

投稿論文 (和文)
PAPERS

アスファルト舗装路面上のトラクターの 登坂下降時走行性能

室 達朗*・深川良一**・河原莊一郎***

自重40kNのゴム製履帯式トラクターが種々の傾斜角をもつアスファルト舗装路面上を登坂下降走行する場合について実験と解析を行った。その結果、最適なグラウサ形状は底長5cmの等辺台形型グラウサであり、有効制・駆動力は路面傾斜角が増大するとともに減少し、また登坂駆動時には傾斜角が増大するにつれて接地圧分布は履帯後方向に向かって増大するが、下降制動時にはその反対となることが明らかとなった。

Key Words : asphalt pavement, rubber tracked tractor, driving and braking, slope angle, grouser shape

1. 緒 言

近年、鋼製履帯に代わり低騒音・低振動で舗装路面を傷めないゴム製履帯を設置したトラクター¹⁾が開発されている。さらに、傾斜路面上を制・駆動状態で下降または登坂走行する場合に十分大きな有効制・駆動力を発揮するためのグラウサ形状の最適化とトラクターの下降登坂能力向上のための研究が重要となってきている。すでに、コンクリート舗装路面上におけるゴム製履帯式トラクターの傾斜地における走行性能やゴム製グラウサの最適形状に関する研究²⁾を実施してきた。ここでは、アスファルト舗装路面上における最適なグラウサ形状を提案すること、及び傾斜したアスファルト舗装路面を登坂下降する場合の走行性能を明らかにすることを主たる研究の目的としている。まず、ゴム製グラウサの形状効果を調査するために、矩形・台形型およびグラウサ接地長の路盤-履帯系定数に与える影響について実験を行い、アスファルト舗装路面上を制・駆動状態で、傾斜地を走行する自重40kNのゴム製履帯式小型トラクターの走行性能についてシミュレーション解析を行っている。さらに、最適有効制・駆動力を発揮する履帯形状を明らかにするとともに、制・駆動力、有効牽引力と有効制動力、地盤反力偏心率、各種エネルギー、牽引効率と制動効率及び地盤接地圧分布のスリップ率による変化を種々の傾斜角を有するアスファルト舗装路面上で解析した結果について述べる。

2. 路盤-履帯系定数

ゴム製グラウサと舗装路面との間での路盤-履帯系定

数を決定するために、矩形型と等辺台形型の2種類のグラウサをそれぞれ5個取り付け付けた履帯モデルについてアスファルト舗装路面上で牽引試験を実施した。Fig.1は、それぞれの履帯モデルの形状寸法を示したものである。矩形型グラウサは、高さ $H=6.5$ cm、底長 $L=3, 5$ cmの2種類であり、等辺台形型グラウサは、傾斜角 $\alpha=\pi/6$ rad、高さ $H=6.5$ cm、底長 $L=2, 3, 4$ 及び 5 cmの4種類である。グラウサピッチ G_p は 14.6 cm、グラウサピッチ高さ比 G_p/H は 2.25 に全て統一されている。また、履帯モデルの長さ $D=73$ cm、幅 $B=25$ cmとしている。

Fig.2は、一例として、あるアスファルト舗装路面上で $L=3$ cmの等辺台形型履帯モデルを各接地圧 p の下で牽引したときのせん断抵抗 τ とスリップ量 j の関係を示したものである。いずれも、多少の波状起伏はあるがHump型³⁾に属しており、

$$\tau(j) = f_m p \left[1 - \frac{\sqrt{1 - \frac{f_m}{f_s}} \exp \left[\left(\frac{j}{j_m} \right) \log \left\{ 1 + \frac{f_s}{f_m} \left(\sqrt{1 - \frac{f_m}{f_s}} - 1 \right) \right\} \right]}{\sqrt{1 - \frac{f_m}{f_s} \left(1 - \frac{2f_s}{f_m} \right) + \frac{2f_s}{f_m} - 2}} \right] \cdot \left[1 - \exp \left[\left(\frac{j}{j_m} \right) \log \left\{ 1 + \frac{f_s}{f_m} \left(\sqrt{1 - \frac{f_m}{f_s}} - 1 \right) \right\} \right] \right] \quad (1)$$

なる式で表現される路盤-履帯系定数 f_m, f_s, j_m を決定することができる。Table 1に矩形、等辺台形型の各グラウサについて計6通りの試験によって得られた路盤-履帯系定数を示す。この場合、アスファルト舗装路面は弾性体であり、滑り沈下量は発生しないので、他の地盤-履帯系定数⁴⁾である履帯載荷試験より得られる定数は $k_1=9.8 \times 10^4, n_1=1, k_2=n_2=0$ とし、また履帯牽引時の滑り沈下量試験より得られる定数は $c_0=c_1=c_2=0$ としている。また、定数 f_m, f_s, j_m に対する寸法効果の影響

* 正会員 工博 愛媛大学教授 工学部土木海洋工学科 (〒790 松山市文京町3)

** 正会員 工博 愛媛大学助教授 工学部土木海洋工学科

*** 正会員 工修 愛媛大学助手 工学部土木海洋工学科

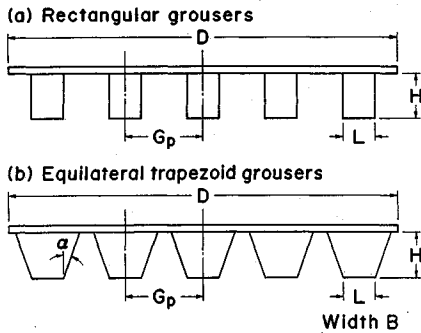


Fig. 1 2 kinds of track model plate and shape of rubber grouser

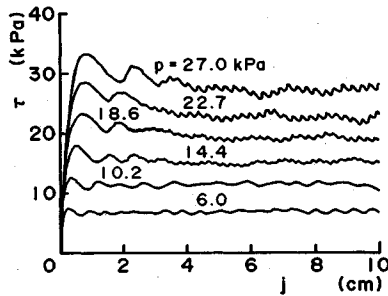


Fig. 2 Relations between shear resistance τ and amount of slippage j for various normal pressure p (Asphalt pavement, Equilateral trapezoid rubber grouser of $L=3$ cm)

は考慮する必要がない。

3. 作用力及びエネルギー平衡式

Fig. 3は傾斜角 β の舗装路面上を制・駆動状態で下降または登坂走行する場合の履帯部分に作用する諸力を示したものである。正の駆動トルクまたは負の制動トルク Q が後輪スプロケットに作用するとき、正の駆動力または負の制動力 T_1 がそれぞれ履帯の下部または上部に与えられる。ゴム製履帯と舗装路面の境界面に作用するせん断抵抗の総和で与えられる正の推進力または負の抗力 T_3 は履帯接地部のグラウサ底面に作用する。正の有効駆動力または負の有効制動力 T_4 は F 点において傾斜舗装路面に平行に作用する。地盤反力偏心率 e_i は後輪軸廻りのモーメントの釣合より次式のように算定される。

$$e_i = \frac{1}{2} + \frac{1}{PD} \left[T_4(h_d - R_r) + W \left\{ (h_g - R_r) \sin \beta - D \left(\frac{1}{2} - e \right) \cos \beta \right\} \right] \quad (2)$$

ここに、 D は履帯接地長、 h_d は F 点の高さ、 e は車両重心の偏心率、 R_r は後輪スプロケットの半径である。

T_1 、 T_3 、 T_4 、 P および W の作用力の間には、次式の関係が成立する。

Table 1 Pavement-track system constants

Pavement	Grouser Type	L (cm)	f_s	f_m	j_m (cm)
Asphalt	Rectangular	3	0.920	0.916	1.087
		5	0.980	0.949	0.489
	Equilateral trapezoid	2	1.134	1.010	0.662
		3	1.217	1.026	0.561
		4	1.200	1.081	0.686
		5	1.259	1.037	0.393

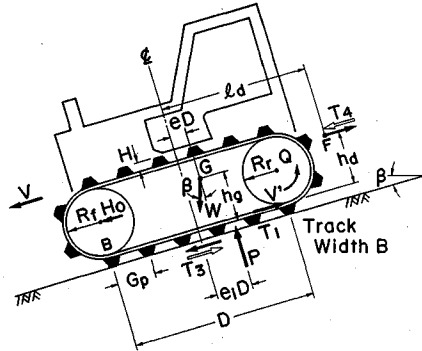


Fig. 3 Several forces acting on the two track belts at driving (→) and braking (←) state on sloped pavement road

$$T_1 = T_3 \quad (3)$$

$$P = W \cos \beta \quad (4)$$

$$T_4 = T_3 - W \sin \beta \quad (5)$$

駆動状態における推進力 T_3 は、式(1)において $j = j_w + i_d \cdot X$ を代入し、

$$T_3 = 2B \int_0^D \tau(j_w + i_d X) dX \quad (6)$$

で算定できる。ここに、 j_w は履帯接地部に作用する車両重量の傾斜成分 $W \cdot \sin \beta$ によって発生する初期スリップ量、 X は前輪最下点 B と履帯接地部の任意点との間の距離である。初期スリップ量 j_w は次式より求めることができる。

$$W \sin \beta = \pm 2B \int_0^D \tau(j_w) dX \quad (7)$$

従って、

$$j_w = \pm \frac{1}{b} \log \frac{a+1 - \sqrt{(a+1)^2 - 4a(1 \mp c)}}{2a} \quad (8)$$

$$a = \frac{\sqrt{1 - \frac{f_m}{f_s}}}{\sqrt{1 - \frac{f_m}{f_s} \left(1 - \frac{2f_s}{f_m} \right) + \frac{2f_s}{f_m} - 2}}$$

$$b = \frac{1}{f_m} \log \left\{ 1 + \frac{f_s}{f_m} \left(\sqrt{1 - \frac{f_m}{f_s}} - 1 \right) \right\}$$

$$c = \frac{W \sin \beta}{2B \int_0^D f_m p_i(X) dX}$$

で与えられる。なお、上式において、 j_w は $\beta > 0$ のとき正値を示し、 $\beta < 0$ のとき負値となる。

制動状態における抗力 T_3 は、同様にして、

$$T_3 = -2B \int_0^D \tau \left(j_w + \frac{i_b}{1+i_b} X \right) dX \dots\dots\dots (9)$$

より算定できる。

駆動状態における最適有効駆動力 T_{4opt} は、後述する有効駆動力エネルギー E_4 が一定の履帯周速度 V' に対して最大値となるとき駆動力 T_4 であると定義されている⁴⁾。また、車両の地表面方向の速度を V とすると、スリップ率 i_d は V' に対するスリップ速度 $V'-V$ の比として次式で与えられる。

$$i_d = 1 - \frac{V}{V'} \dots\dots\dots (10)$$

エネルギー平衡式として、有効入力エネルギー E_1 は、履帯接地部で発生するスリップエネルギー E_3 、有効駆動力エネルギー E_4 及び位置エネルギー E_5 の和として次式で与えられる。

$$E_1 = E_3 + E_4 + E_5 \dots\dots\dots (11)$$

ここに、

$$E_1 = T_1 V' \dots\dots\dots (12)$$

$$E_3 = T_3 i_d V' \dots\dots\dots (13)$$

$$E_4 = T_4 (1 - i_d) V' \dots\dots\dots (14)$$

$$E_5 = W (1 - i_d) V' \sin \beta \dots\dots\dots (15)$$

である。また、牽引効率 E_i は次式で与えられる。

$$E_i = (1 - i_d) \frac{T_4}{T_1} \dots\dots\dots (16)$$

次に、制動状態における最適有効制動力 T_{4opt} は、後述する有効入力エネルギー E_1 が一定の車両速度 V に対して最大値となるとき制動力 T_4 である。また、スリップ率 i_b は V に対するスリップ速度 $V'-V$ として次式で与えられる。

$$i_b = \frac{V'}{V} - 1 \dots\dots\dots (17)$$

エネルギー平衡式は前式 (11) と同様に与えられ、有効入力エネルギー E_1 、スリップエネルギー E_3 、有効制動力エネルギー E_4 及び位置エネルギー E_5 はそれぞれ次式で与えられる。

$$E_1 = T_1 V' \dots\dots\dots (18)$$

$$E_3 = T_3 \left(1 - \frac{1}{1+i_b} \right) V' \dots\dots\dots (19)$$

$$E_4 = T_4 \frac{1}{1+i_b} V' \dots\dots\dots (20)$$

$$E_5 = W \frac{1}{1+i_b} V' \sin \beta \dots\dots\dots (21)$$

また、制動効率 E_b は次式で算定される。

$$E_b = \frac{1}{1+i_b} \frac{T_4}{T_1} \dots\dots\dots (22)$$

Table 2 Vehicle dimensions of small tractor

Vehicle weight	W	40.0 kN
Width of track belt	B	50 cm
Contact length of track belt	D	170 cm
Mean contact pressure	p_m	23.0 kPa
Radius of front idler	R_f	25 cm
Radius of rear sprocket	R_r	25 cm
Radius of track roller	R_m	4 cm
Height of grouser	H	6.5 cm
Grouser pitch	G_p	14.6 cm
Eccentricity of gravity center of vehicle	e	0.00
Height of gravity center of vehicle	h_g	50 cm
Distance between central axis of vehicle and point acting effective driving (or braking) force	l_a	120 cm
Height of point acting effective driving (or braking) force	h_a	30 cm
Rotation speed of track belt at driving state	V'	100 cm/s
Vehicle speed at braking state	V	100 cm/s
Initial track belt tension	H_0	1000 kN

4. シミュレーション解析

Fig.4 は、制・駆動状態で傾斜した舗装路面上を下降または登坂走行するたわみ性履带式トラクターの走行解析を行うためのフローチャートである。Table 2 に、対象としたゴム製履带式小型トラクターの車両諸元を示す。まず最初に、これらの車両諸元 $W, B, D, R_f, R_r, R_m, H, e, h_g, l_a, h_a, H_0, \beta, V$ または V' が与えられ、路盤-履帯係数 $k_1, n_1, k_2, n_2, f_m, f_s, j_m$ 及び c_0, c_1, c_2 が入力定数として読み込まれる。車両静止時においては剛性履帯を仮定し、接地圧 $p(X)$ と沈下量 $s_0(X)$ の関係を定数 k_1, n_1 及び k_2, n_2 を用いて算定し e_0 を決定する。その後、所定のスリップ率 i_d または i_b を与え、 e_i を大きさによって $e_i < -1/6, -1/6 \leq e_i \leq 1/6$ 及び $e_i > 1/6$ の3通りの経路により、制・駆動状態における地盤反力 P 及びたわみ性履帯に作用する接地圧分布 $p_i(X)$ 及びその沈下量分布 $s_i(X)$ を算定し、 e_i が決定するまで繰り返し計算する。この場合、沈下量 $s_i(X)$ はきわめて小さく、滑り沈下量は無視することができる。履帯のたわみ変形量は初期履帯張力 H_0 及び地盤反力の大きさより算定され、また履帯張力分布 $T_0(X)$ は H_0 とせん断抵抗 $\tau_i(X)$ を0から X まで積分して得られる推進力または抗力成分 $H_m(X)$ の和として算定することができる⁵⁾。

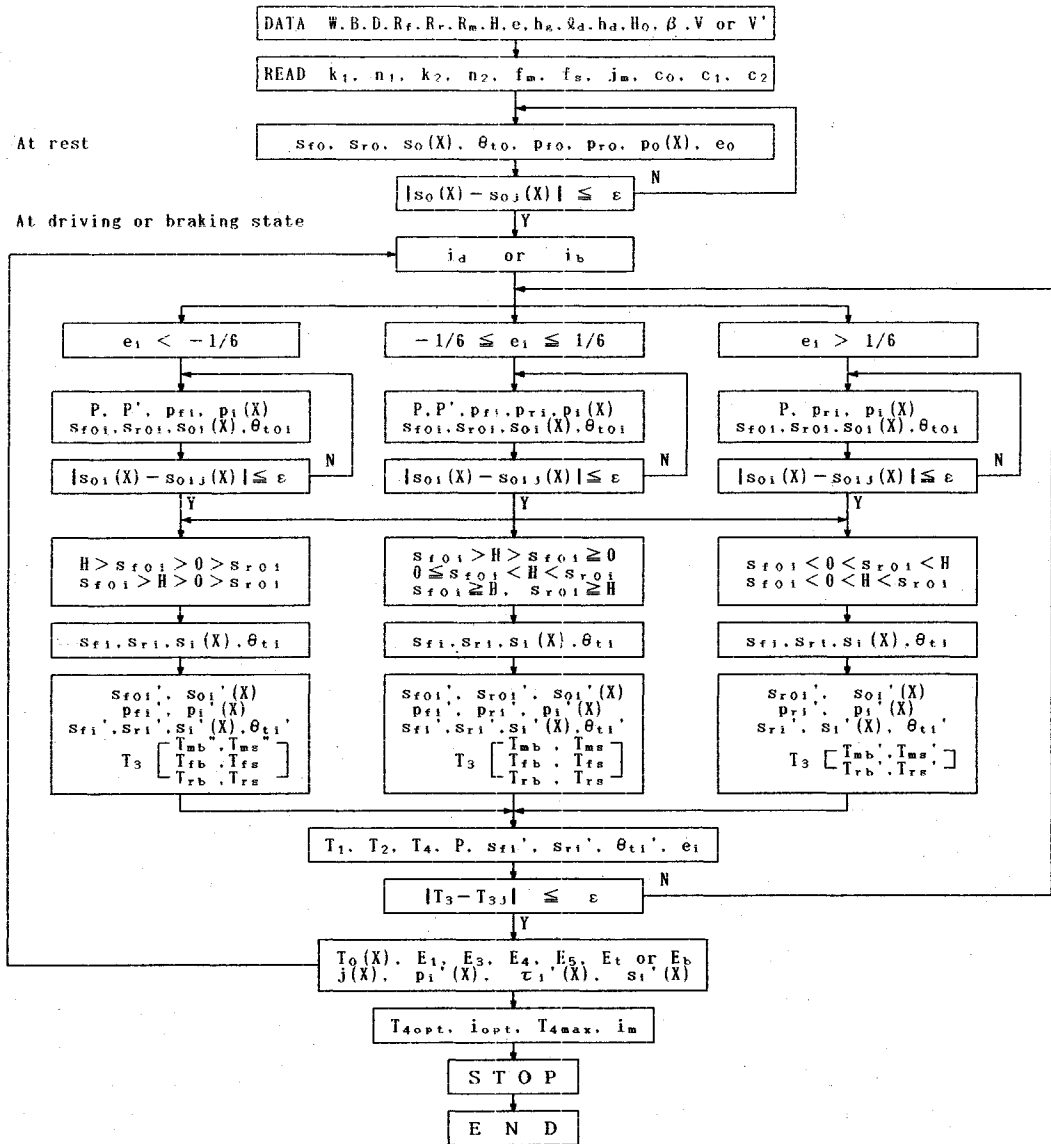


Fig.4 Flow chart to calculate the traffic performances of flexible tracked tractor running on sloped pavement road

最終的に、各スリップ率 i_d または i_b に対する $T_1 = T_3, T_4, e_t$ 、接地圧分布 $p_i(X)$ 、 $\tau_i(X)$ 、張力分布 $T_0(X)$ 、各種エネルギー E_1, E_3, E_4, E_5 及び牽引・制動効率 E_t, E_b を決定することができる。さらに、最適スリップ率 i_{opt} における最適有効制・駆動力 T_{4opt} を算定することができる。

5. 最適グラウサ形状

アスファルト舗装路面において最適有効制・駆動力 T_{4opt} を最大ならしめる最適なグラウサ形状を見出すために、6種類のグラウサ形状を有するゴム製履帯を装備した所定の小型トラクターの制・駆動時における走行

性能についてそれぞれの路盤・履帯係数を用いてシミュレーション解析を行った。その結果、平坦なアスファルト舗装路面における最適有効制・駆動力 T_{4opt} と矩形または等辺台形型グラウサの接地長 L との関係を図5に示す。この場合、最適スリップ率 i_{dopt}, i_{bopt} はいずれも $\pm 1 \sim 2\%$ である。図より明らかに、等辺台形型グラウサに対する $|T_{4opt}|$ は常に矩形型グラウサに対するものより大きくなること、及び最適グラウサ形状は、前述の実験範囲内では、等辺台形型 $L=5 \text{ cm}$ であることが判明した。

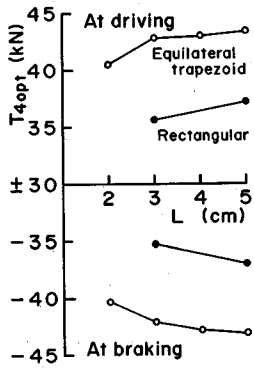


Fig. 5 Relations between optimum effective driving and braking force T_{4opt} and contact length of grouser L ($\beta = 0$ rad)

6. 制・駆動特性

平坦なアスファルト舗装路面を走行するトラクターの走行性能をより詳細に解析するために、最適履帯形状である等辺台形型 $L=5$ cm のゴム製グラウサ付履帯を装備した当該小型トラクターの制・駆動時走行についてシミュレーション解析を行った。

Fig. 6 は T_1 , T_4 と i_d , i_b の関係であり、この場合、式 (3), (5) において $\beta=0$ rad であるため $T_1=T_4$ となっている。駆動状態における T_1 , T_4 は $i_{dopt}=1\%$ において最大値 $T_{1opt}=T_{4opt}=43.3$ kN を示した後 i_d の増加とともにほぼ一定値で推移している。また、制動状態における T_1 , T_4 も $i_b=-1\%$ において最小値 $T_{1opt}=T_{4opt}=-43.2$ kN を示した後 i_b の減少とともにほぼ一定値を示している。Fig. 7 は e_i と i_d , i_b の関係を示したものであり、 e_i は、駆動時 $i_{dopt}=1\%$ で最大値 0.03182 、制動時 $i_{bopt}=-1\%$ で最小値 -0.03175 を示した後ほぼ一定値で推移している。Fig. 8 は各種エネルギー E_1 , E_3 , E_4 , E_5 と i_d , i_b の関係を示したものである。駆動状態において、 E_4 は $i_{dopt}=1\%$ において最大値 4287 kNcm/s を示した後ほぼ直線的に減少し、 $i_d=100\%$ において 0 に達しているのに対し、 E_1 は一定値で推移している。 E_3 は i_d の増加とともにほぼ直線的に増加している。制動状態において、 $|E_1|$ は $i_{bopt}=-1\%$ において最大値 4270 kNcm/s を呈した後ほぼ直線的に減少し、 $i_b=-100\%$ において 0 に達している。 E_3 は $|i_b|$ の増加とともにほぼ直線的に増加しているのに対し、 E_4 は式 (17), (20) において一定の車両速度 V であるためにほぼ一定値で推移している。なお、制・駆動時とも E_5 は $\beta=0$ rad であるために 0 となっている。牽引効率 E_t は、Fig. 9 に示すように $i_{dopt}=1\%$ において最大値 98.9% を呈した後直線的に減少し、その後 $i_d=100\%$ において 0 に達している。また、制動効率 E_b は式 (22) で示すように $|i_b|$ の増加とともに双曲線的に増加している。

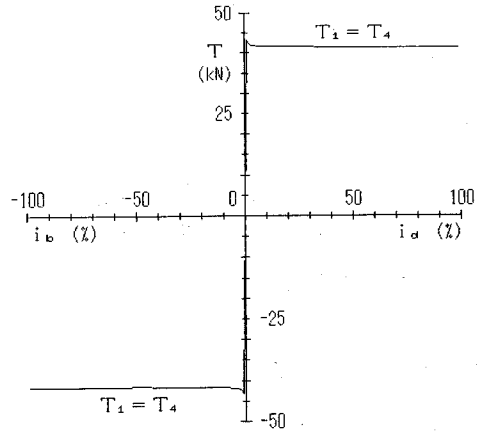


Fig. 6 Relations between driving (or braking) force T_1 , effective driving (or braking) force T_4 and slip ratio i_d (or i_b) ($\beta=0$ rad, $L=5$ cm)

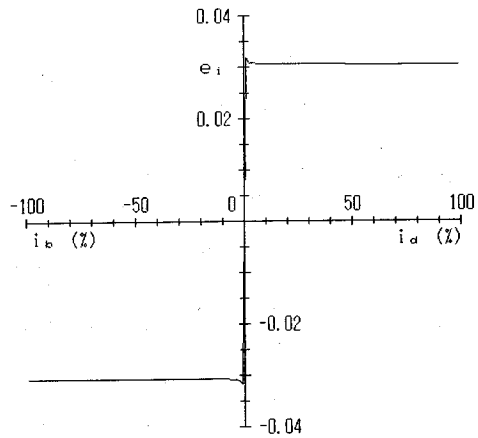


Fig. 7 Relation between eccentricity e_i and slip ratio i_d (or i_b) ($\beta=0$ rad, $L=5$ cm)

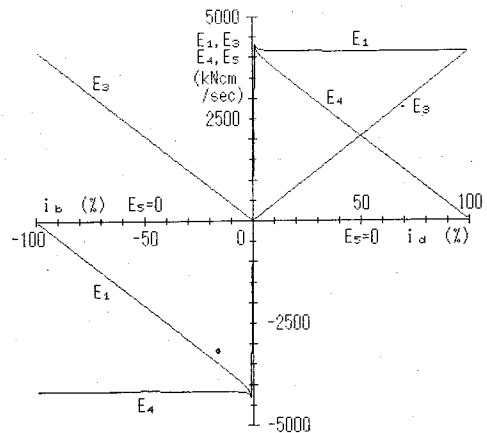


Fig. 8 Relations between energies E_1 , E_3 , E_4 , E_5 and slip ratio i_d (or i_b) ($\beta=0$ rad, $L=5$ cm)

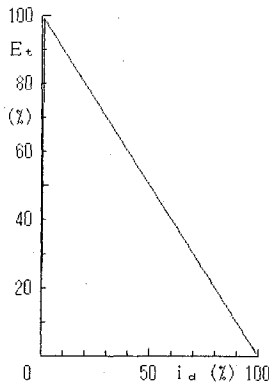


Fig.9 Relation between tractive efficiency of power E_t and slip ratio i_d ($\beta=0$ rad, $L=5$ cm)

Fig.10は駆動状態において履帯接地部に作用する接地圧分布であり、 $i_d=10, 20$ 及び 30% における垂直応力 $p_i(X)$ と $i_d=1, 5, 10, 20$ および 30% におけるせん断抵抗 $\tau_i(X)$ の分布を示したものである。 $p_i(X)$ は i_d の大きさに関係なく一定の分布型を示し、履帯後方に向かって単調に増加している。一方、 $\tau_i(X)$ は X とともに $p_i(X)$ の増加を伴って増大しており、また、スリップ率 i_d の増加とともにあるHump型曲線に漸近していくことが明らかである。

Fig.11は制動状態における接地圧分布であり、 $i_b=-10, -20\%$ における垂直応力 $p_i(X)$ と $i_b=-1, -5, -10$ 及び -20% におけるせん断抵抗 $\tau_i(X)$ の分布を示したものである。 $p_i(X)$ はスリップ率に関係なく履帯後方に向かって単調に減少している。一方、 $\tau_i(X)$ は負値を示し、スリップ率 $|i_b|$ の増加とともにあるHump型曲線を呈していく傾向にある。

7. 登坂下降時走行特性

最適履帯形状である等辺台形型 $L=5$ cmのゴム製グラウサ付履帯を装備した当該小型トラクターが傾斜角 $\beta=0.349$ radのアスファルト舗装路面を登坂駆動するとき、及び $\beta=-0.349$ radの傾斜路面を下降制動するときの走行特性についてシミュレーション解析を行った。

Fig.12は、 T_1, T_4 と i_d, i_b の関係であり、この場合、制・駆動力 $|T_1|$ は有効制・駆動力 $|T_4|$ より常に大きく、その差異は式(3)、(5)に示すように $W \cdot \sin |\beta|$ で与えられる。駆動状態における T_1, T_4 は、 $i_{dopt}=1\%$ においてそれぞれ最大値 $T_{1opt}=41.1$ kN、 $T_{4opt}=27.4$ kNに達した後、 i_d の増加とともにほぼ一定値で推移している。また、制動状態における T_1, T_4 は $i_{bopt}=-1\%$ においてそれぞれ最小値 $T_{1opt}=-41.0$ kN、 $T_{4opt}=-27.3$ kNを呈した後ほぼ一定値を示している。Fig.13は制・駆動時における各種エネルギー E_1, E_3, E_4, E_5 と i_d, i_b の関係を示したものである。駆動状態において、 E_4 と E_5 は

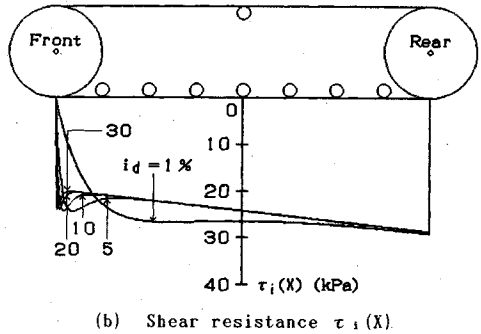
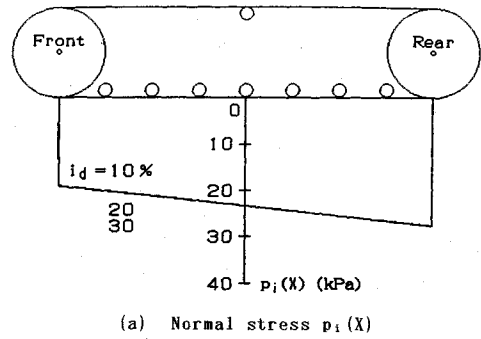


Fig.10 Distributions of contact pressure at driving state ($\beta=0$ rad, $L=5$ cm)

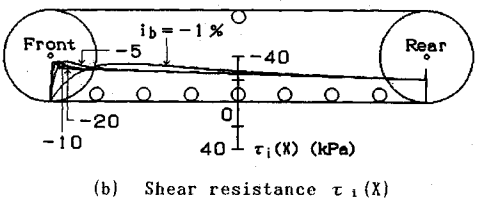
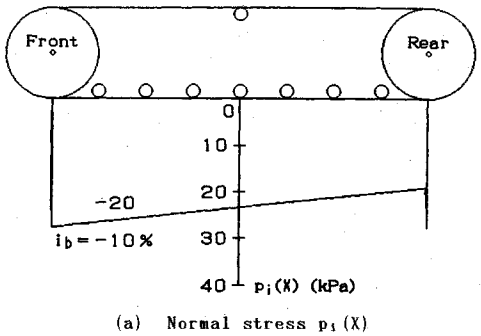


Fig.11 Distributions of contact pressure at braking state ($\beta=0$ rad, $L=5$ cm)

$i_{dopt}=1\%$ においてそれぞれ最大値 $E_{4max}=2713$ kN cm/s、 $E_{5max}=1355$ kNcm/sを呈した後 i_d の増加とともに減少し、 $i_d=100\%$ において0に達している。また、 E_3 は i_d とともにほぼ直線的に増加するのに対し、 E_1 はほぼ一定の値を示している。制動状態において、 $|E_1|$ は $i_{bopt}=-1\%$ において最大値 4055 kNcm/sを呈した後 i_b とともにほぼ直線的に減少し、 $i_b=-100\%$ において0

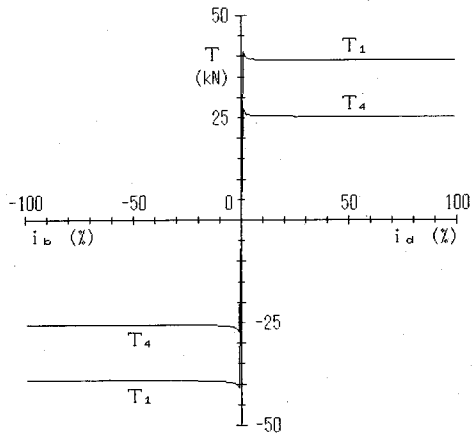


Fig.12 Relations between driving (or braking) force T_1 , effective driving (or braking) force T_4 and slip ratio i_d (or i_b) ($\beta = \pm 0.349$ rad, $L = 5$ cm)

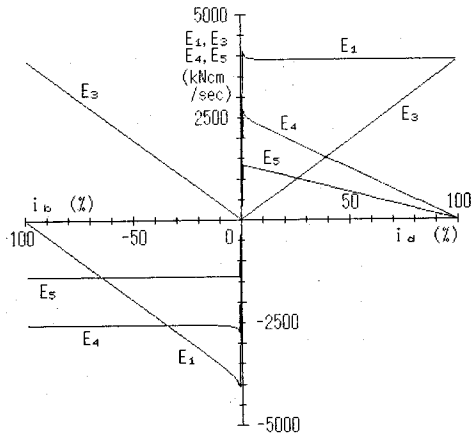


Fig.13 Relations between energies E_1 , E_3 , E_4 , E_5 and slip ratio i_d (or i_b) ($\beta = \pm 0.349$ rad, $L = 5$ cm)

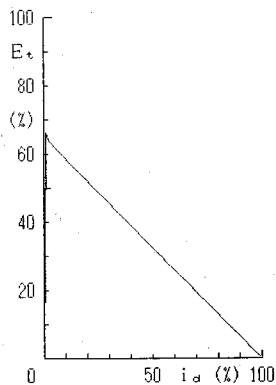


Fig.14 Relation between tractive efficiency of power E_t and slip ratio i_d ($\beta = 0.349$ rad, $L = 5$ cm)

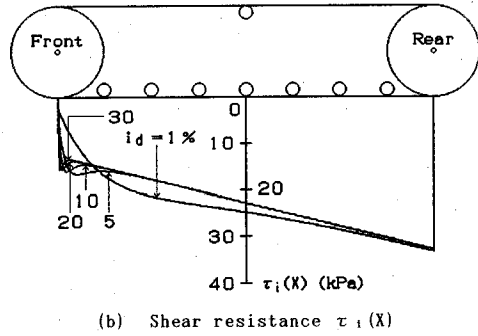
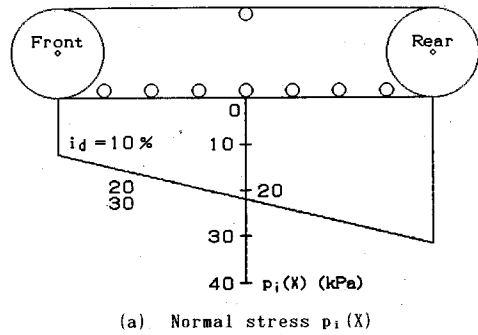


Fig.15 Distributions of contact pressure at driving state ($\beta = 0.349$ rad, $L = 5$ cm)

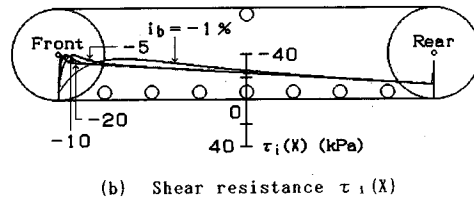
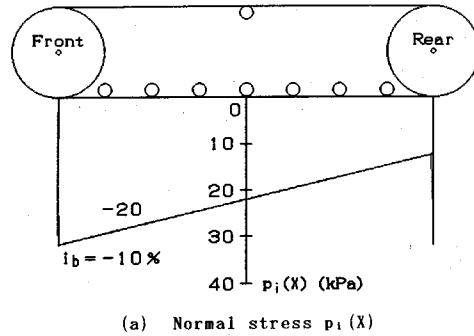


Fig.16 Distributions of contact pressure at braking state ($\beta = -0.349$ rad, $L = 5$ cm)

に達している。 E_3 は $|i_b|$ とともにほぼ直線的に増加するのに対し、 E_4 と E_5 は式 (17), (20), (21) において一定の車両速度 V であるためにほぼ一定値となっている。 Fig.14 は、 駆動状態における駆動効率 E_t と i_d の関係を示したものである。 E_t は $i_{dopt} = 1\%$ においてピーク値 66.1% を呈した後漸減し、 $i_d = 100\%$ において 0 に達している。 一方、 制動効率 E_b は $|i_b|$ の増加とともに双曲

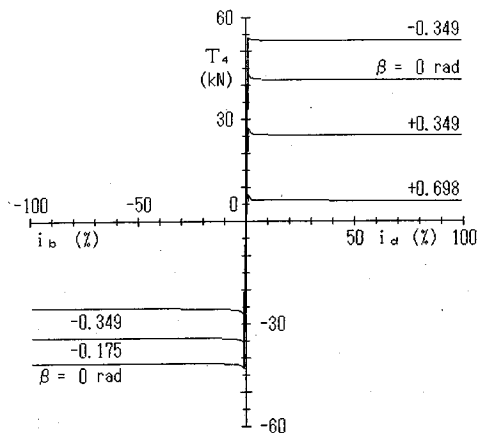


Fig.17 Relations between effective driving (or braking) force T_4 and slip ratio i_d (or i_b) for various slope angle β ($L=5$ cm)

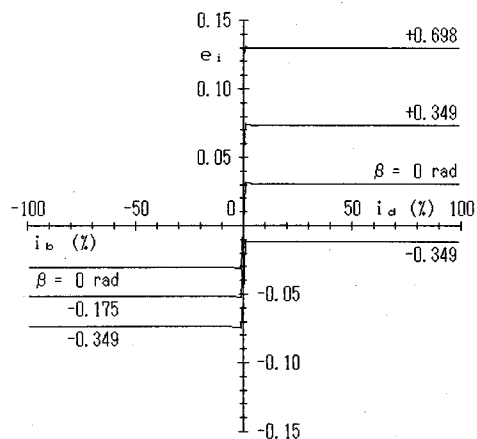


Fig.18 Relations between eccentricity of resultant normal force e_i and slip ratio i_d (or i_b) for various slope angle β ($L=5$ cm)

線的に増加している。Fig.15は、駆動時接地圧分布として $i_d=10, 20$ 及び 30% における $p_i(X)$ と $i_d=1, 5, 10, 20$ 及び 30% における $\tau_i(X)$ を示したものである。 $p_i(X)$ は X の増加とともにほぼ直線的に増加しており、また、地盤反力偏心率が i_d に対してほぼ一定値であるために全てのスリップ率 i_d に対して $p_i(X)$ の分布はほぼ等しくなっている。一方、 $\tau_i(X)$ は X とともに $p_i(X)$ の増加を伴って増大しており、また i_d の増加とともにある Hump 型曲線を呈している。Fig.16は制動状態における接地圧分布であり、 $i_b=-10, -20\%$ における垂直応力 $p_i(X)$ と $i_b=-1, -5, -10$ 及び -20% におけるせん断抵抗 $\tau_i(X)$ 分布である。 $p_i(X)$ は i_b に関係なく履帯後方に向かって単調に減少している。一方、 $\tau_i(X)$ は負値を示し、スリップ率 $|i_b|$ の増加とともにある Hump 型曲線を呈する傾向にある。

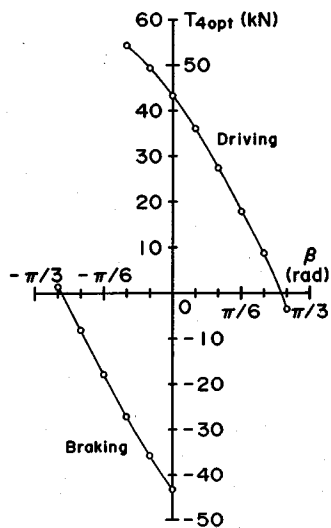


Fig.19 Relations between optimum effective driving (or braking) force T_{4opt} and slope angle β ($L=5$ cm)

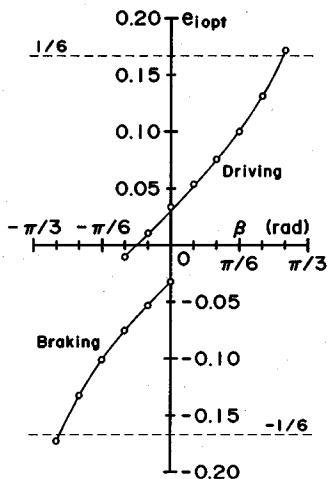


Fig.20 Relations between eccentricity of resultant normal force e_{iopt} at optimum slip ratio and slope angle β ($L=5$ cm)

8. 傾斜角度の影響

アスファルト舗装路面の傾斜角が当該ゴム製履帯式トラクターの制・駆動時走行特性に与える影響についてシミュレーション解析を行った。Fig.17は、最適グラウサ形状である $L=5$ cm の等辺台形型グラウサ付履帯を装着した当該車両の制・駆動時における T_4 と i_d, i_b の関係を示したものである。なお、駆動状態においては $\beta = -0.349, 0, +0.349$ 及び $+0.698$ rad について、制動状態においては $\beta = -0.349, -0.175$ 及び 0 rad について算定している。駆動時 T_4 は β の増加とともに減少しており、また制動時においても $|T_4|$ は $|\beta|$ の増加とともに減少する傾向にある。すなわち、傾斜角度が増加する

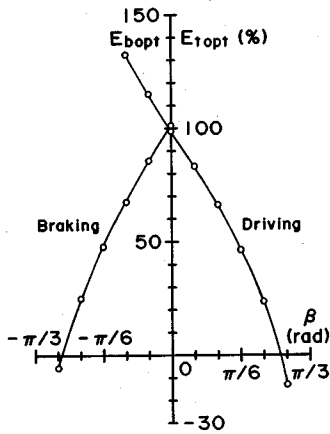


Fig.21 Relations between driving (or braking) efficiency of power $E_{i,opt}$ (or $E_{b,opt}$) at optimum slip ratio and slope angle β ($L=5$ cm)

ほど、登坂駆動能力及び下降制動能力は減少することが明らかである。Fig.18は、この場合における地盤反力偏心率 e_i と i_d, i_b の関係である。駆動時 e_i は β の増加とともに大きくなり履帯下の垂直応力分布 $p_i(X)$ は急傾斜地において履帯後方へ傾斜していく。一方、制動時における e_i は $|\beta|$ の増加とともに小さくなり、 $p_i(X)$ は急傾斜地においては履帯前方へ傾斜することが明らかとなった。

次に、当該トラクターが登坂または下降する場合の限界傾斜角 β_c を求めるために、種々の傾斜角に対するトラクターの制・駆動状態についてシミュレーション解析を行った。Fig.19は、アスファルト舗装路面における最適有効牽引力 $T_{4,opt}$ と傾斜角 β の関係である。一般に、 $|T_{4,opt}|$ は、制・駆動時共 $|\beta|$ の増加とともに単調に減少している。 β_c は、駆動時 $2\pi/9 < \beta_c < 5\pi/18$ 、制動時 $-5\pi/18 < \beta_c < -2\pi/9$ に位置している。この場合の最適スリップ率における地盤反力偏心率 $e_{i,opt}$ と傾斜角 β の関係を Fig.20 に示す。一般に、 $|e_{i,opt}|$ は制・駆動時共 $|\beta|$ の増加とともに放物線的に増加している。限界傾斜角 β_c においては $e_{i,opt}$ は制・駆動時共 $|e_{i,opt}| > 1/6$ の位置にあり、middle-thirdの外にあり不安定領域に突入していることがわかる。Fig.21は最適スリップ率における牽引効率 $E_{i,opt}$ 及び制動効率 $E_{b,opt}$ と傾斜角 β との関係である。 $E_{i,opt}, E_{b,opt}$ は共に $|\beta|$ の増加に伴って単調に減少していく傾向にある。また、限界傾斜角 β_c において、 $E_{i,opt}, E_{b,opt}$ はそれぞれ0に達している。

9. 結 論

最適有効制・駆動力を最大ならしめる最適なグラウサ形状を求めるために、アスファルト舗装路面上を登坂下降する自重40 kNのゴム製履带式車両の制・駆動時走行性能についてシミュレーション解析を行った。まず、

種々の形状を有するゴム製グラウサとアスファルト舗装路面との間に作用するせん断変形特性について実験的考察を行い、傾斜地における車両に作用する制・駆動力、有効牽引力と有効制動力、地盤反力偏心率、各種エネルギー、牽引効率と制動効率とスリップ率との関係及び履帯下の接地圧分布をシミュレーション解析によって明らかにした。その結果、得られた新しい知見を以下に列記する。

- (1) ゴム製グラウサとアスファルト舗装路面との間のせん断変形特性は式(1)に示す Hump 型を形成する。
 - (2) アスファルト舗装路面に対する最適なグラウサ形状は、本実験の範囲内においては、接地長5 cm、傾斜角 $\pi/6$ rad、ピッチ14.6 cm、高さ6.5 cmの等辺台形型である。
 - (3) 登坂駆動能力及び下降制動能力は傾斜角の増加と共に減少する。
 - (4) 傾斜角の増加とともに、地盤反力偏心率は登坂時増加し下降時減少する。すなわち、接地圧分布は登坂駆動状態で履帯後方へ下降制動状態で履帯前方へ傾斜して分布する。
 - (5) 駆動時、有効入力エネルギーはスリップ率によって殆ど変化しないがスリップエネルギーは直線的に増加する。また、有効牽引力エネルギーと位置エネルギーは最大値を呈した後漸減する。制動時、有効入力エネルギーは最小値を呈した後漸増する。また、スリップエネルギーはスリップ率とともに増加するのに対し、有効制動力エネルギーと位置エネルギーはほぼ一定値で推移している。
 - (6) 履帯下の垂直応力分布はほぼ直線的に分布するのに対し、せん断抵抗分布は、制・駆動時ともスリップ率の増加とともに Hump 型を呈する。
 - (7) 当該小型トラクターのアスファルト舗装路面に対する最大登坂駆動勾配は $2\pi/9 \sim 5\pi/18$ であり、最大下降制動勾配は $-5\pi/18 \sim -2\pi/9$ である。
 - (8) 牽引効率及び制動効率は共に傾斜角度の増加とともに単調に減少する。
- 最後に、本論文を作成するに当たり実験の実施とデータ整理については本学技官河野幸一氏、元学生藤本和穂氏(現在東亜建設工業(株))並びに山下孝氏(現在(株)奥村組)によるところが多く、ここに謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 吉田和宏・堀一俊：小型ブル用ゴム履帯の開発，平成2年度建設機械と施工法シンポジウム論文集，pp.110~113, 1990.
- 2) 室達朗・河原莊一郎・藤本和穂：コンクリート舗装路上のトラクタの走行性能，平成3年度建設機械と施工法シンポジウム論文集，pp.222~225, 1991年11月.
- 3) 笈田昭：土のせん断応力-変位曲線表示式に関する一考

-
- 察, 農業機械学会誌, 第 37 卷, 第 1 号, pp. 20~25, 1975.
- 4) Muro, T. : Tractive Performance of a Bulldozer Running on Weak Ground, J. of Terramechanics, Vol.26, No.3/4. pp.249~273, 1989.
- 5) Muro, T. : Tractive and Braking Performances of a Flexible Tracked Tractor Moving up and down Weak Sloped, Terrain, J. of Terramechanics (in press). (1992.5.25 受付)
-

TRAFFIC PERFORMANCES OF A TRACTOR CARRYING UP AND DOWN ASPHALT PAVEMENT ROAD

Tatsuro MURO, Ryoichi FUKAGAWA and Soichiro KAWAHARA

To investigate a most suitable grouser shape to obtain a maximum optimum effective driving and braking force, the tractive and braking performances of a 40 kN rubber tracked tractor carrying up and down the asphalt pavement road of various slope angles have been analysed. As a result, it is clarified that the most suitable shape of rubber grouser is equilateral trapezoid type of contact length 5 cm and the effective tractive effort and the effective braking force decrease with the increment of slope angle, and the normal contact pressure tends to increase toward the rear part of track belt for larger slope angle at driving state and vice versa at braking state.
