

傾斜地走行時におけるブルドーザの最適着点高さ制御

室 達朗*

軟弱な傾斜地盤上を制・駆動状態でスクレーパ等を牽引するブルドーザが有効制・駆動力を最大限に発揮するために、その着点高さを最適な位置に自動制御するシステムを開発することは、建設ロボットの開発における基礎的な緊急課題である。ここでは、最適着点高さは車両重心偏心率と斜面の斜角によって変化することを示し、さらに傾斜角センサーの導入により着点高さの自動制御の可能性を示唆している。

Key Words: bulldozer, slope, optimum application height, control

1. まえがき

今日、労働力不足、時短、高齢化とともに建設作業のイメージ向上、生活水準の高度化が進展してきており、労働生産性と品質の向上、及び危険な労働環境の改善を目的とした建設ロボットの開発が緊急の課題である。本研究の目的は、軟弱な傾斜地盤上を制・駆動状態でスクレーパ等を牽引して登坂下降走行するブルドーザが有効制・駆動力を最大限に発揮するために、その着点高さを最適な位置に自動制御するシステムを開発することである¹⁾。ここでは、等辺台形型ゴム製グラウサで構成されるたわみ性履帯を装着した小型ブルドーザが、ゆるく堆積したまき土の傾斜地盤上を駆動状態で登坂走行する場合、及び制動状態で下降走行する場合について、それぞれの走行特性を明らかにする。つぎに、種々の車両重心偏心率に対して、傾斜角 $\pi/9$ rad の傾斜地を登坂下降する時の着点高さとお有効制・駆動力、沈下量、地盤反力偏心率、車両トリム角、及び制・駆動効率との関係を求め、最適着点高さを決定する。さらに、この最適着点高さが、登坂下降時の車両重心偏心率や地盤の傾斜角によって変化することを明らかにし、傾斜角センサーによる最適着点高さの自動制御方法について検討する。

2. 地盤—履帯系決定数と車両諸元

ゴム製グラウサの履帯形状の違いによって、とくにグラウサ高さ、グラウサピッチ、及び等辺台形型グラウサの底長、傾斜角による沈下量やせん断抵抗の変化はかなり大きい、ここでは最も大きな有効駆動力を発揮することのできる履帯形状²⁾を対象としている。

Fig.1 は、履帯長 $D_m=73$ cm、履帯幅 $B_m=25$ cm の

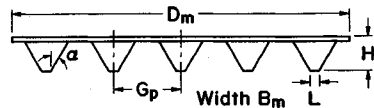


Fig.1 Track model plate and shape of rubber grouser

たわみ性履帯モデルであり、グラウサ高さ $H=6.5$ cm、グラウサピッチ $G_p=14.6$ cm、底長 $L=2$ cm の等辺台形型ゴム製グラウサ (傾斜角 $\alpha=\pi/6$ rad) を 5 個装着したものである。供試地盤は、平均粒径 0.78 mm、均等係数 12.0 のまき土を気乾燥状態で大型土槽 (540 cm×150 cm×60 cm) にゆるく堆積させて作成した。平均含水比は 2.38%、単位体積重量は 1.44 kN/m³、相対密度は 44.0% であり、平均コーン指数は 95.1 kPa であり、地盤強度の深さ方向の変化はないことが確認されている。この履帯モデルを当該供試地盤上に設置し、載荷・除荷試験、せん断変形試験、及びスリップ沈下量試験を実施した。その結果、載荷・除荷試験においては、接地圧 p (kPa) と静的沈下量 $S_0 (<H$ cm) の間には、一般に次式が成立した。

$$p = k_1 s_0^{n_1} \dots \dots \dots (1)$$

$$p = k_1 s_p^{n_1} - k_2 (s_p - s_0)^{n_2} \dots \dots \dots (2)$$

ここに、 s_p は除荷時の任意の沈下量である。また、せん断変形試験においては、せん断抵抗 τ (kPa) は接地圧 p (kPa) と履帯のスリップ量 j (cm) の関数として、一般に次式が成立した。

$$\tau = (m_c + m_f p) \{1 - \exp(-aj)\} \dots \dots \dots (3)$$

ここに、定数 m_c は粘着力項、 m_f は内部摩擦係数項、定数 a は変形係数項である。さらに、スリップ沈下量試験においては、スリップ沈下量 s_s (cm) は接地圧 p (kPa) とまき土のスリップ量 j_s (cm) の関数として、一般に次式が成立した。

* 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)

Table 1 Terrain-track system constants

Static pressure sinkage test
$k_1 = 8.526 \quad k_2 = 32.63$
$n_1 = 0.866 \quad n_2 = 0.632$
Shear deformation test
$m_c = 0 \text{ kPa} \quad m_f = 0.769$
$a = 0.244 \text{ 1/cm}$
Slip sinkage test
$c_0 = 1.588 \quad c_1 = 0.075$
$c_2 = 0.240$

Table 2 Vehicle dimensions

Vehicle weight	W	50 kN
Width of track belt	B	25 cm
Contact length of track belt	D	320 cm
Mean contact pressure	p_m	31.25 kPa
Radius of front idler	R_f	50 cm
Radius of rear sprocket	R_r	50 cm
Radius of track roller	R_m	8 cm
Height of grouser	H	6.5 cm
Grouser pitch	G_p	14.6 cm
Interval of track roller	R_p	40 cm
Eccentricity of gravity center of vehicle	e	-0.02
Height of gravity center of vehicle	h_g	100 cm
Distance between central axis of vehicle and point acting effective driving (or braking) force	l_d	300 cm
Height of point acting effective driving (or braking) force	h_d	60 cm
Initial track tension	H_0	19.6 kN
Rotation speed of track belt in driving state	V'	100 cm/s
Vehicle speed in braking state	V	100 cm/s

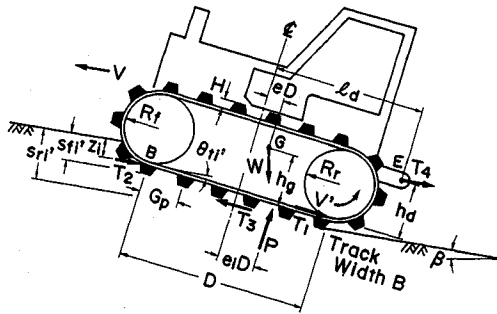


Fig.2 Several forces acting on the two track belts on weak sloped terrain in driving state

$$s_s = c_0 p^{c_1} j_s^{c_2} \dots \dots \dots (4)$$

これらの地盤-履帯系定数 $k_1, n_1, k_2, n_2, m_c, m_f$, a 及び c_0, c_1, c_2 は, Table 1 にまとめて示した.

Fig. 2 は, 当該履帯モデルと同一のたわみ性履帯を装着した自重 50 kN の小型ブルドーザが傾斜角 β のゆるく堆積したまき土傾斜地盤上を駆動状態で登坂走行する場合の作用力である車両重量 W , 駆動力 T_1 , 締固め抵抗 T_2 の作用位置 z_i , 推進力 T_3 , 有効駆動力 T_4 及び前・後輪沈下量 s'_{fi}, s'_{ri} , 車両トリム角 θ'_{fi} , 地盤反力 P の偏心率 e_i を示したものである. なお, 車両速度 V と有効駆動力 T_4 の作用方向は, いずれも地表面に平行である. 車両諸元及び作用力の着点の位置は Table 2 にまとめて示した通りであり, 傾斜地での安定走行域を拡大させるため接地長を増大させるなど, 新しく考案した小型ブルドーザである.

3. 登坂下降時走行特性

当該車両諸元を有する小型ブルドーザが, 傾斜角 $\beta = \pi/9 \text{ rad}$ のゆるく堆積したまき土地盤上を登坂下降するときの走行特性について, シミュレーション解析^{1),2)}を行うこととする. この解析手法の妥当性については, すでに実験結果と比較して実証されている³⁾. まず, Table 1, 2 で与えられると地盤-履帯系定数と車両諸元を入力し, 種々のスリップ率の下に制・駆動力 T_1 , 締固め抵抗 T_2 , 推進力または抗力 T_3 , 有効制・駆動力

T_4 , 前・後輪沈下量 s'_{fi}, s'_{ri} , 車両トリム角 θ'_{fi} , 地盤反力偏心率 e_i , 各種エネルギー E_1, E_2, E_3, E_4, E_5 及び牽引効率 E_t , 制動効率 E_b を算定し, 接地圧分布として垂直応力 p とせん断抵抗 τ の分布を出力する.

駆動時:

$$\text{スリップ率 } i_a = 1 - \frac{V}{V'} \dots \dots \dots (5)$$

$$\text{有効入力エネルギー } E_1 = T_3 V' \dots \dots \dots (6)$$

$$\text{締固めエネルギー } E_2 = T_2 V \dots \dots \dots (7)$$

$$\begin{aligned} \text{スリップエネルギー } E_3 = & T_3 \left(1 - \frac{1-i_a}{\cos \theta'_{fi}} \right) V' \\ & + W V \tan \theta'_{fi} \cos \beta \dots \dots (8) \end{aligned}$$

$$\text{有効駆動力エネルギー } E_4 = T_4 V \dots \dots \dots (9)$$

$$\text{位置エネルギー } E_5 = W V \sin \beta \dots \dots \dots (10)$$

$$\text{牽引効率 } E_t = (1 - i_a) \frac{T_4}{T_1} \dots \dots \dots (11)$$

制動時:

$$\text{スリップ率 } i_b = \frac{V'}{V} - 1 \dots \dots \dots (12)$$

$$\text{有効入力エネルギー } E_1 = T_3 V' \dots \dots \dots (13)$$

$$\text{締固めエネルギー } E_2 = T_2 V \dots \dots \dots (14)$$

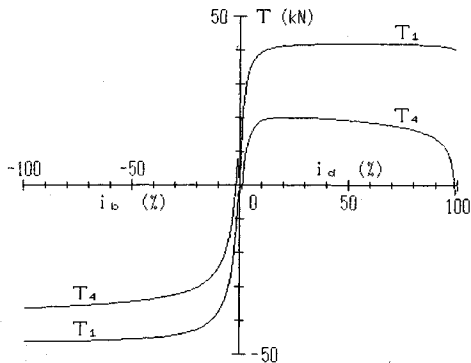


Fig. 3 Relations between driving (or braking) force T_1 , effective driving (or braking) force T_4 and slip ratio i_a (or i_b), $\beta = \pm \pi/9$ rad

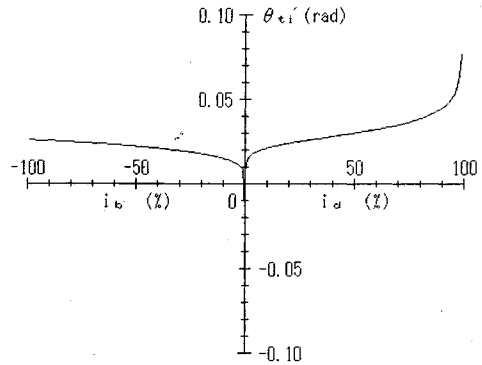


Fig. 5 Relation between trim angle of vehicle θ_{ri} and slip ratio i_a (or i_b) in driving (or braking) state, $\beta = \pm \pi/9$ rad

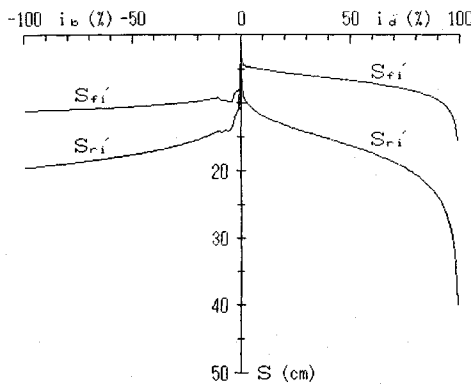


Fig. 4 Relation between amount of sinkage s'_{fi} at front idler, s'_{ri} at rear sprocket and slip ratio i_a (or i_b) in driving (or braking) state, $\beta = \pm \pi/9$ rad

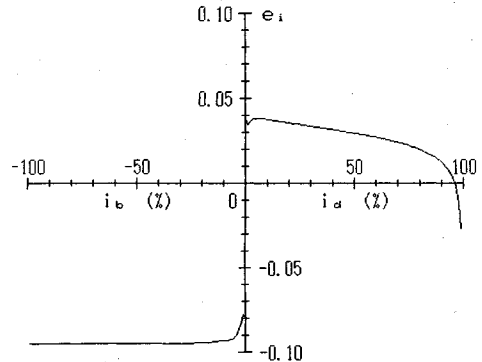


Fig. 6 Relation between eccentricity of resultant normal force e_i and slip ratio i_a (or i_b) in driving (or braking) state, $\beta = \pm \pi/9$ rad

$$\begin{aligned} \text{スリップエネルギー } E_3 &= T_3 \left\{ (1+i_b) - \frac{1}{\cos \theta'_{ri}} \right\} \\ &\quad + WV \tan \theta'_{ri} \cos \beta \cdots (15) \\ \text{有効駆動力エネルギー } E_4 &= T_4 V \cdots (16) \\ \text{位置エネルギー } E_5 &= WV \sin \beta \cdots (17) \\ \text{制動効率 } E_b &= \frac{1}{1+i_b} \cdot \frac{T_4}{T_1} \cdots (18) \end{aligned}$$

$\beta = \pi/9$ rad の傾斜地を駆動状態で登坂走行する場合は、後輪スプロケット上の履帯周速度 $V = 100$ cm/s と一定とした。一方、 $\beta = -\pi/9$ rad の傾斜地を制動状態で下降走行する場合は、地表面方向の車両速度 $V = 100$ cm/s と一定として算定した。Fig. 3 は、駆動力 T_1 、有効駆動力 T_4 とスリップ率 i_a の関係、及び制動力 T_1 、有効制動力 T_4 とスリップ率 i_b の関係である。駆動状態において、 T_1 は低スリップ率 i_a で急上昇した後一定値に漸近しており、 T_4 は $i_{dm} = 23\%$ において最大値 $T_{4max} = 20.1$ kN を呈した後締固め抵抗の増加とともに漸減し、 $i_a = 90\%$ より急減している。最適スリップ率 $i_{dopt} = 11\%$ において、最適有効牽引力 $T_{4opt} = 19.2$ kN を示している。一方、制動状態において、 $|T_1|$ 、 $|T_4|$ 共低スリップ率

$|i_b|$ で急上昇している。最適スリップ率 $i_{dopt} = -14\%$ において、最適有効制動力 $T_{4opt} = -27.7$ kN を示している。Fig. 4 は、制・駆動状態における前・後輪沈下量 s'_{fi} 、 s'_{ri} とスリップ率 i_a 、 i_b の関係を示したものである。 i_a 、 $|i_b|$ の増加とともに、後輪でのスリップ量 j_s 及び車体トリム角 θ'_{ri} の増加による後輪での接地圧 p の増加によってスリップ沈下量 s_s が増大するために、 s'_{ri} は常に s'_{fi} より大きくなっている。また、駆動状態での後輪沈下量が制動状態と比較して大きくなっている箇所は、 $i_a \geq 70\%$ であり、その一因は、車両通過によるまき土地盤のスリップ量 j_s が、制動時 $-i_b D$ であるのに対し駆動時 $i_a D / (1 - i_a)$ と増大するためにスリップ沈下量が増大するためである。Fig. 5 は、制・駆動状態における車両トリム角 θ'_{ri} とスリップ率 i_a 、 i_b との関係である。制動時 θ'_{ri} は一定値に漸増するのに対し、駆動時では $i_a = 90\%$ 以上の高スリップ率において s'_{ri} の急増にともない急激に上昇している。Fig. 6 は、制・駆動状態における地盤反力偏心率 e_i とスリップ率 i_a 、 i_b との関係である。制動時 e_i においては一定値 -0.0949 に漸減するのに対し、駆動時では $i_a = 6\%$ において最大値 0.0384 を呈した後 i_a の増加とともに漸減し、 $i_a = 90\%$ 以上では急減している。

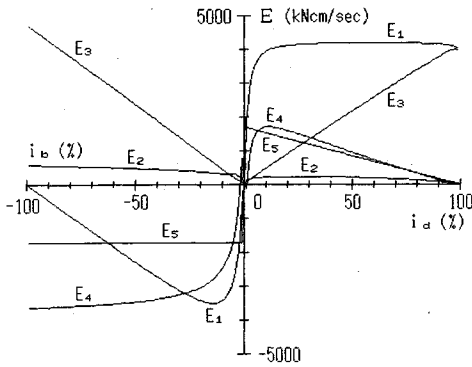


Fig. 7 Relations between energy E_1, E_2, E_3, E_4, E_5 and slip ratio i_d (or i_b) in driving (or braking) state, $\beta = \pm \pi/9$ rad

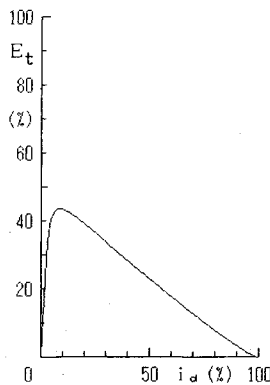


Fig. 8 Relation between tractive efficiency of power E_t and slip ratio i_d in driving state, $\beta = \pi/9$ rad

Fig. 7 は、制・駆動状態における各種エネルギー E とスリップ率 i_d, i_b との関係である。駆動時においては、有効入力エネルギー E_1 は低スリップ率において急増しその後一定値に漸近しており、締固めエネルギー E_2 、有効駆動力エネルギー E_4 はあるスリップ率で最大値を呈した後漸減し、 $i_d = 100\%$ において 0 に達している。また、スリップエネルギー E_3 は i_d の増加とともにほぼ直線的に増大し、位置エネルギー E_5 は i_d の増加とともに直線的に減少し $i_d = 100\%$ において 0 に達している。なお、 $i_{dopt} = 11\%$ において E_4 は最大値 1711 kJNm/s を示している。一方、制動時においては、有効入力エネルギー $|E_1|$ は $i_{bopt} = -14\%$ において最大値 3491 kJNm/s を呈した後漸減し $i_b = -100\%$ において 0 に達している。締固めエネルギー E_2 及びスリップエネルギー E_3 はスリップ率 $|i_b|$ の増加とともに増大している。また、有効制動力エネルギー $|E_4|$ は低スリップ率 $|i_b|$ で急増しその後一定値にまで漸増している。Fig. 8 は、駆動状態における牽引効率 E_t とスリップ率 i_d との関係を示したものである。 E_t は $i_d = 9\%$ において最大値 43.5% を示した後漸減している。一方、制動効率 E_b は前式 (18) で示した通り、 $|i_b|$ の増加とともに双曲線的に増加している。

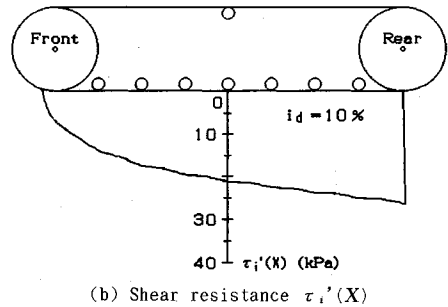
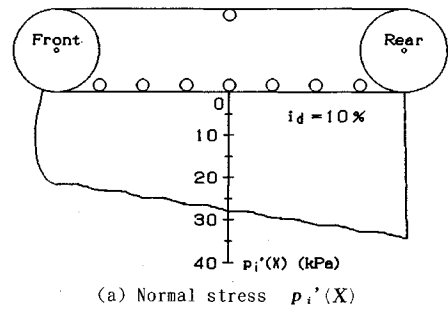


Fig. 9 Distributions of contact pressure in driving state, $\beta = \pi/9$ rad

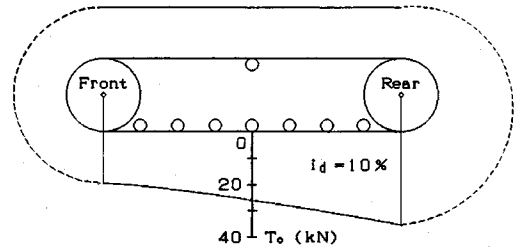


Fig. 10 Distributions of track belt tension T_0 around track belt in driving state, $\beta = \pi/9$ rad

Fig. 9 (a), (b) は、駆動状態における $i_d = 10\%$ での履帯接地部分に作用する接地圧分布として、垂直応力 $p_i'(X)$ とせん断抵抗 $\tau_i'(X)$ の分布形状を示したものである。この場合、履帯張力が十分大きく履帯のたわみ変形量が比較的小さいために、また、傾斜地における車両トリム角 θ_{ti} が 0.0213 rad とかなり大きく、下転輪直下で応力集中する顕著な波状分布は見られない。下転輪間の履帯の各たわみ変形量は、0.33 mm から 2.39 mm の間を変動している。垂直応力 $p_i'(X)$ の分布は、 $e_t = 0.0378$ に対応して後方に傾斜している。また、前輪部分でのせん断抵抗 $\tau_i'(X)$ は、前式 (3) に示すように、前輪最下点 B からの距離 X が小さい間は履帯のスリップ量 $j = i_d X$ が小さいために十分発揮されていないことが分かる。Fig. 10 は、駆動状態における履帯張力 T_0 の分布を $i_d = 10\%$ に対して示したものである。前輪フロントアイドラー直下においては履帯初期張力 19.6 kN が作用し、 T_0 は後輪スプロケットに向かって漸増し、 $X = D$ において最大値 35.5 kN に達している。一方、Fig. 11 (a),

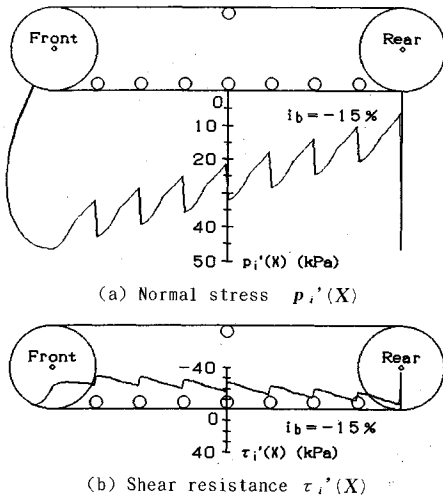


Fig.11 Distributions of contact pressure in braking state, $\beta = -\pi/9$ rad

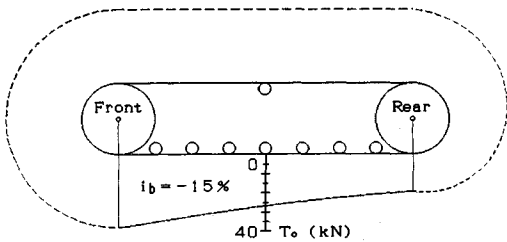


Fig.12 Distribution of track belt tension T_0 around track belt in braking state, $\beta = -\pi/9$ rad

(b) は、制動状態における $i_b = -15\%$ での接地圧分布として、垂直応力 $p_i'(X)$ とせん断抵抗 $\tau_i'(X)$ の分布形状を示したものである。この場合、車両トリム角は、 $\theta_{ti} = 0.0166$ rad と比較的小さく、下転輪直下での応力集中が明瞭に認められ、顕著な波状分布⁴⁾を呈している。垂直応力 $p_i'(X)$ は、 $e_i = -0.0939$ に対応して前方に傾斜している。また、後述するように、履帯張力は前輪スプロケット部において増大しているため、 $p_i'(X)$ の波状振幅は後方に向かって増加する傾向にある。せん断抵抗 $\tau_i'(X)$ の分布は、抗力を発生させるために負値をとり、後方に向かって $p_i'(X)$ の減少とともに低下している。下転輪間の履帯の各たわみ変形量は、1.92 mm から 4.32 mm の間を変動している。Fig.12 は、制動状態における履帯張力 T_0 の分布を $i_b = -15\%$ に対して示したものである。後輪スプロケット直下においては履帯初期張力 19.6 kN が作用し、 T_0 は前輪フロントアイドラーに向かって漸増し、 $X=0$ において最大値 37.9 kN に達している。

4. 最適着点高さ

ブルドーザの有効牽引力の着点高さ h_d がその牽引

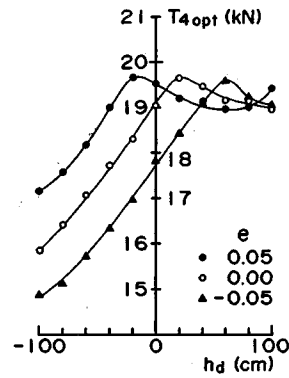


Fig.13 Optimum effective driving force T_{4opt} and height of application force h_d for three kinds of eccentricity e , $\beta = \pi/9$ rad

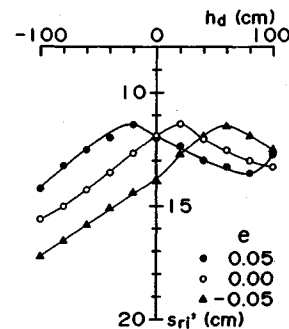


Fig.14 Total amount of sinkage of rear sprocket s'_{ri} and height of application force h_d for three kinds of eccentricity e in driving state, $\beta = \pi/9$ rad

力特性である牽引力 T_4 -スリップ率 i_d 関係、後輪沈下量 s'_{ri} 、牽引力係数 T_4/W 、及び牽引効率 E_t に与える影響はかなり大きく、土工作業の施工能率を大きく支配していることが知られている⁵⁾。ここでは、傾斜角 $\beta = \pi/9$ rad のまき土傾斜地盤を駆動状態で登坂走行する場合、及び $\beta = -\pi/9$ rad の傾斜地を制動状態で下降走行する場合について、有効制・駆動力 T_4 の着点高さ h_d 及び車両重心偏心率 e がそれぞれの走行形態及び作業特性に与える影響について考察し、その最適着点高さを見出すことを目的としてシミュレーション解析を行った。解析に当たっては、 $h_d = -100$ cm ~ 100 cm の間を 20 cm 毎に、また $e = -0.05, 0.00, 0.05$ の 3 種類について算定することとした。

駆動状態で登坂走行する場合、最適有効駆動力 T_{4opt} と着点高さ h_d との関係について各車両重心偏心率 e に対して算定した結果を Fig.13 に示す。 T_{4opt} は、 $e = 0.05$ のとき $h_d = -20$ cm、 $e = 0.00$ のとき $h_d = 20$ cm、 $e = -0.05$ のとき $h_d = 60$ cm において最大値を呈することが判明した。 T_{4opt} を最大ならしめる h_d を最適着点高さ h_{dopt} とすると、車両重心偏心率 e が増加し後方へ移動すると h_{dopt} は低下することが分かる。掘削深さを

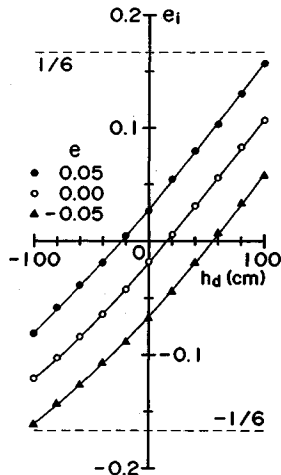


Fig. 15 Eccentricity of resultant normal force e_i and height of application force h_d for three kinds of eccentricity e in driving state, $\beta = \pi/9$ rad

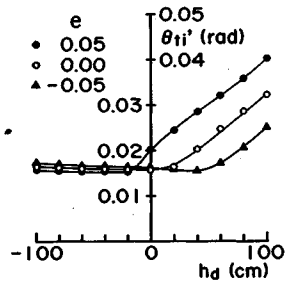


Fig. 16 Trim angle of vehicle θ'_{ii} and height of application force h_d for three kinds of eccentricity e in driving state, $\beta = \pi/9$ rad

一定とした場合、有効掘削力は車両重心偏心率が大きい程増大すること、スクレーパ等を牽引する場合、車両重心偏心率は正值とし重心を後方へ位置すべきこと、また、この場合、最適有効駆動力 T_{Aopt} は車両重量 W のわずか 39.3% しか発揮されていないことが明らかである。

Fig. 14 は、後輪スプロケットの全沈下量 s'_{ri} と着力点高さ h_d との関係について各車両重心偏心率 e に対して算定したものである。 s'_{ri} は、 $e=0.05$ のとき $h_d=-20$ cm、 $e=0.00$ のとき $h_d=20$ cm、 $e=-0.05$ のとき $h_d=60$ cm において最小値を呈することが判明した。すなわち、 s'_{ri} が最小値を示す h_d において走行抵抗は最小となり、有効駆動力 T_{Aopt} は最大値を示し、これらの h_d は最適着力点高さ h_{dopt} と完全に一致している。この場合、各最小沈下量の平均値は 11.4 cm である。Fig. 15 は、地盤反力偏心率 e_i と着力点高さ h_d との関係について各車両重心偏心率 e に対して算定したものである。一般に、 e_i は h_d の増加とともに単調増加しており、一定の h_d に対して e が大きい程 e_i は大きくなっている。また、この場合、すべての e_i は履帯接地部の middlethird の範囲内に位置

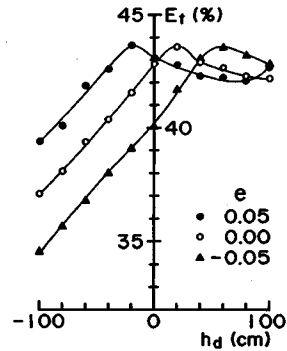


Fig. 17 Tractive efficiency of power E_t and height of application force h_d for three kinds of eccentricity e in driving state, $\beta = \pi/9$ rad

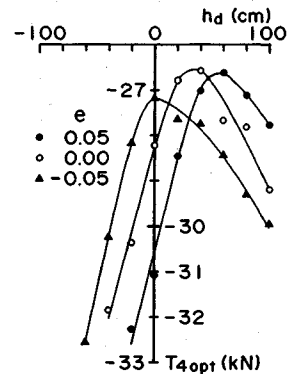


Fig. 18 Optimum effective braking force T_{Aopt} and height of application force h_d for three kinds of eccentricity e , $\beta = -\pi/9$ rad

しており、安定走行していることが判明した。Fig. 16 は、車両トリム角 θ'_{ii} と着力点高さ h_d との関係について各車両重心偏心率 e に対して算定したものである。 θ'_{ii} は、 h_d の減少とともにほぼ直線的に減少していき、 $h_d < 0$ においてほぼ一定値に収斂している。また、一定の h_d に対しては e 値の大きな車両ほど θ'_{ii} は大きな値を示している。Fig. 17 は、牽引効率 E_t と着力点高さ h_d との関係について各車両重心偏心率 e に対して算定したものである。 E_t は、 $e=0.05$ のとき $h_d=-20$ cm、 $e=0.00$ のとき $h_d=20$ cm、 $e=-0.05$ のとき $h_d=60$ cm において最大値を呈しており、いずれの最適着力点高さにおいても最大となることは明らかである。この場合、最大値の平均値は 43.6% である。以上、最適有効駆動力 T_{Aopt} を最大ならしめる最適着力点高さ h_{dopt} において、履帯の轆深さである後輪沈下量 s'_{ri} 及び走行抵抗は最小値を示し、牽引効率 E_t は最大値を示すことが判明した。

一方、制動状態で下降走行する場合、最適有効制動力 T_{Aopt} と着力点高さ h_d との関係について、各車両重心偏心率 e に対して算定した結果を Fig. 18 に示す。安定走行域 $-1/6 \leq e_i \leq 1/6$ における $|T_{Aopt}|$ は、 $e=0.05$ のとき、 $h_d=60$ cm において最小値 26.6 kN をとり、 $h_d=-20$

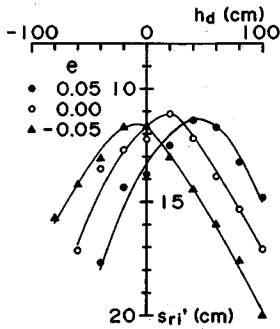


Fig.19 Total amount of sinkage of rear sprocket s'_{ri} and height of application force h_d for three kinds of eccentricity e in braking state, $\beta = -\pi/9$ rad

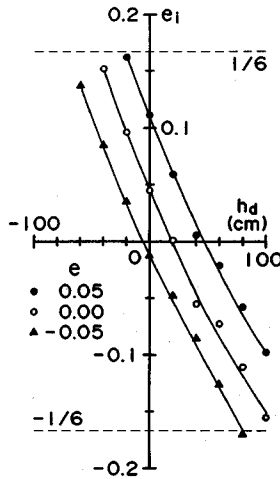


Fig.20 Eccentricity of resultant normal force e_i and height of application force h_d for three kinds of eccentricity e in braking state, $\beta = -\pi/9$ rad

cmにおいて最大値 32.3 kN を呈し、 $e=0.00$ のとき、 $h_d = 40$ cm において最小値 26.6 kN をとり、 $h_d = -40$ cm において最大値 31.9 kN を呈し、 $e = -0.05$ のとき、 $h_d = 0$ cm において最小値 27.2 kN をとり、 $h_d = -60$ cm において最大値 32.6 kN を呈することが判明した。一般に、着点高さ h_d が負となると、リッパチップ等の掘削抵抗が作用するときの有効掘削力を算定していることとなる。ある h_d で掘削抵抗が一定であるとき、 T_{aopt} からその掘削抵抗を差し引いた値が実際のスクレーパ等の有効制動力と考えることができる。なお実際問題として、傾斜地で作業するスクレーパ等の有効制動力の算定には、 $h_d > 0$ 、 $-1/6 \leq e_i \leq 1/6$ の範囲で着点高さを考える方が常識である。このとき、最適有効制動力である $|T_{aopt}|$ が上記範囲内で得られる最大値をとるときの h_d を最適着点高さ h_{dopt} とすると、 $e=0.05$ において、 $h_{dopt} = 0$ cm で最大値 $|T_{aopt}|_{max} = 31.0$ kN を呈し、 $e=0.00$ において、 $h_{dopt} = 100$ cm で最大値 $|T_{aopt}|_{max} = 29.2$ kN を呈し、 $e = -0.05$ において、 $h_{dopt} = 80$ cm で最大値

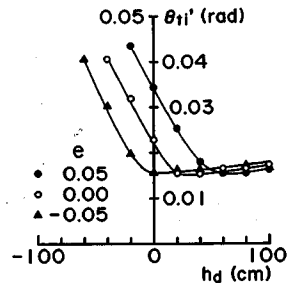


Fig.21 Trim angle of vehicle θ'_{ii} and height of application force h_d for three kinds of eccentricity e in braking state, $\beta = -\pi/9$ rad

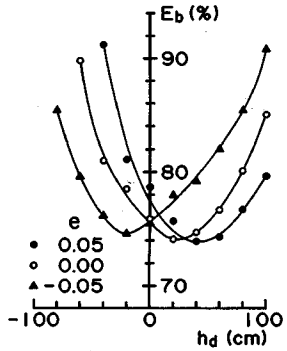


Fig.22 Braking efficiency of power E_b and height of application force h_d for three kinds of eccentricity e , $\beta = -\pi/9$ rad

$|T_{aopt}|_{max} = 29.3$ kN を呈することが明らかとなった (Fig.20 参照)。Fig.19 は、後輪スプロケットの全沈下量 s'_{ri} と着点高さ h_d の関係について、各車両重心偏心率 e に対して算定したものである。 s'_{ri} は、 $e=0.05$ において、 $h_d = 40$ cm で最小値 11.4 cm、 $h_{dopt} = 0$ cm で 13.8 cm を呈し、 $e=0.00$ において、 $h_d = 20$ cm で最小値 11.1 cm、 $h_{dopt} = 100$ cm で 17.1 cm を呈し、 $e = -0.05$ において、 $h_d = 0$ cm で最小値 11.6 cm、 $h_{dopt} = 80$ cm で 17.6 cm を呈することが判明した。一般に、制動状態においては、 s'_{ri} が大きい程走行抵抗は増大し、最適有効制動力 $|T_{aopt}|$ は増加する傾向にある。Fig.20 は、地盤反力偏心率 e_i と着点高さ h_d との関係について、各車両重心偏心率 e に対して算定したものである。一般に、 e_i は h_d の増加とともに単調減少しており、一定の h_d に対して e が大きい程 e_i は大きくなっている。Fig.21 は、車両トリム角 θ'_{ii} と着点高さ h_d の関係について、各車両重心偏心率 e に対して算定したものである。 θ'_{ii} はある h_d の値に達するまで h_d の増加とともにほぼ直線的に減少している。また、一定の $h_d < 0$ に対しては e 値の大きな車両ほど θ'_{ii} は大きな値を示している。Fig.22 は、制動駆動 E_b と着点高さ h_d の関係について、各車両重心偏心率 e に対して算定したものである。 E_b は、 $e=0.05$ において、 $h_d = 40$ cm で最小値 73.9%、 $h_{dopt} = 0$ cm で 79.5% を呈し、 $e=0.00$ において、 $h_d = 20$ cm で最小

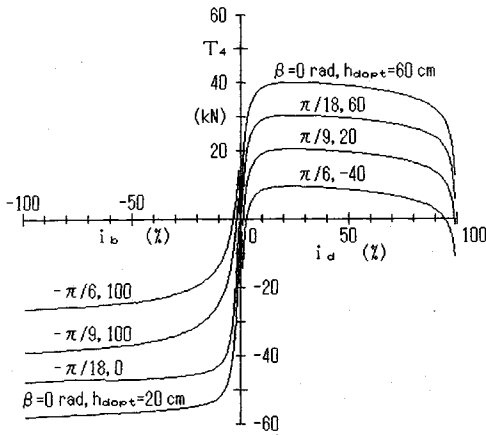


Fig.23 Effective driving and braking force T_4 and slip ratio i_d and i_b for various slope angles β and optimum application heights h_{dopt} ($e=0.00$)

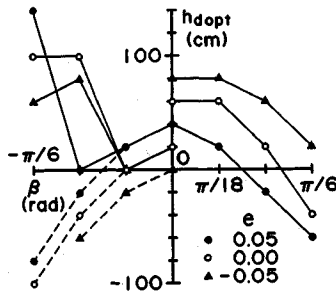


Fig.24 Relations between optimum application height h_{dopt} and slope angle β in driving and braking state for three kinds of eccentricity e

値 74.1%, $h_{dopt}=100$ cm で 85.1% を呈し, $e=-0.05$ において, $h_d=-20$ cm で最小値 74.7%, $h_{dopt}=80$ cm で 85.4% を呈することが判明した. 以上, $h_d > 0$, $-1/6 \leq e_i \leq 1/6$ の範囲内で有効制動力 $|T_{4opt}|$ を最大ならしめる最適着力点高さ h_{dopt} において, 履帯の轍深さ s_{ri} 及び走行抵抗は十分大きく, 制動効率 E_b は十分大きくなることが判明した.

5. 傾斜角と着力点高さ制御

ゆるく堆積したまま土地盤を登坂下降する当該ゴム製履带式小型ブルドーザの走行性能に与える傾斜角 β の影響について, 主として, 最適着力点高さ h_{dopt} を各傾斜角 β に対して制御する方法について検討する.

まず, 登坂駆動時における β の h_{dopt} に与える影響について, 車両重心偏心率を $e=-0.05$, 0.00 および 0.05 に対してシミュレーション解析を行った. 一例として, Fig.23 に示したのは, $e=0.00$ に対して, $\beta=0$ rad, $h_{dopt}=60$ cm と $\beta=\pi/18$ rad, $h_{dopt}=60$ cm 及び $\beta=\pi/9$ rad, $h_{dopt}=20$ cm と $\beta=\pi/6$ rad, $h_{dopt}=-40$ cm における有効駆動力 T_4 とスリップ率 i_d の関係である. それぞ

れの最適有効駆動力 T_{4opt} は傾斜角 β の増加とともに増加する車両重量成分によって減少する傾向にある. また, T_{4opt} 及び牽引効率を最大ならしめる最適着力点高さ h_{dopt} は, 傾斜角 β と車両偏心率 e によって変化し, Fig.24 に示したように, h_{dopt} は β 及び e の増加とともに減少することが明らかであり, いずれも安定走行している. なお, $h_{dopt} < 0$ となる領域においては, 実際の牽引力は T_{4opt} からの地盤の掘削抵抗を差し引いたものとなる.

次に, 下降制動時における β の h_{dopt} に与える影響について, 同様に車両重心偏心率 $e=-0.05$, 0.00 及び 0.05 に対してシミュレーション解析を行った. 一例として, 前図 23 に示したのは, $e=0.00$ に対して, $\beta=0$ rad, $h_{dopt}=20$ cm と $\beta=-\pi/18$ rad, $h_{dopt}=0$ cm, 及び $\beta=-\pi/9$ rad, $h_{dopt}=100$ cm と $\beta=-\pi/6$ rad, $h_{dopt}=100$ cm における有効制動力 T_4 とスリップ率 i_b の関係である. それぞれの最適有効制動力 $|T_{4opt}|$ は, 傾斜角 $|\beta|$ の増加とともに減少する車両重量成分によって減少する傾向にある. また, $|T_{4opt}|$ 及び制動効率を最大ならしめる最適着力点高さ h_{dopt} は, 傾斜角 β と車両偏心率 e によって変化し, 前図 24 の破線で示したように, h_{dopt} は $|\beta|$ 及び e の増加とともに減少することが明らかである. この時, $h_{dopt} < 0$ となる領域においては, 実際の制動力は T_{4opt} に地盤の掘削抵抗を加算する必要がある. 一方, 同図実線で示したのは, 実際の下降制動作業において, 着力点高さは地上にあることと, 最適有効制動力が発揮されるとき, 地盤反力の偏心率 e_i が安定走行領域である $-1/6 \leq e_i \leq 1/6$ の範囲にあることを考慮して決定したものである.

以上, ある傾斜角 β に対して最適着力点高さ h_{dopt} が決定すると, 走行地盤の β を傾斜センサーで計測することにより着力点の位置制御が可能であり, より合理的な施工効率の高い登坂駆動及び下降制動作業を実行することができる.

6. 結 論

ゴム製履带式ブルドーザの最適な操縦方法をロボット化するために, ゆるく堆積したまま土地盤で構成される傾斜地を登坂駆動または下降制動作業を行うブルドーザの有効制・駆動力を最大ならしめ, かつ牽引効率・制動効率を最大ならしめる最適着力点高さを自動制御する方法について考察した. ここでは, 車両重量 50 kN のブルドーザについて, 地盤-履帯係定数を実験で求め, 登坂下降時のブルドーザの最適着力点高さ及び傾斜角度と車両重心偏心率について, シミュレーション解析を行った. 得られた新しい知見を要約すると次のようになる.

- (1) 登坂駆動時において, 最適有効駆動力を最大な

らしめる最適着点高さは、後輪スプロケットの全沈下量の最小値、及び牽引効率の最大値を示す着点高さとも一致する。傾斜角 $\pi/9$ rad における最適着点高さは、車両重心偏心率 $-0.05, 0.00, 0.05$ に対し、それぞれ 60 cm, 20 cm, -20 cm で与えられる。

(2) 下降制動時において、最適有効制動力を最大ならしめる着点高さにおいて、後輪スプロケットの全沈下量は最小値を示し、制動効率の最小値を示す着点高さとはほぼ一致している。安定走行領域において、着点高さを地上とすると、最適有効制動力の絶対値を最大ならしめる最適着点高さにおいて、後輪スプロケットの全沈下量は増大し、制動効率も増大している。傾斜角 $-\pi/9$ rad における最適着点高さは、車両重心偏心率 $-0.05, 0.00, 0.05$ に対し、それぞれ 80 cm, 100 cm, 0 cm で与えられる。

(3) 登坂駆動時における最適着点高さでの最適有効駆動力は、傾斜角の増加とともに増加する車両重量成分の増大とともに減少し、車両重心偏心率の増加とともに減少する。一方、下降制動時における最適着点高さでの最適有効制動力の絶対値は、傾斜角の絶対値及び車両重心偏心率の増加とともに減少する。なお、安定走行領域において着点高さを地上とすると、一般的な傾向は存在しない。

(4) 車両重心が 0.00 である場合を一例にとると、登坂駆動時においては、傾斜角 $0, \pi/18, \pi/9, \pi/6$ rad に対する最適着点高さは、それぞれ 60, 60, 20, -40 cm であり、下降制動時においては、傾斜角 $0, -\pi/18, -\pi/9, -\pi/6$ rad に対する最適着点高さは、実用上、それぞれ 20, 0, 100, 100 cm で与えられる。

(5) ブルドーザの最適着点高さを自動制御するシステムは、傾斜地の傾斜角を自動的に傾斜センサーで計測し、事前に算定された走行モードに従って着点位置を自動的に設定することにより構築することができる。

なお、以上のシミュレーション解析においては、トラクタ側の牽引具とこれに接続するスクレーパ側の牽引具は、地表面方向に一直線上に位置していると仮定しているが、実際上両者の着点高さを同時に制御することは容易ではない。そのため、スクレーパ側の牽引具の着点高さが固定されている場合には、有効制動力の作用方向角を考慮した解析方法について、別途検討する必要がある。

また、登坂駆動時及び下降制動時における最適着点高さは、常にトラクタ側の最低地上高さ以上でなければならないことを、制御条件に加えておく必要がある。

参考文献

- 1) Muro, T. : Application height control system of a tractor carrying up weak slope at driving state, Proc. of 9th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, JSCE, Vol. 2, Tokyo, JAPAN, pp. 823~832, June, 1992.
- 2) Muro, T. : Grouser Shape Effect on Tractive Performance of a Flexible Tracked Vehicle Carrying up Slope Terrain, Proc. of the 4th Regional North American Meeting, ISTVS, pp.9~16, 1992.
- 3) 室達朗・尾本清・柳楽篤司：湿地用ブルドーザの走行性能——エネルギー解析——，土木学会論文集，第403号/VI-10, pp.103~110, 1989年3月。
- 4) Wong, J.Y. : Terramechanics and Off-Road Vehicles, Elsevier, pp.105~137, 1989.
- 5) Yong, R.N., Elmamlouk, H. and Skiadas, N. : Effect of Hitch Positions on the Performance of Track/Grouser Systems, Proc. of 8th Int. Conference of ISTVS, Vol.1, pp.381~397, 1984.
- 6) 室達朗：湿地ブルドーザの最適着点高さ制御システム，第1回建設ロボットシンポジウム論文集，土木学会他，pp.197~206, 1990.

(1992.11.24 受付)

APPLICATION HEIGHT CONTROL SYSTEM OF A BULLDOZER MOVING UP AND DOWN WEAK SLOPED TERRAIN IN DRIVING AND BRAKING STATES

Tatsuro MURO

Carrying up and down a scraper under transportation of soil on a weak sloped terrain, the application height of the effective driving and braking force of a bulldozer could be controlled to obtain the maximum force and the maximum efficiency of power. Several tractive and braking performances of a 50 kN weight rubber tracked bulldozer trailing up and down a given weak sandy sloped terrain have been simulated. As a result, it is clarified that the optimum application height is 60, 60, 20, -40 cm for slope angle $0, \pi/18, \pi/9, \pi/6$ rad in driving state, and 20, 0, 100, 100 cm in braking state, respectively. The automated control positioning system of the attachment could be developed by use of an inclinometer.