

湿地用ブルドーザの走行性能 ——模型車両実験——

TRAFFIC PERFORMANCE OF A BULLDOZER RUNNING ON A WEAK TERRAIN ——VEHICLE MODEL TEST——

室 達朗*・尾本 清**・二村政明***

By Tatsuro MURO, Kiyoshi OMOTO and Masaaki FUTAMURA

To clarify the trafficability and the traffic performance of a bulldozer operating on a weak terrain at driving and braking state, several vehicle tests were executed on a re-molded silty loam terrain of 30% water content by use of a small tracked vehicle of 3.55 kN weight, 71 cm contact length and 20 cm width of track belt. From the measured relations between driving and braking force, drawbar-pull and effective braking force, sinkage and slip ratio, it is clarified that the largest drawbar-pull is obtained at 3.2 grouser pitch height ratio and the locomotion resistance increases with the increment of slip ratio at driving state, and the sinkage under the rear sprocket at driving state is larger than that at braking state due to the large amount of slippage and the large eccentricity.

Keywords: bulldozer, weak terrain, trafficability, driving and braking state

1. まえがき

今日、建設機械の発達は著しく進み、機械化施工の普及に伴って土-車両系の研究が盛んに行われるようになってきた。軟弱地盤上で作業する履带式建設車両がその作業性能である押土などに必要な牽引性能を十分に発揮するためには、履帯の接地圧を低くすることによって沈下量を減少させ走行抵抗を抑制すべきであるとされているが、いまだその力学的機構は十分に明らかにされていない。ここでは、軟弱地盤上を走行する湿地ブルドーザの走行性能とトラフィカビリティーにおいて、制・駆動時における剛性履带式車両の有効制動力、有効牽引力および沈下量がスリップ率によってどのように変化するかを明らかにするため車両実験を行った。軟弱地盤としては、車両が複数回通過することを考慮し、含水比約30%、コーン指数約31 kPa (0.32 kgf/cm²) に調整したシルト質ロームを十分に攪拌した状態で長大土槽に充填したものを使用した。この地盤の力学特性を把握するため、T字形グラウザの高さ3.2 cm、ピッチ5.1、10.2および

20.4 cmの3種類の履帯モデルを使用し、平板載荷試験と牽引試験を実施して地盤のせん断強度特性および静・動的沈下変形特性を明らかにした。湿地ブルドーザとして、新しく製作した重量3.55 kN、履帯幅20 cm、接地長71 cmの小型剛性履带式車両を使用し、3種類の履帯構造が走行性能、特に制・駆動力、有効制動・牽引力とスリップ率との関係に及ぼす影響を明らかにするため土槽での走行試験を実施した。また、駆動時において最大作業能力を発揮する最適スリップ率を決定することも可能となり、この車両実験結果は、履帯モデル試験結果とともに将来のより効率的な湿地ブルドーザの開発と運用に役立ち、土木施工学上有用な基礎資料となるものと確信する。

2. 履帯モデル牽引実験

(1) 実験方法

試料土として、愛媛県越智郡菊間町産のシルト質ロームを使用した。その試料土を鋼製パネルで製作された土槽(540 cm×150 cm×60 cm)に、深さが約40 cmになるように充填した。含水比約30%、コーン指数約31 kPa (0.32 kgf/cm²) になるように調節し、特に鉛直方向に強度が等しくなるように攪拌を行い攪乱した状態で、平坦に整地してから実験を行った。試料土の土質性

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

** 正会員 工修 日本電信電話(株)
(〒100 千代田区内幸町1-1-6)

*** 日本電炉(株) (〒537 大阪市東成区深江北2-11-17)

状を表一に示す。

履帯モデル牽引実験に用いた牽引装置の駆動源は、0.2 kW のモータであり、その出力軸に直径 7 cm、高さ 15 cm のドラムを取り付け、2 個の定滑車を介して速度 0.23~0.85 cm/s の範囲でワイヤーを巻き取ることができる。このワイヤーの一端は、履帯モデルと連結しているが、その途中でロードセル（最大 20 kN、感量 1 N）を中継している。図一に実験土槽および履帯モデル牽引実験装置の概略を示す。

履帯モデルは平鉄に T 字形履板を取り付けたものである。図二に履帯モデルの一例を示す。接地長 $D_m=70$ cm、履帯幅 $B_m=20$ cm、グラウザ高さ $H=3.2$ cm と一定とし、グラウザピッチ $G_p=5.1, 10.2, 20.4$ cm、接地圧 $p=7.1(0.072), 10.1(0.103), 12.3$ kPa (0.126 kgf/cm²) とした。

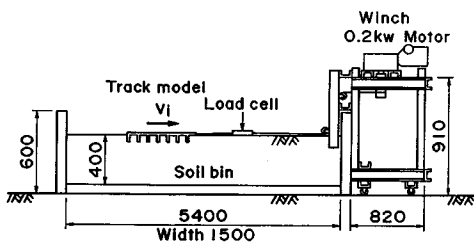
履帯モデルを一定速度 0.85 cm/s で 70 cm 牽引する間、牽引抵抗をロードセルより検出しペンレコーダに自記記録させ、履帯モデル後端の腹下面の沈下量をデプスゲージで計測した。

(2) 実験結果と考察

図三に一例として $G_p=10.2$ cm に対する単位接地面積当たりの牽引抵抗 f 、履帯モデル後端での腹下面を基準にした沈下量 S とスリップ量 j の関係を示す。いずれの場合も牽引抵抗と沈下量は、接地圧やスリップ量が大きくなるに従って増加している。また、最大スリップ量 70 cm においては、同一接地圧の下で 3 種類のグラウザピッチを比較すると、図四に示すように、 $G_p=10.2$ cm ($G_p/H \approx 3.2$) 付近で、牽引抵抗は最大となり、

表一 土質性状

真 比 重	2.84	
液 性 限 界 (%)	33.2	
塑 性 限 界 (%)	21.4	
塑 性 指 数	11.8	
粒 度 分 析	均 等 係 数	6.40
	曲 率 係 数	0.31
	平 均 粒 径 (μ m)	54
単 位 体 積 重 量 (kN/m^3)	18.6	
間 隙 比	0.85	
含 水 比 (%)	29.5 ± 1.0	



図一 履帯モデル牽引実験装置の概略

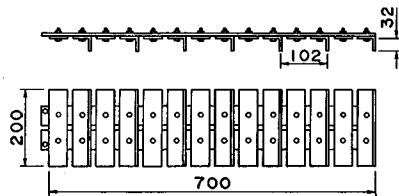
鼠¹⁾の推論と一致している。ここで、グラウザピッチ G_p (cm)、スリップ量 j (cm)、接地圧 p (kPa) を独立変数とし、牽引抵抗 f (kPa)、初期沈下量 S_0 (cm)、すべり沈下量 S_s (cm) をそれぞれ従属変数として重回帰分析を行い、以下の式を得た。それぞれのパラメーターの値を表二に示す。

$$f = (m_c + p \cdot m_f) \{1 - \exp(-a \cdot j)\} \dots \dots \dots (1)$$

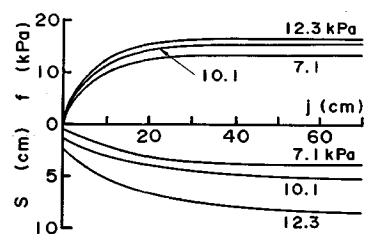
$$S_0 = b_0 \cdot p^{b_1} \dots \dots \dots (2)$$

$$S_s = c_0 \cdot p^{c_1} \cdot j^{c_2} \dots \dots \dots (3)$$

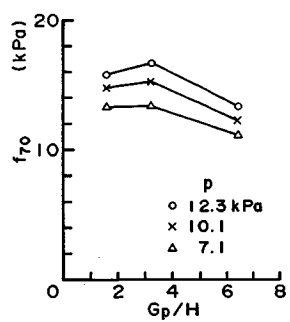
ここで、 m_c は、履帯形状と土質性状より定まる粘着力項であり、 m_f は、同じく内部摩擦係数項であり、履帯側面および前面盛り上がり部分のせん断抵抗をも含めて計測したものである。同一試料土上で履帯モデル牽引実験を行ったにもかかわらず、この m_c と m_f が履帯モデル形状に対して異なるのは、土の破壊形態の相違によるためである²⁾。また a は、Janosi-Hanamoto³⁾ が粘性土のせん断抵抗力とスリップ量の関係に対して適用した土



図二 履帯モデルの概略 ($G_p=10.2$ cm, $H=3.2$ cm)



図三 牽引抵抗 f 、沈下量 S とスリップ量 j の関係 ($G_p=10.2$ cm)



図四 スリップ量 70 cm に対する牽引抵抗 f_{70} とグラウザピッチ高さ比 G_p/H の関係

の変形係数の逆数である。また、履帯モデルの両側面や前面の土を取り除いて底面だけでせん断実験をしたときの各グラウザに対する見掛けの粘着力、内部摩擦角の値も併せて同表に示す。いずれもグラウザ形状によって左右され、真の粘着力、内部摩擦角を示すものではない。

3. 車両実験

(1) 実験装置

試料土と土槽は、攪乱地盤における履帯モデル牽引実験と同じである。牽引装置は、静・駆動時における車両の速度およびスリップ率を制御するためのものであり、その牽引装置の駆動源は、可変速モータ（出力3.7kW）である。その機構は履帯モデル牽引実験で用いた牽引装置と同じであるが、ワイヤーの巻き取りまたは巻き出し速度 V は、3.9~23.6 cm/s である。このワイヤーの一端は、実験車両と連結されており、ワイヤーの途中にロードセル（最大20 kN、感量1 N）を中継している。なお、スリップ率 i は駆動状態で正值、制動状態で負値をとるものとし、次式より算定した。

$$\text{駆動状態} \quad i = 1 - V/V' \dots\dots\dots (4)$$

$$\text{制動状態} \quad i = V'/V - 1 \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 V は車両の水平方向の走行速度、 V' は制・駆動輪での車体に対する履帯のグラウザ先端位置での回転

速度である。図—5に制・駆動状態の車両と実験装置を示す。

(2) 実験車両

図—6に剛性履带式車両の概略図を示すように、車両は定速モータ（出力1.5 kW）を原動機とした後輪駆動であり、履帯はアタッチメント付ローラチェーンに履帯モデルと同一の履板を取り付けたものである。この剛性車両では、通常用いられる下転輪の代わりにマルチローラ⁴⁾を採用した。なお、車両諸元は表—3に示す。

(3) 実験方法

一般に、車両走行状態は自走、駆動、制動の3つの状態に大別される。ここでは、これら3つの状態で実験を行った。自走状態とは、有効牽引力は作用せず、推進力と走行抵抗が、つり合って走行しているとき、すなわち

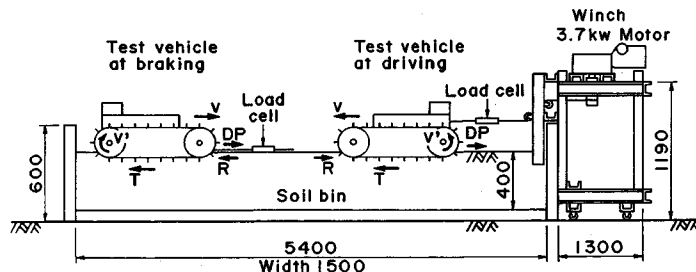
表—3 剛性履带式車両の諸元

車両重量 (kN)	3.55
平均接地圧 p_0 (kPa)	12.5
履帯腹下面からの重心 G の高さ h_0 (cm)	35.3
原動機出力 (kW)	1.5
接地長 D (cm)	71
履帯周長 (cm)	236
履帯中心距離 C (cm)	67.2
クリアランス (余裕高) A (cm)	13.5
前輪 (遊動輪) 半径 R_r (cm)	14.8
後輪 (駆動輪) 半径 R_r (cm)	14.8
履板幅 B (cm)	20
履帯厚さ (cm)	0.3
履帯移動速度 V' (cm/s)	9.4
車両偏心率 e (%)	-0.5
G_0 (グラウザピッチ) (cm)	5.1, 10.2, 20.4
H (グラウザ高さ) (cm)	3.2
G_0/H	1.6, 3.2, 6.4
車両中心から有効牽引力作用点 M までの水平距離 l_0 (cm)	50.8
有効牽引力作用点 M の高さ h_0 (cm)	32.5
車両中心から有効制動力作用点 N までの水平距離 l_s (cm)	17.3
有効制動力作用点 N の高さ h_s (cm)	11.5

表—2 履帯モデル牽引実験結果

G_0 (cm)	5.1	10.2	20.4
m_0 (kPa)	10.00	9.02	8.33
m_r	0.471	0.620	0.401
a (1/cm)	0.14	0.15	0.13
r	0.979	0.985	0.982
b_0	2.61×10^{-3}	2.83×10^{-3}	3.07×10^{-3}
b_1	2.53	2.53	2.53
r	0.982	0.976	0.980
c_0	0.1386	0.1002	0.1048
c_1	0.860	0.855	0.754
c_2	0.425	0.466	0.403
r	0.963	0.864	0.963
c (kPa)	7.94	6.76	5.19
ϕ (degree)	24.7	27.9	27.9
r	0.969	0.957	0.933

r : 相関係数



図—5 制・駆動状態における車両実験装置概略

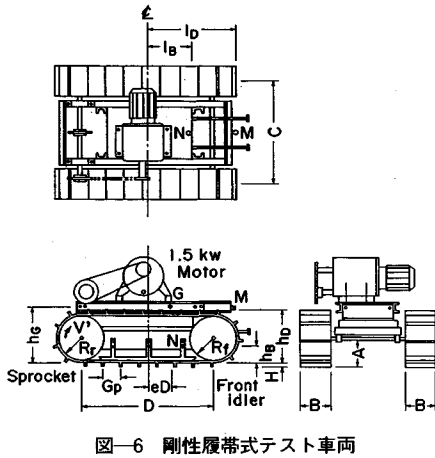


図-6 剛性履带式テスト車両

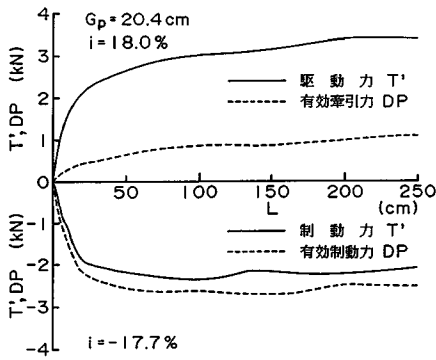


図-7 制・駆動力 T' 、有効制動力および有効牽引力 DP と走行距離 L の関係

車両を牽引装置により拘束しないで走行させる状態をいう。駆動状態は、履帯速度 V' が牽引装置の巻き出し速度、すなわち車両速度 V を上回っている状態で、制動状態は、逆に車両速度 V が、履帯速度 V' を上回っている状態である。これらの状態で履帯速度と車両速度を制御してそれぞれ異なるスリップ率で実験を行った。

測定項目は、制・駆動力 T' 、有効制動力および有効牽引力 DP 、初期沈下量前輪 S_{0r} 、後輪 S_{0r} (cm)、走行中前輪沈下量 S_r (cm)、後輪沈下量 S_r (cm) であり、 T' は、後輪両車軸に貼ったひずみゲージによりトルクを検出し、 DP は前述のロードセルにより計測してそれぞれペンレコーダに自記記録させた。制・駆動力 T' は左右後輪軸で計測されたトルクの和を後輪の半径 R_r で除したのちマルチローラと履帯との間の内部抵抗であるところり摩擦抵抗 299 N を差し引いて算定した。さらに、制動状態ではフロントアイドラ部分のところがり摩擦のために後輪スプロケットでのトルクの計測値は過少評価されるためそのところがり摩擦係数 $\mu = 0.152$ に対して各計測値を補正した。初期沈下量は車両が静止しているときデプスゲージで測定し、 S_r は車両の前輪部に取り

付けたマジックで走行中の車両の動きを紙上に描かせ、 S_r は、わだちよりデプスゲージで計測した。沈下量はいずれも履帯腹下面の位置において計測した。

(4) 実験結果と考察

図-7 に一例として $G_p = 20.4$ cm に対する実験結果として得られた剛性履带式車両の制・駆動力 T' 、有効制動力および有効牽引力 DP と走行距離の関係を示す。一般的傾向として、走行距離が 30~50 cm までの初期走行領域では T' 、 DP は増大する傾向にあるが、定常走行領域にはいると、ほぼ一定の値をとる。

図-8 に各 G_p に対する剛性履带式車両の T' 、 DP とスリップ率 i の関係を示す。ここでいう T' 、 DP とは、定常走行領域における時間 2 秒ごとの値を平均したものである。駆動、制動状態ともにスリップ率が増大するほ

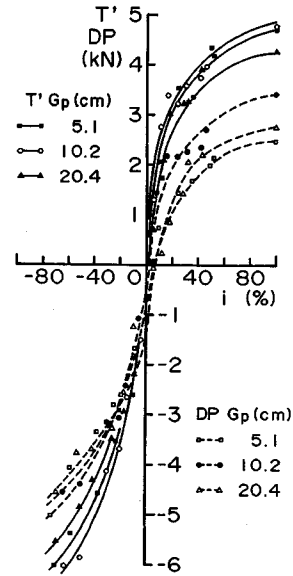


図-8 制・駆動力 T' 、有効制動力および有効牽引力 DP とスリップ率 i の関係
($H = 3.2$ cm, $G_p = 5.1, 10.2, 20.4$ cm)

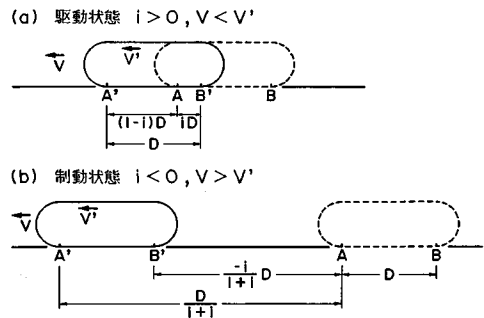


図-9 制・駆動時の車両の移動量とスリップ量
(履帯が車両に対して D だけ移動した場合)

ど、 T' 、 DP が大きくなると同時に走行抵抗も増大する。また、 $G_p=10.2$ cm のとき最大の T' 、 DP を発揮することが明らかとなった。

また、各スリップ率 i に対して駆動力が制動力より小さくなるのは、接地長 D の履帯後端での履板のスリップ量が駆動状態では iD となる²⁾のに対し制動状態では $iD/(1+i)$ となるため、駆動時に発揮されるスリップ量が相対的に小さく十分なせん断抵抗力を発生していないためである。

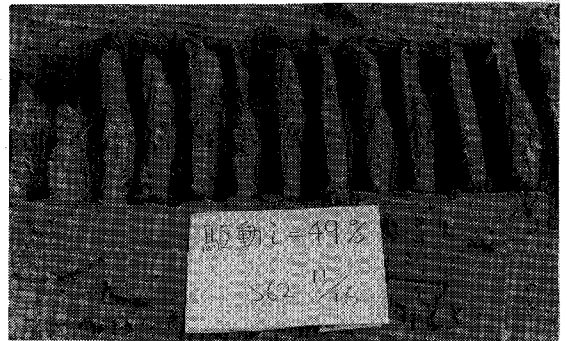
一方、駆動状態においては、図—9(a) に示すように履帯が車両に対して D だけ移動するとき、車両の移動量 $\overline{AA'}=(1-i)D$ であるのに対し履帯後端でのスリップ量 $\overline{AB}=iD$ となり、その所要時間は D/V' で与えられる。したがって、車両が地面上の A 点を完全に通過する間の時間 t_a は次式のように算定される。

$$t_a = \frac{D}{V'} \times \frac{D}{(1-i)D} = \frac{1}{1-i} \cdot \frac{D}{V'} \dots\dots\dots (6)$$

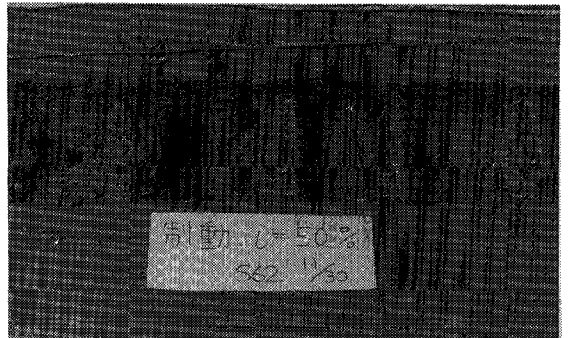
また、車両通過に伴う地面上の A 点のスリップ量 j_a は次式のようにスリップ速度と車両通過時間 t_a の積で与えられる。

$$j_a = (V' - V) t_a = V' \cdot i \times \frac{1}{1-i} \cdot \frac{D}{V'} = \frac{iD}{1-i} \dots\dots\dots (7)$$

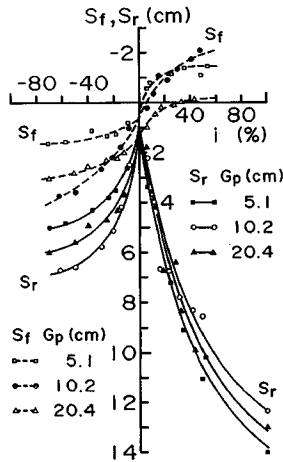
また、制動状態においては、図—9(b) に示すように履帯が車両に対して D だけ移動するとき、車両の移動量 $\overline{AA'}=D/(1+i)$ であるのに対し履帯後端でのスリップ量 $\overline{AB'}=-iD/(1+i)$ となり、その所要時間は $D/(V(1+i))$ で与えられる。したがって、車両が地表面



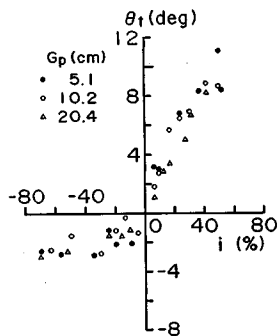
写真—1 駆動状態における履帯のわだち
($i=49\%$ 、 $G_p=10.2$ cm)



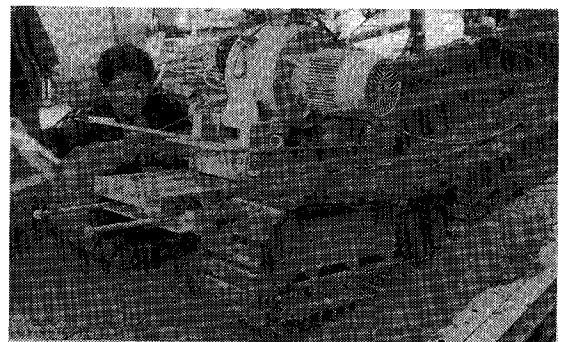
写真—2 制動状態における履帯のわだち
($i=-50\%$ 、 $G_p=10.2$ cm)



図—10 前輪沈下量 S_f 、後輪沈下量 S_r とスリップ率 i の関係
($H=3.2$ cm、 $G_p=5.1, 10.2, 20.4$ cm)



図—11 車両のトリム角 θ_t とスリップ率 i の関係



写真—3 駆動状態における履帯式車両
($i=49.2\%$ 、 $G_p=5.1$ cm)

上のA点を完全に通過する間の時間 t_b は次式のように算定される。

$$t_b = \frac{D}{V} = (1+i) \frac{D}{V'} \dots\dots\dots (8)$$

また、車両通過に伴う地表面上のA点のスリップ量 j_b は次式のようにスリップ速度と車両通過時間 t_b の積で与えられる。

$$j_b = (V - V') t_b = -V \cdot i (1+i) \frac{D}{V'} \\ = -V \cdot i \times \frac{V'}{V} \cdot \frac{D}{V'} = -i \cdot D \dots\dots\dots (9)$$

次に、図-10に各 G_p に対する剛性履带式車両の走行中前輪沈下量、後輪沈下量とスリップ率の関係を示す。駆動状態では、スリップ率が増加するほど後輪沈下量が大きくなる傾向を示す。これはスリップ率が大きくなるほど、スリップ量が増大し、すべり沈下量が増えるためである。しかし、制動状態では、土のスリップ量が小さいため、駆動ほど後輪沈下量は、大きくなる。すなわち、車両通過後の土のスリップ量は駆動状態で $iD/(1-i)$ であるのに対し制動状態では $-iD$ となるからである。このことは、わだちの形成過程を撮影した駆動状態での写真-1と制動状態での写真-2からも明らかである。

図-11は、制・駆動時における定常走行領域での車両のトリム角と各スリップ率の関係を示す。制動状態と比較して駆動状態でのトリム角は大きく、前図-10より明らかに前輪部は浮上しているため履帯底面反力の作用位置の偏心率は1/6を超過している。このことは、駆動走行時の写真-3からも明らかである。なお、 $G_p = 20.4$ cmの駆動状態での前輪沈下量が小さいのは、グラウザ数の減少による初期沈下量の増大に帰因するものと考える。

4. 結 論

剛性履带式車両実験を通じて軟弱地盤上を走行する湿地ブルドーザの走行性能を解明するための重要な知見を得たので以下にまとめて列記する。

(1) 履带式車両の推進力となる剛性履帯と土との間に発生する土のせん断抵抗 f は、一般に、接地圧 p とスリップ量 j に対して次式で与えられる。

$$f = (m_c + p \cdot m_f) [1 - \exp(-a \cdot j)]$$

ここに、 f は履帯モデル牽引実験における単位接地面積当たりの牽引抵抗である。 m_c は粘着力項、 m_f は内部摩擦係数項、および a は変形係数項であり、いずれも剛性履帯のグラウザ構造に依存する。本実験においては、T字形履帯のグラウザピッチ高さ比が3.2の場合 f は最大値を得ることが明らかになった。

(2) 履带式車両の走行抵抗を算定するための車両の沈下量は、静的沈下量 S_0 と動的なスリップ沈下量 S_s の和で与えられ、それぞれ次式で与えられる。

$$S_0 = b_0 \cdot p^{b_1}$$

$$S_s = c_0 \cdot p^{c_1} \cdot j^{c_2}$$

ここに、係数 b_0 、 c_0 および指数 b_1 、 c_1 、 c_2 は履帯モデルに対する載荷試験と牽引試験により求まり、いずれもグラウザ構造に依存する。 S_0 はグラウザピッチが増大するほど増加する一方、 S_s は減少する傾向にある。

(3) 車両実験の結果、静・駆動力および有効制動力、有効牽引力ともスリップ率 i の増加とともに増大している。また、駆動力が制動力より小さくなるのは、接地長 D の履帯後端での履帯のスリップ量が制動状態 ($i < 0$) において $iD/(1+i)$ となるのに対し、駆動状態 ($i \geq 0$) では iD と小さく十分せん断抵抗力を發揮していないためである。

(4) 静・駆動力とも一般にグラウザピッチ $G_p = 10.2$ cm において最大値を示し、続いて $G_p = 5.1$ cm、 20.4 cm の順に低下しており、この結果は履帯モデルの牽引抵抗の大小関係と一致する。

(5) 後輪スプロケットの沈下量、すなわちわだちの深さは一般にスリップ率とともに増加するが、駆動状態での沈下量は制動状態と比較して大きい。これは、車両通過による土のスリップ量が制動状態において $-iD$ であるのに対し、駆動状態では $iD/(1-i)$ と増大するためにスリップ沈下量が増加したためである。

(6) 駆動状態においては、わだちの深さおよびそれより算定される締固め抵抗は $G_p = 10.2$ cm、 20.4 cm、 5.1 cm の順に増加する。そのために、駆動力より走行抵抗を差引いた有効牽引力は $G_p = 10.2$ cm において最大値をとり $G_p = 20.4$ cm、 5.1 cm の順に低下することが判明した。

(7) 制動状態においては、わだちの深さは $G_p = 5.1$ cm、 20.4 cm、 10.2 cm の順に増加するのに対し、有効制動力は $G_p = 10.2$ cm において最大となるものの G_p の影響は走行抵抗が駆動状態と比較して小さいために顕著に現われなかった。

最後に、本実験を実施するにあたりご尽力頂いた本学河原莊一郎助手、大学院生 柳楽篤司氏に厚く謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) Hata, S. and Hosoi, T. : On the effect of lug pitch upon the tractive effort about track-laying vehicles, Proc., 7th Int. Conf., ISTVS, Vol. 1, Calgary, Canada, pp. 255~262, 1981.
- 2) 畠昭治郎著：建設機械学，鹿島出版会，pp. 76~93, 1987.

- 3) Janosi, Z. and Hanamoto, B. : The analytical determination of drawbar pull as a function of slip for tracked vehicles, Proc., 1st Int. Conf. on Terrain-Vehicle Systems, Torio, 1961.
 - 4) 田村幸夫・上西正志：新型履帯装置（マルチローラ）によるけん引性能向上について，小松技報，第26巻，第3号，pp.1～7，1980.
(1988.4.23・受付)
-