARRE, F. M., and SHAW, G. J.: An investigation into rolling resistance theories for towed rigid wheels. J. Terramechanics 2(1): 24~53, 1965
- (9) YONG, R. N., and WINDISCH, E.: Determination of wheel contact stresses from measured instantaneous soil deformations. J. Terramechanics 7(3-4): 57~67, 1970

(1989年1月26日受理)