

平成 28 年度 博士論文

シングルグロースシューの推進力に関する研究  
(Study on Thrust of Single Grouser Shoe for  
Tracked Vehicle)

三重大学大学院生物資源学研究科共生環境学専攻

環境情報システム工学講座

エネルギー利用工学教育研究分野

顧 楠

## 目次

第1章	諸言 .....	1
1.1	研究背景.....	1
1.1.1	エネルギー利用の課題.....	1
1.1.2	オフ・ロード車両 .....	2
1.1.3	グローサシュー.....	3
1.2	研究目的.....	4
1.2.1	先行研究の課題.....	4
1.2.2	研究概要.....	4
第2章	土の力学的特性 .....	6
2.1	土と機械の相互作用.....	6
2.1.1	クローラ車両の牽引力.....	6
2.1.2	スリップ率と推進力との関係.....	6
2.1.3	履帯接地面に作用する応力分布 .....	9
2.2	土壌のパラメータ .....	11
2.2.1	考慮すべき性質.....	11
2.2.2	貫入抵抗試験 .....	11
2.2.3	一面せん断試験.....	14
2.2.4	その他のパラメータの測定 .....	17
2.2.5	土壌パラメータのまとめ.....	17
2.2.6	フローチャート.....	18
第3章	推進力の理論解析.....	19
3.1	推進力の予測モデル.....	19
3.1.1	土壌非破壊時モデル .....	19
3.1.2	対数螺旋破壊モデル .....	23
3.1.3	せん断破壊モデル .....	25
3.1.4	3次元せん断破壊モデル.....	27
3.1.5	3次元 Mckyes-Ali モデル .....	31
3.2	グローサシュー諸元と土壌のパラメータ .....	34
3.3	3次元せん断破壊モデルによる理論解析 .....	35
3.3.1	理論値算出の過程.....	35
3.3.2	推進力の成分 .....	37
3.3.3	推進力, 転がり抵抗, 牽引力の理論値 .....	39

第4章	モデルグローサシューによる推進力測定実験.....	42
4.1	実験の目的 .....	42
4.2	実験装置.....	42
4.2.1	実験装置の概要.....	42
4.2.2	実験装置の構成.....	45
4.3	測定システムの構成とデータ収集法 .....	59
4.4	実験条件.....	62
4.4.1	実験装置及び測定機器の設定.....	62
4.4.2	実験手順.....	63
4.4.3	実験方法.....	63
第5章	測定実験の結果及び考察.....	64
5.1	実験条件.....	64
5.2	実験結果.....	66
5.2.1	データの出力結果と考察 .....	66
5.2.2	データの選択 .....	67
5.2.3	推進力の計測値.....	68
5.2.4	転がり抵抗の計測値 .....	69
5.2.5	牽引力の計測値.....	71
第6章	理論値と計測値の比較 .....	73
6.1	推進力の比較.....	73
6.2	転がり抵抗の比較 .....	73
6.3	牽引力の比較.....	79
第7章	結語 .....	80
7.1	結言 .....	80
7.2	今後の課題 .....	81
謝辞	.....	82
参考文献	.....	83
付録	.....	84

## 第1章 諸 言

### 1.1 研究背景

#### 1.1.1 エネルギー利用の課題

経済が著しく発展する現代社会では、大気中の二酸化炭素の増加による地球温暖化、窒素酸化物や硫黄酸化物による大気汚染などの環境問題が深刻である。2012 年度日本における二酸化炭素の排出量は約 12 億 7600 万トンにのぼり、間接排出量（電力消費量を電気事業者の排出分から転嫁）の割合では、産業部門（工場等）が 33%、業務その他部門（商業・サービス・事業所等）21%、運輸部門（自動車等）18%、家庭部門が 16%の順となっている<sup>(1)</sup>。

自動車業界では、燃費向上のための取り組みが盛んに行われ、乗用車の中でガソリン車の燃費は大幅に向上している。日本におけるガソリン乗用車の燃費平均値の推移は、1993 年には 12[km/L]程度であったものが 2011 年には 20[km/L]近くまで向上している<sup>(2)</sup>。燃費向上により、距離当たりの温室効果ガス排出量が削減できる他、リットル単価が上昇しているガソリン代の支出増を抑えることにもつながっている。

農業機械や建設機械などのオフ・ロード車両に関しても、乗用車と同様に石油を主な燃料にしており、排気ガスが問題となることから燃費向上の取り組みも必要不可欠である、燃費を改善した上で性能を発揮するために、車両の走行装置や機械を最適化する必要がある。

### 1.1.2 オフ・ロード車両

オフ・ロード車両は (Off-road vehicle), 山地や農地, 砂漠などの舗装されていない不整地を走行し, 作業機を装着して各種作業を行うことを目的とした車両である.

オフ・ロード車両は, 走行装置 (Running gear) によって主に車輪式車両 (Wheeled vehicle) と履带式車両 (Tracked vehicle) に大別される. 他にはセミ履带式車両, 歩行式車両などがある. 履帯はトラック (track), クローラ (crawler), キャタピラー (caterpillar) などと呼ばれるが, 学術的にはトラック, クローラである. キャタピラーも辞書においては「芋虫」や「無限軌道」で示されるが, 米国企業であるキャタピラー社 (Caterpillar Inc.) の商標が一般名詞化したものである. 建設機械の代表である油圧ショベルもユンボと呼ばれることがあるが, これもユンボ社の名称がそのままショベルの名前として使われるようになった事例である<sup>(3)</sup>.

車両の走行性能は車両自身の性能 (mobility) と地表面側の能力 (Trafficability) に左右され, 車両の走行装置である履帯やタイヤと, 地表面との相互作用に大きく影響している.

オフ・ロード車両の走行性は, 不整地を走行時に車両の走行性能及び旋回性能を十分に発揮できるように設計しなければならない. ここでは, 特にオフ・ロード車両の走行性能 (Tractive performance) について焦点を当てる. 走行性能を向上させるためには, 走行装置と地面との相互作用を力学的に解析し究明する必要がある.

オフ・ロード車両の走行性能を向上させるためには, まず車の走行装置から着手するのが一般的である. したがって, オフ・ロード車両の走行装置としてのタイヤ (Tire) と履帯 (Track) についてその構造, 材質, 形状, ラグパターン等を適切に設計する必要がある. 車両は小さいすべり率 (Slip) で最大有効牽引力 (Traction) を発揮することが求められている. これを実現するためには, 地面側の能力 (Trafficability) と車両側の能力 (Mobility) の両方を考慮しなければならない.

車両側の能力はエンジンの出力, 車両重量, 車両重心の位置, 車輪幅と直径, タイヤとレッドの形状, 履帯幅と接地長, 履帯初期張力, 制動力と駆動力の作用位置, 平均接地圧, グローサの形状, 高さ, ピッチ, 最低地上高などの車両の諸元に左右される. また, 地面側の能力は土の力学的性質を表す粘着力 (Cohesion), 内部摩擦角 (Internal friction angle), 付着力 (Adhesion), 機械-土摩擦角 (Frictional angle), 土の密度 (Density), 含水比 (Moisture content) 等によって決定される.

土と機械の相互作用に関する研究分野として, テラメカニクス (Terramechanics) がある. テラメカニクスは造語であり, テラ (terra) は土や大地, 地表を意味する “terrain” から取ったもので, メカニクスは力学を意味する “mechanics” であり, 二語を結合して「地盤と車両・機械の力学」を意味する “terranechanics” と定義している.

### 1.1.3 グローサシュー

オフ・ロード車両は、車両の一部もしくは全体にクローラ（Crawler：履帯）を巻くことで接地面積を増やし、局地的な圧力を下げて走行させることが多い。クローラは金属もしくはゴム製の板であるシュー（shoe：履板）によって構成される。クローラシューは、牽引力を増大させ、スリップせずに確実に走行できるようにするために接地面に突起が付けられていることが多く、グローサ（grouser）と呼ぶ。

グローサパターンは様々あり、図 1.1 に数種類のグローサシューを示す。グローサパターンの形状を決定するには、軟弱地や不整地において求められる走行性能を発揮することは当然であるが、排土性や走行時の振動抑制なども挙げられる。排土性とは、走行や旋回時に履帯へ土壌が付着することを防ぐ、もしくは速やかに付着した土壌を排出することである。また、走行時の振動抑制とは、走行装置で発生する振動が運転者の妨げにならないようにより心地を快適なものにすることによることである。そのためにはグローサ間隔（シューピッチ）を考慮し、グローサパターンを重ねあわせた配置にするなどの配慮が必要である。その他グローサパターンに関して考慮しなければならない点は、走行や旋回時において土壌の攪乱をできるだけ軽減できることや、履帯の摩耗を抑えることなどが考えられる。また、旋回性能を向上させるために、できる限り旋回抵抗を軽減できる構造、パターンであることも重要である。

しかし、ブルドーザなどの建設機械車両においては、シューは横一文字の鉄製シングルグローサを採用している場合が多い。高い牽引性能の発揮が求められるからである。

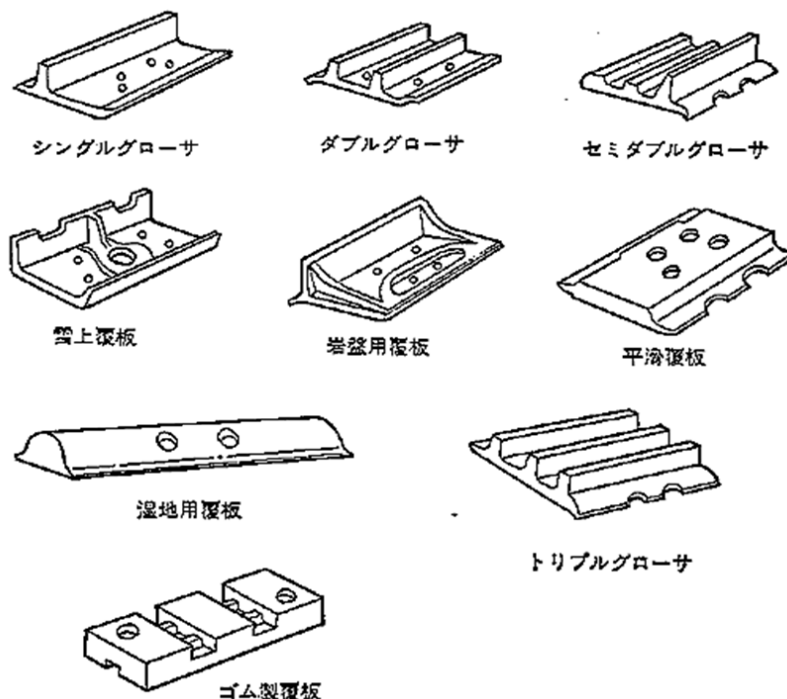


図 1.1 グローサパターンの種類

## 1.2 研究目的

### 1.2.1 先行研究の課題

クローラ車両の牽引・旋回性能の向上を考慮したグローサパターンの決定については、これまで経験的なものが多く、理論的な究明は少なかった。一方では、テラメカニクスにおいて、車両の走行装置と地面との相互作用に関する理論解析や実験研究が数多くなされている<sup>(4)(5)(6)(7)</sup>。また、履帯の走行性やグローサパターンに関する研究も多く見られる<sup>(8)(9)(10)(11)(12)</sup>。たとえば、グローサシューのピッチに対するグローサ高さの比が3-4の値を取るときに大きな牽引力が発揮できるという報告もある<sup>(13)</sup>。しかし、グローサシューの推進力に大きく影響するグローサの厚さについては考慮されていない。グローサシューピッチに対するグローサ厚さの比率をどのようにすれば大きな牽引力を発揮できるかは確認できていない。この比率は土壌条件に左右されると考えられ、代表的な土質である砂質土や粘土に対して、少なくともその範囲を知ることができれば、作業条件にあったグローサパターンや寸法を決定することができる。

### 1.2.2 研究概要

本研究では、オフ・ロード車両の走行性能に影響を与えるグローサシューの形状を検討し、グローサ厚さにも注目する。

オフ・ロード車両の履帯に作用する力は図 1.2 のようになる。ここではオフ・ロード車両に使用されている代表的なシングルグローサシュー（本研究でも用いる）について考える。接地部分の履帯に作用する荷重を  $W'$ 、発生される推進力を  $F'$  とする。一枚のグローサを取り出しグローサの諸元を次のように定める。グローサシューのピッチ:  $L$  (一定)、グローサ高さ  $h$ 、グローサ厚さのピッチに対する比率:  $\lambda$  ( $0 \leq \lambda \leq L$ )。図ではグローサに作用する荷重を  $W$ 、発生する推進力を  $F$  としている。

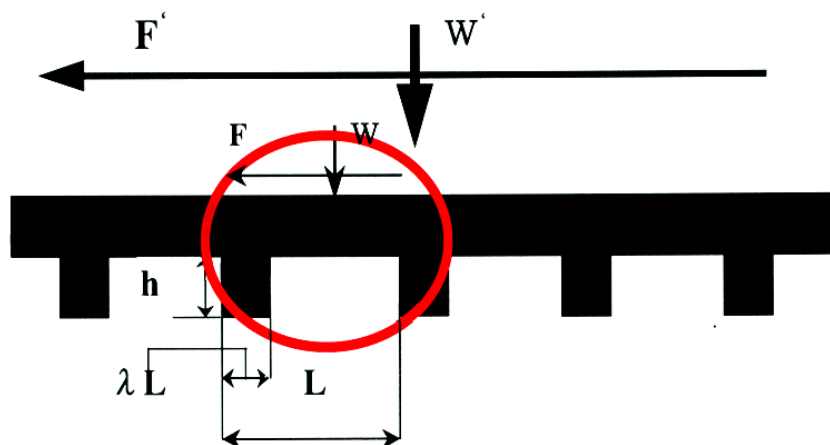


図 1.2 履帯に作用する荷重と推進力

図 1.2 から分かるように、履帯では等間隔に突起が並んでおり、図 1.1 で示されるグローサパターンが存在している。本研究ではシングルグローサシューを用いる。シングルグローサシューは高い牽引性能を有し、ブルドーザなどに使われている。構造が分かりやすいのも特徴である。シングルグローサシューに作用する力を図 1.3 に示す。

一枚のシングルグローサシューによって発生する推進力は、グローサ先端の $F_1$ 、スペーシング部の $F_2$ およびグローサ背面の $F_3$ の水平成分の和である。ここで一枚のシングルグローサシューにかかる荷重 $W$ を、グローサシューのピッチ $L$ を一定とした場合、グローサの厚さと高さによる推進力への影響を調べ、最大推進力を得るためのグローサ厚さと高さを見出すことを目的としている。荷重 $W$ は、グローサ先端面とスペーシング面およびグローサ背面に分担されるが、 $F_3$ の鉛直方向の成分は非常に小さく無視できる。グローサの厚さを変化させずに高さを増やすと、 $F_1$ が増加するが、 $F_2$ が減少するため、両者の和で示される全体の推進力を推測することはできない。グローサの厚さを増やした場合も同様なことである。

そのため、本研究では、グローサの厚さと高さを変えたときの推進力の変化について考慮する。グローサシューの推進力の計算方法はグローサ下の土の変形及び破壊をどのように考慮するかによって異なる。ここで、スペーシング面の下の土の変形（破壊形態）によって分類し、いくつかの予測モデルをたてる。予測モデルごとに、グローサシューピッチに対するグローサ厚さの比率 $\lambda$ 、及びグローサ高さ $h$ を変化させて推進力、転がり抵抗ならびに牽引力の理論値を導出する。また、予測モデルの妥当性を判断するために、実際のグローサシューをモデル化した実験装置を用いて測定試験を行うことによって計測値を求める。理論値と計測値を比較して、予測モデルの適合性を評価し、形状に応じた推進力の関係を明らかにすることを目的とする。

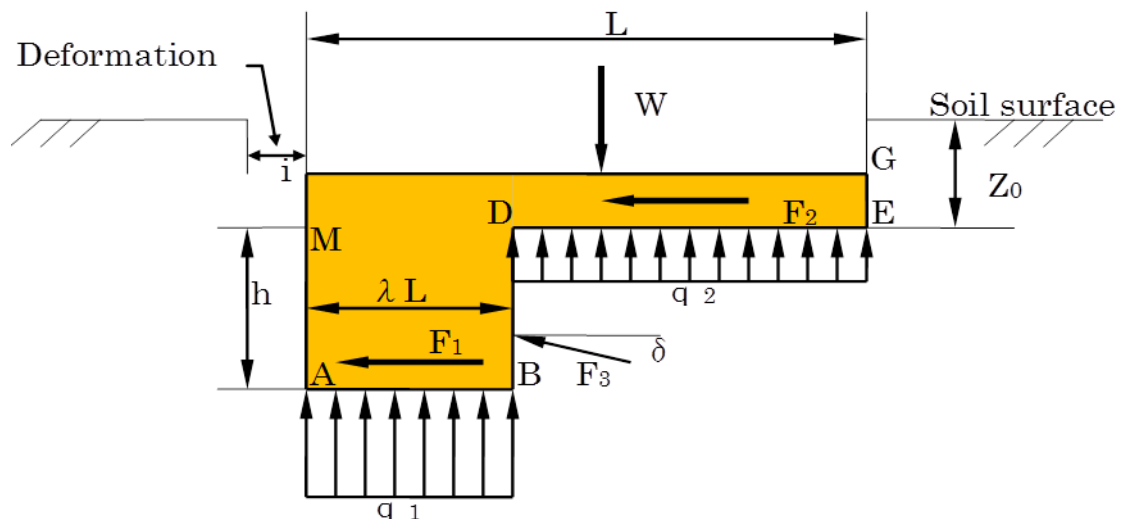


図 1.3 グローサシューの概略図



## 第2章 土壌の力学的特性

### 2.1 土と機械の相互作用

#### 2.1.1 クローラ車両の牽引力

クローラ車両は履帯が土を介して推進力を発生している。これを詳しく見てみると、図 2.1 に示すように、まず履板に下部転輪から荷重がかかると、地盤はその地耐力に応じて鉛直方向に $Z_s$ だけ沈下（静的沈下）する。さらにその履板は荷重がかかったままスプロケットにより水平方向に引き抜かれる際、その方向に滑ることによって、土から水平方向の反力すなわち推進力を受ける。それと同時にさらに $Z_j$ 沈下（滑り沈下）する。このようにして土に対してなした仕事が車両の推進力となるのであるが、その一方で履帯の沈下によって土が圧縮され走行抵抗が生じる。

クローラ車両の履帯は何枚かの履板がピンあるいはリンクによって結合されており、そのうちで転輪から荷重のかかった履板が推進力を発揮する。したがって、これらの推進力を転輪の数だけ加え合わせれば車両全体としての推進力が求められる。

車両の牽引力（Drawbar pull, 正確には有効牽引力）は、車両の駆動力から走行抵抗を引いた値として定義されており、本研究ではグローサシューの推進力から沈下量と土パラメータより算出した転がり抵抗を引くことにより求められる。本論文において、式で表現する際は推進力を  $F$ 、転がり抵抗を  $R$ 、牽引力を  $P$  とする。

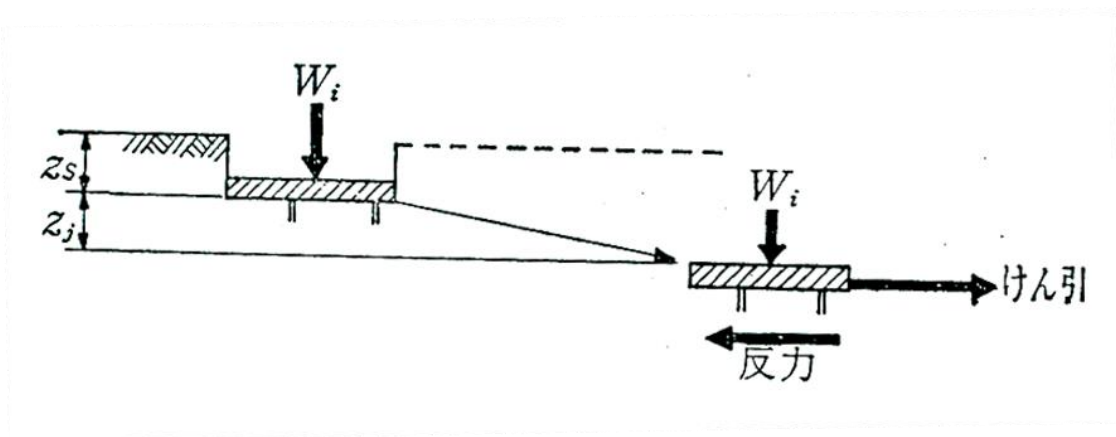


図 2.1 履板の牽引力発生の様式図<sup>(14)</sup>

#### 2.1.2 スリップ率と推進力との関係

クローラ車両の推進力は履帯の下面において、それぞれのグローサシューとグローサシューの間に確保された土壌の破壊に対する抵抗力並びに、グローサシュー側面及び底面の土壌と機械（金属あるいはゴム）せん断抵抗力を足し合わせたもので表される（図 2.2）。

したがってグローサ間の土がいかなる破壊面でせん断されるか、さらにそのときの滑り量（変位量）とせん断抵抗との関係を明らかにすることが重要である。

土がせん断破壊される場合のせん断抵抗力は、一般的にクーロンの式(2.1)を用いて表され、グローサシューと土との相互作用で発生される推進力となる。しかしながら、これは最大せん断応力であり任意の滑り量  $i$  に対するせん断応力  $\tau$  はクーロンの式を用いて次のように表せる。

$$\tau = \tau_{\max} f(i) = (c + p \tan \phi) f(i) \quad (2.1)$$

ここに  $f(i)$  は  $f(0) = 0$ ,  $f(im) = 1$  の2点で特性づけられる関数である。 $im$  は  $\tau$  が最大地に達する滑り量であり最適滑り量とよぶことにする。

$f(i)$  の関数形は図 2.3 に示す2つの形に大別することができる。A 線は一般にゆるい砂や締め固めた砂質土の場合に多く見られ、B 線は粘性土、例えばローム質土、農耕土などに見られるものである。しかし、滑りの挙動は同じ土であっても密度の偏りがあるなど状態によって異なり、一義的に土質によって分類することは難しい。

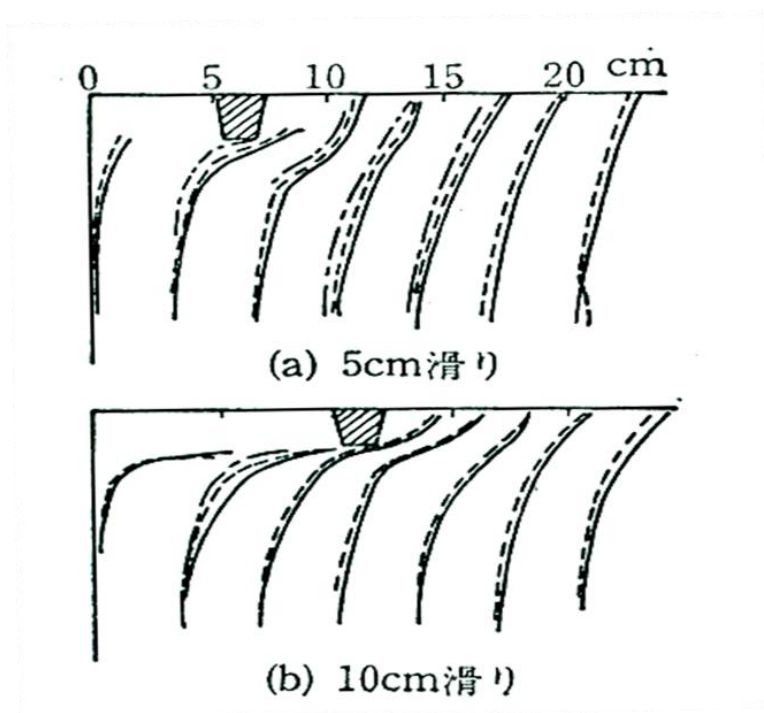


図 2.2 グローサによる土のせん断<sup>(15)</sup>

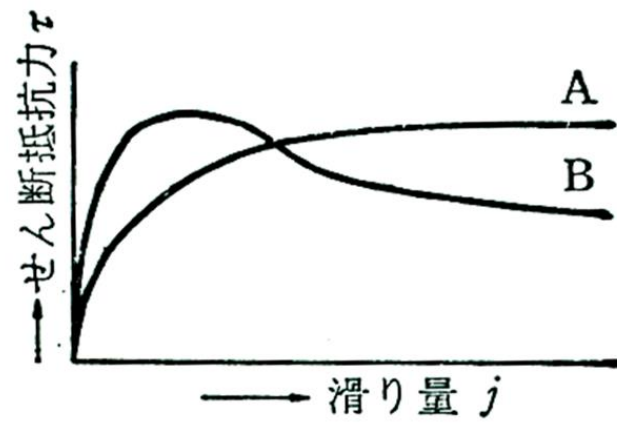


図 2.3 せん断応力 $\tau$ と滑り量 $i$ との関係<sup>[15]</sup>

### 2.1.3 履帯接地面に作用する応力分布

Guskov<sup>(16)</sup>は履帯の推進力を算定するために、図 2.4 に示すような仮定を設定した。すなわち、履帯接地面の接地圧分布 $q_x$ を台形状とし、履帯の一点と静止している地面との相対変位 $\delta_x$ は滑り率によって定まり、次式で示すように接地前端のゼロから後端の $\delta_L$ まで直線的に増加する。

$$\delta_x = ix \quad (2.2)$$

ここで、履帯に接している土が履帯とともに動き、この土と下層の静止している土との間にせん断作用が起こることを仮定すれば、その結果発生するせん断応力を積分すれば履帯の前進力が得られる。すなわち、

$$H = \int_0^{2h} \int_0^L \tau(q_x \delta_x) dx db \quad (2.3)$$

L:履帯長, b:履帯幅

実際の履帯下の接地圧分布はローラの間隔、履帯張力の影響を受け、たとえば図 2.5 のようになる<sup>(17)</sup>。ローラが少ない場合、ローラ間の履帯の接地圧は低くなり、ほとんどゼロに近いところもある。

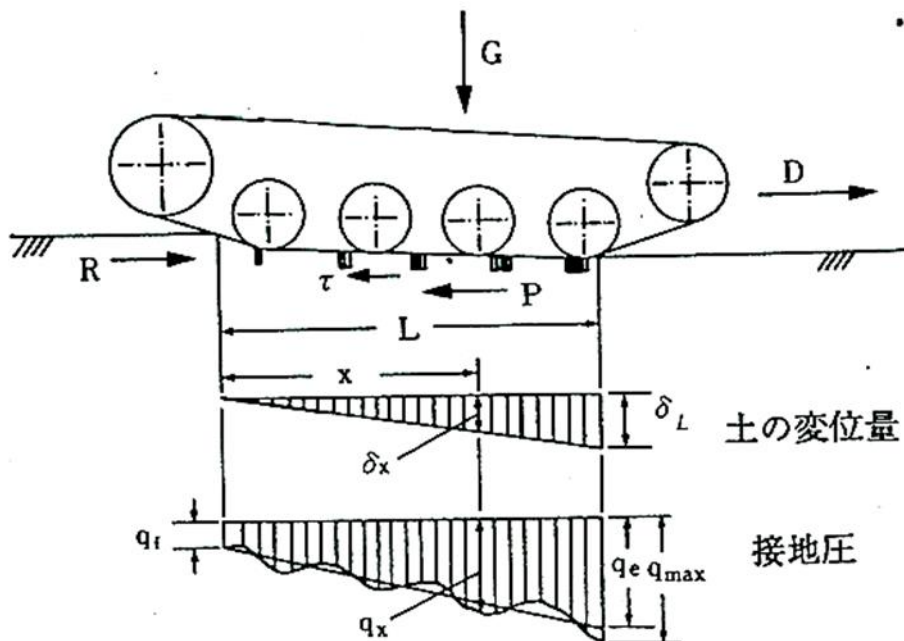


図 2.4 履帯に作用する接地圧分布<sup>(18)</sup>

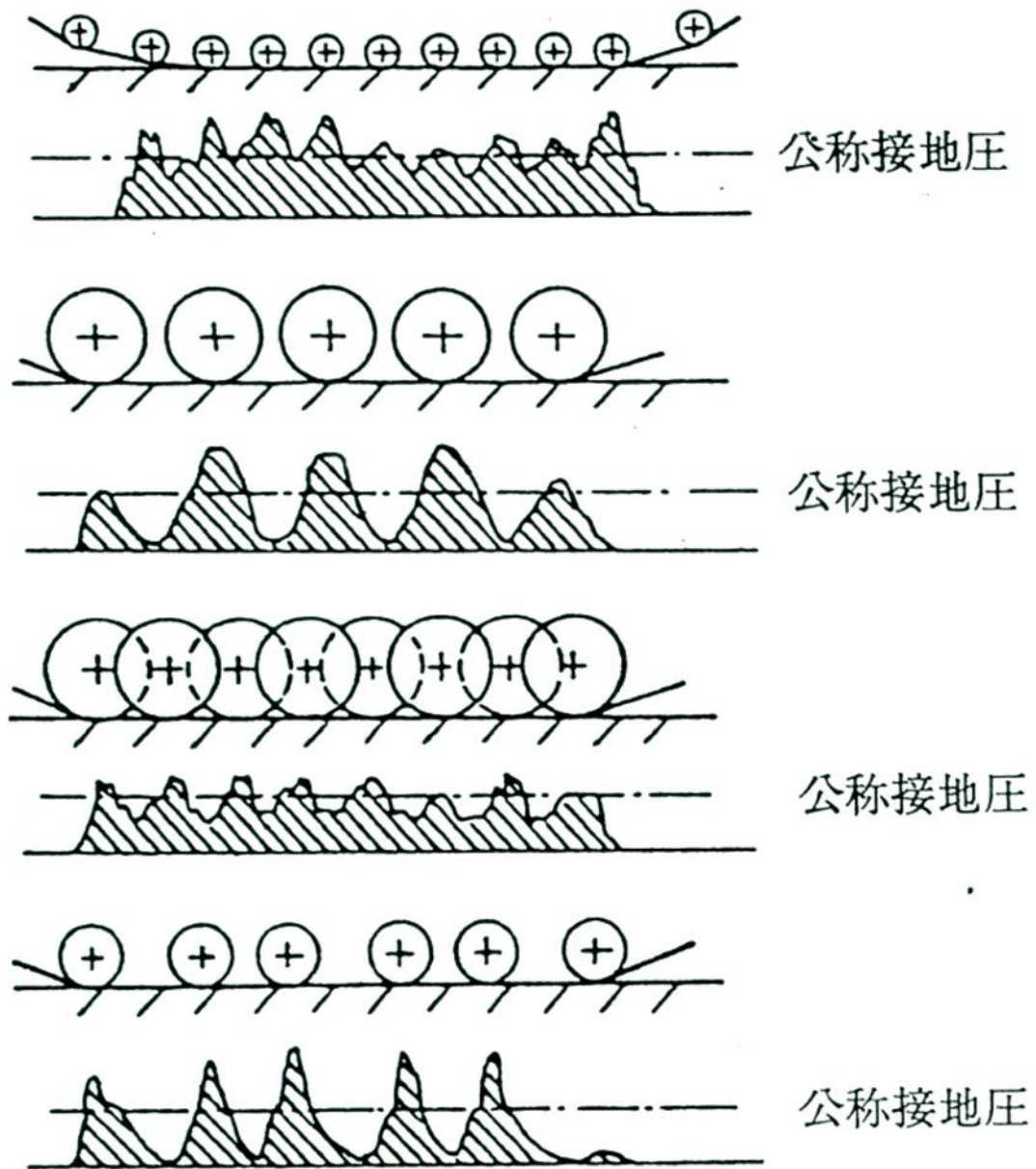


図 2.5 種々の履帯下の接地圧分布<sup>[18]</sup>

## 2.2 土壌のパラメータ

### 2.2.1 考慮すべき性質

土の力学的パラメータは多く、含水比(d.b)、粘着力(C)、内部摩擦角( $\phi$ )、付着力(Ca)、土一物体摩擦角(外部摩擦角( $\delta$ ))等がある。機械への土の付着に直接影響するものと見られるのは土の付着力である。土の他の物体への付着力は土自身の粘着力と内部摩擦角に大きく関係している。土の粘着力と内部摩擦角は土粒子間の吸引力と摩擦力を表すのに対し、他の物体への付着力と土一物体摩擦角は土と他の物質との吸引力と摩擦力を表す。土の粘着力は土性や含水比によって変化するが、付着力は粘着力と接触面の状態に大きく影響される。粘着力、内部摩擦角、付着力、土一物体摩擦角は一面せん断試験によって求められる。本試験で使用した土壌は一般土壌（砂壤土）である。三重大大学の実験圃場の土を採取し、ふるいにかけて粒径 2.0mm 以下の土を使用した。

### 2.2.2 貫入抵抗試験

土の上に平板を置いてこれに載荷したとき、接地面の圧力  $P$  と板の沈下量  $Z$  との関係が一般に

$$P = kZ^n \quad (2.4)$$

で表される。式(2.4)を両対数グラフで示すと切片の長さが  $k$ 、勾配  $n$  の直線になる<sup>(19)</sup>。ここで、 $n$  は土の性質による指数で、軟弱な土では小さく、硬い土では大きくなる（1 より大きいか小さいかが判断基準になることが多い）。式では載荷板とは無関係なものになるが、実際には  $k$  は載荷板の大きさに影響を受けるので、Bekker は  $K_c$ ,  $K_\phi$  の 2 個の係数を用いて以下の式で表した<sup>(20)</sup>。

$$P = \left( \frac{k_c}{B} + k_\phi \right) Z_0^n \quad (2.5)$$

b: 載荷板の小さい方の幅

$K_c$ ,  $K_\phi$  および  $n$  は土壌定数(soil values)と名づけられ、圧縮作用を受けた時の土の強さを示す値として種々の車両性能を示す式に導入されている。この Bekker の係数を測定するために、貫入抵抗試験を行った。図 2.6 のようなペネトロメータに平板を取り付けて土壌に載荷した。平板の寸法は表 2.1 に示す。沈下量と接地圧のデータから両対数グラフを描き、最小二乗法により一次式に回帰すると  $\ln K$  が切片、 $n$  が傾きを表す。測定結果を、沈下板（大）の場合を図 2.7 に、沈下板（小）の場合を図 2.8 に載せる。

表 2.1 平板の寸法

	モデル仕様	
	大	小
長さ[mm]	29.5	29.6
幅[mm]	19.65	9.5
面積[mm <sup>2</sup> ]	579.675	281.2



図 2.6 ペネトロメータ

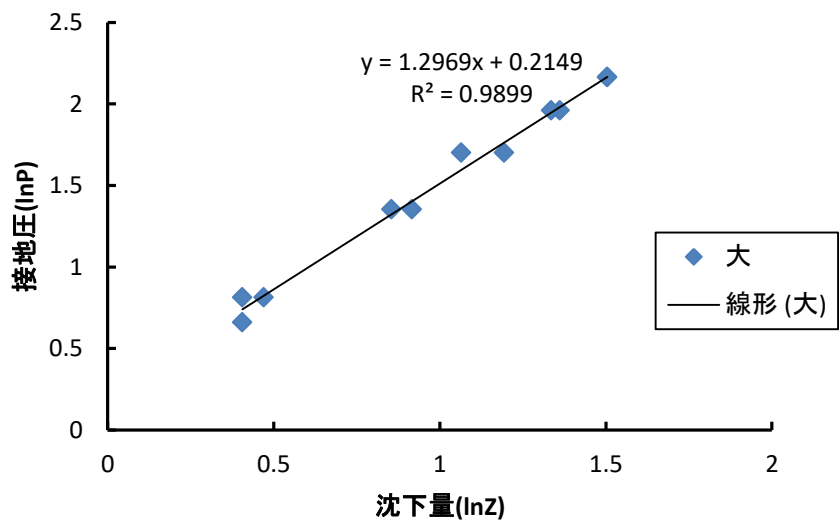


図 2.7 沈下板（大）での貫入試験の結果

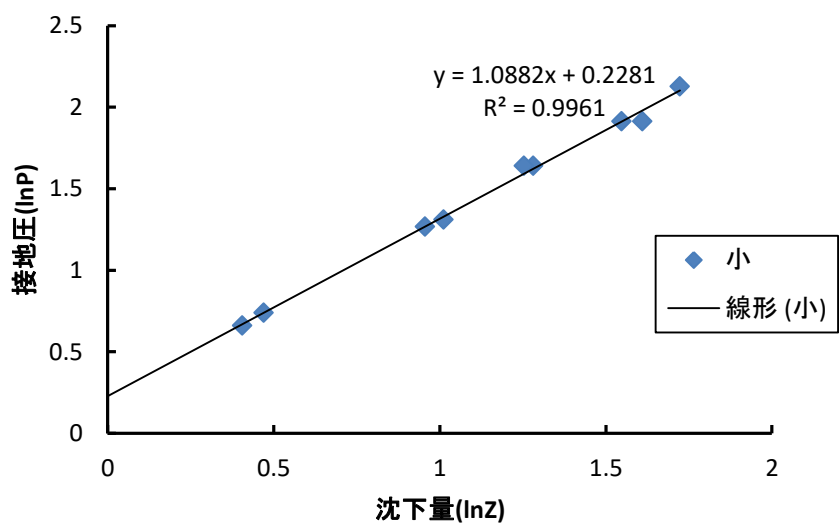


図 2.8 沈下板（小）での貫入試験の結果



### 2.2.3 一面せん断試験

せん断試験を行うことにより図 2.9 に示すような線形関係が得られる。この直線は Coulomb の破壊基準式に準じたものであり、各パラメータを決定することができる。

土のみをせん断した場合は以下の関係が成り立つ。

$$\tau = C + \sigma \tan \phi \quad (2.6)$$

$\tau$  : 土のせん断抵抗       $C$  : 土の粘着力

$\sigma$  : 垂直応力       $\phi$  : 土の内部摩擦角

また、載荷板（木材）と土のせん断においては以下の関係が成り立つ。

$$\tau = C_a + \sigma \tan \delta \quad (2.7)$$

$C_a$  : 土の付着力       $\delta$  : 土-物体摩擦角

Micklethwait は推進力を土のせん断抵抗により発生する反力と考え Coulomb の式を導入している。

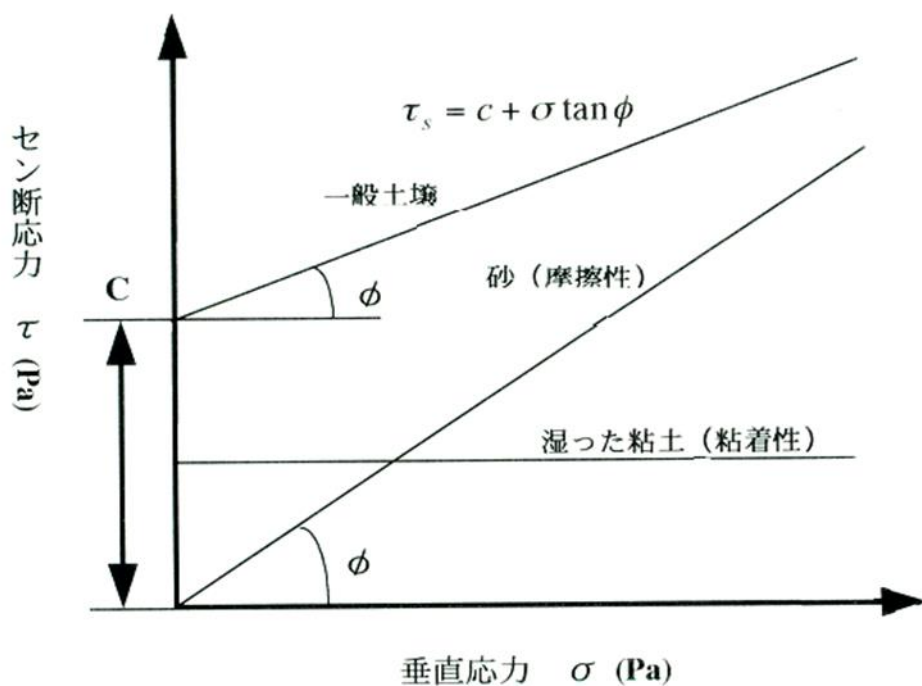


図 2.9 土壌のせん断抵抗

せん断試験を行うことによって土の強度定数を得ることができる。

せん断試験の方法には、一面せん断試験（直接せん断試験）、三軸圧縮試験、一軸圧縮試験などがある。本研究では一面せん断試験を用いている。一面せん断試験機と断面図のモデルは図 2.10 に示す通りであり、せん断箱に供試体を詰めて垂直荷重をかけ、上箱は固定し、下箱を垂直に移動（本研究では速度を追求していないため 1[mm/min]で行う）させて供試体をせん断し、その際のせん断力を測定する。

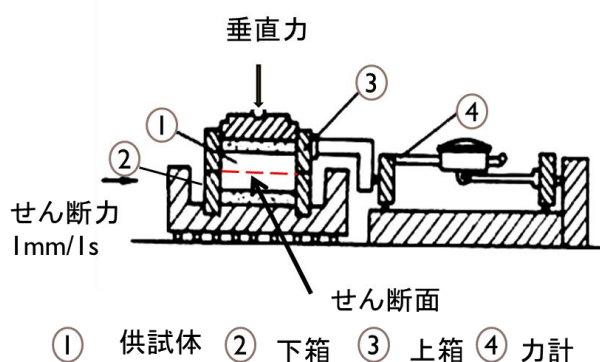
一面せん断試験は軽易にできるため実用的である。しかし、有効応力が測れない、排水の調整が難しい、繰り返した場合供試体のせん断箱への詰め具合でばらつきがでる欠点がある<sup>(21)</sup>。そのため、せん断箱に入れた供試体（土）は再利用せずに破棄し、毎回新しい供試体を投入する。

垂直荷重は幾通りかをかけ、それぞれの垂直応力とせん断応力を求め、座標系にプロットする。これらのデータについて最小二乗法を用いて一次式に回帰すると、土同士の場合は縦軸の切片が粘着力 $C$ 、傾きが内部摩擦角 $\Phi$ の正接として得られ、土と物体の場合は切片が付着力 $C_a$ 、傾きが土-物体摩擦角 $\delta$ （外部摩擦角）の正接として得られる。

試験結果は土同士の場合は図 2.11、土と物体の場合は図 2.12 に示す。ここでの物体は円形の木板である。



図 2.10



在来型一面せん断試験機と断面モデル

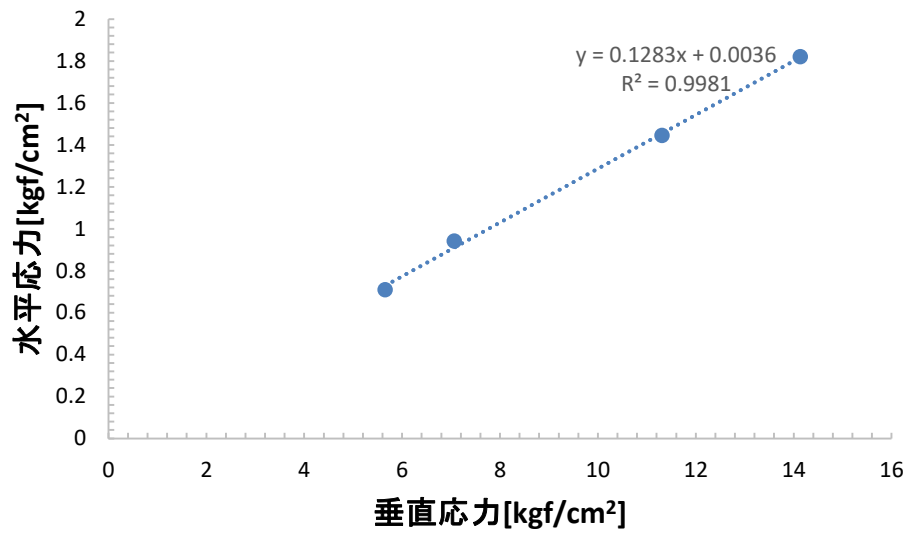


図 2.11 土—土 せん断試験結果

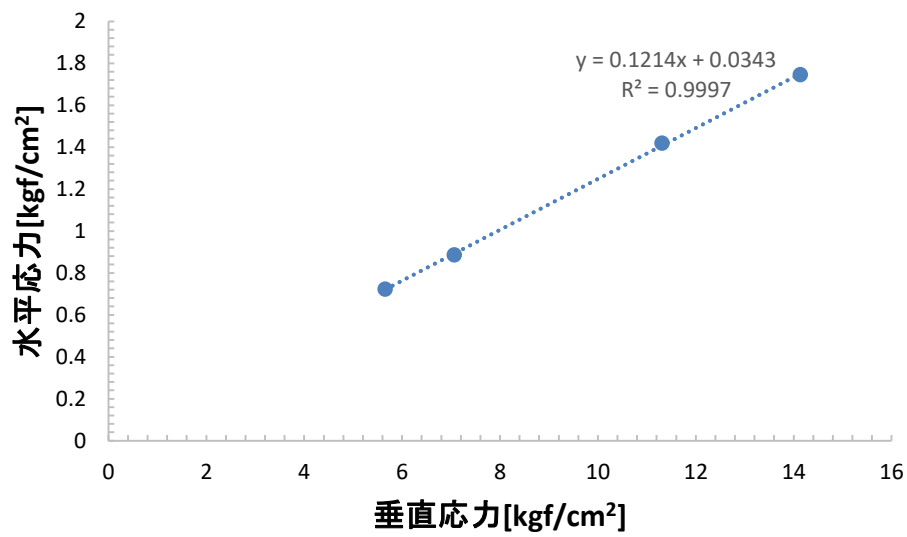


図 2.12 土—木材 せん断試験結果

### 2.2.4 その他のパラメータの測定

供試土壌のサンプルを取って、重量を計り、乾燥機に入れて乾燥させ、乾燥後の質量を電子スケールで測定した。この2値の差が水分量であり、これを容器の重さで差し引いた乾燥後の質量で割って含水比  $W(d,b)$  を求めた。乾燥方法は、電気乾燥機を用いて  $110^{\circ}\text{C}$  で24時間以上乾燥させた。

密度については、円筒の容器に供試土壌を入れ、その土壌の重量を計り円筒容器の体積  $\pi \times 5.0^2 \times 5.0 / 4 (\text{cm}^3)$  で割ることで求めた。

### 2.2.5 土壌パラメータのまとめ

供試土壌のパラメータは以下の表 2.2 にまとめる。これらの土壌を理論解析ならびに推進力測定実験で用いる。

表 2.2 供試土壌のパラメータ まとめ

Test soil	Sand	Sandy Loam
Moisture content(d.b), %	0.23	13.01
Density ( $\gamma$ ), $\text{kg/m}^3$	$1.51 \times 10^3$	$1.09 \times 10^3$
Cohesion ( $C$ ), kPa	1.06	2.43
Internal friction angle ( $\phi$ ), degree	32.71	20.2
Adhesion ( $C_a$ ), kPa	1.01	1.94
External friction angle ( $\delta$ ), degree	28.51	19.6
Exponent of sinkage ( $n$ )	1.238	0.23
Modulus of Bekker's Equation ( $k_c$ )	0.006	0.024
Modulus of Bekker's Equation ( $k_\phi$ )	0.647	0.20

### 2.2.6 フローチャート

多数の土壌パラメータを得るために様々な実験が必要である。実験から取得できるパラメータについて、簡単なフローチャートを図 2.13 に示す。

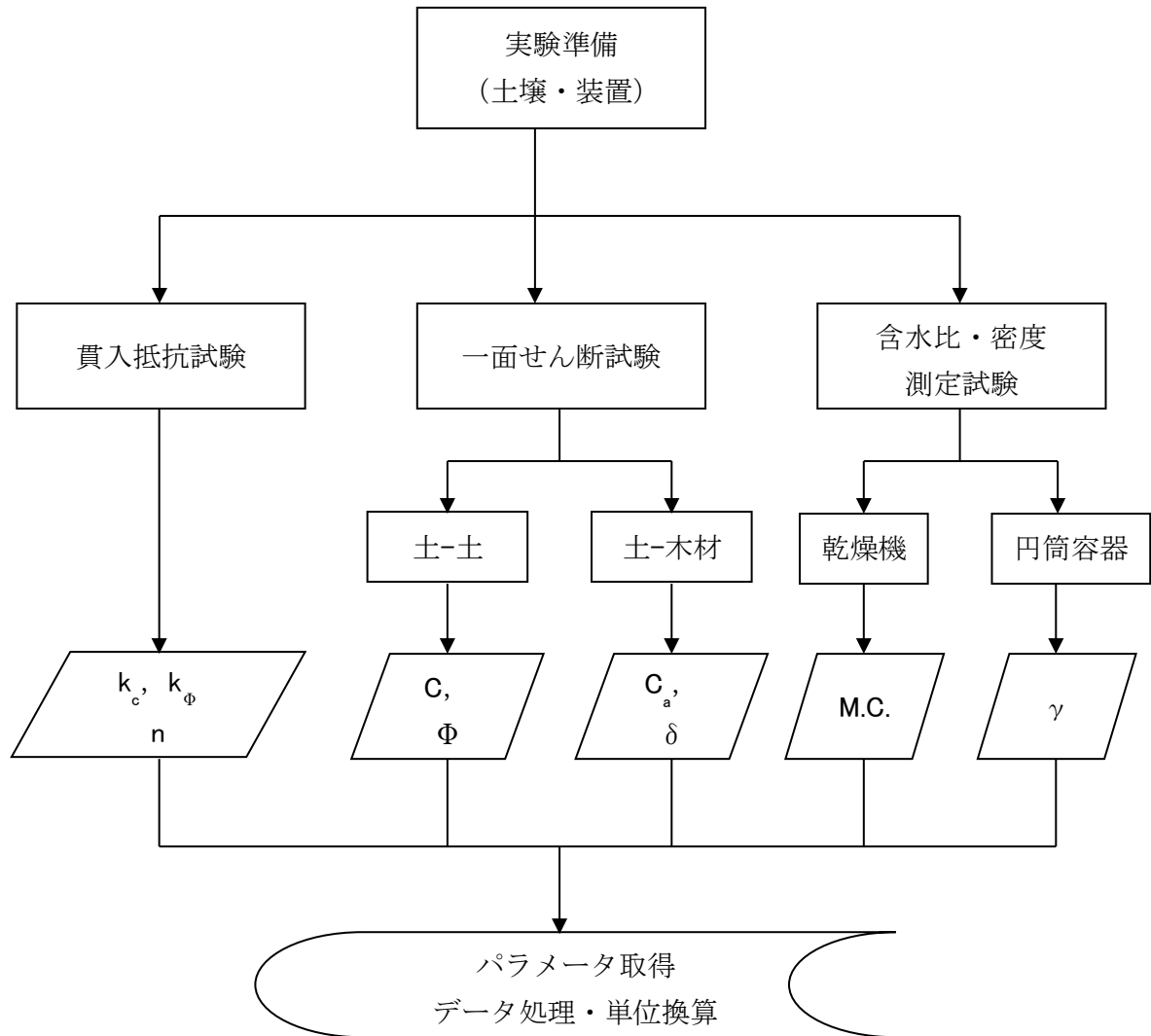


図 2.13 実験過程のフローチャート

### 第3章 推進力の理論解析

### 3.1 推進力の予測モデル

### 3.1.1 土壌非破壊時モデル

(1) グローサ前面に作用する土の反力を考慮しない場合

一枚のグローサシューを取り出してグローサ先端～スペーシング 1 組に作用する力を図 3.1 に示す. 車両の重量が一定の場合, 一枚のグローサシューに載荷する荷重を  $W$  とする. この荷重  $W$  がグローサ先端面 (AB 面) とスペーシング面 (DE 面) に分担される (BD 面と AM 面に作用する垂直方向の反力は AB 面と DE 面に比べてかなり小さいと考えられ, ここで考慮しないことにする). そこで, ある土壌条件に対し, AB 面と DE 面に作用する圧力  $q_1$  と  $q_2$  は如何なる関係であれば, 最大牽引力を発揮することができるかを追究したい. すなわち, グローサの高さ  $h$  と, グローサ厚さのグローサピッチ  $L$  に対する比率  $\lambda$  をどのくらいにすれば牽引力が最大となるかということである. グローサの高さ  $h$  を増すと  $q_1$  が増えて  $F_1$  が大きくなると同時に  $W$  が一定であるので,  $q_2$  が減少し,  $F_2$  は小さくなる. 推進力  $F$  は  $F = F_1 + F_2$  であるので, どう変わるかに注目する.

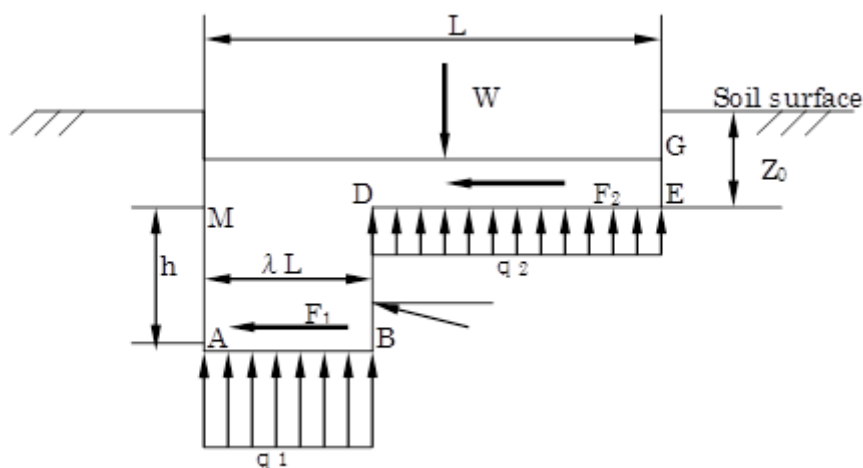


図 3.1 グローサシユーに作用する力

まず、グローサシューのパラメータ( $\lambda$ ,  $h$ ,  $L$ ),  $q_1$ ,  $q_2$ および  $W$  との関係を導出する. ここで、グローサシューの長さ  $L$ (ピッチ)を一定としグローサ厚さを  $\lambda L(0 \leq \lambda \leq 1)$  とする. したがって、グローサシューに作用する垂直方向の土の反力は荷重  $W$  と釣り合い、次式で表わされる.

$$W = q_1 \lambda B + q_2 (1 - \lambda) LB \quad (3.1)$$

B: グローサ幅

また、スペーシング部の沈下量を $Z_0$ 、グローサ高さを $h$ とする。Bekker の圧力～沈下量式により、グローサの先端面(AB 面)とスペーシング面(DE 面)に作用する土の反力はそれぞれ次式で表わされる。

$$q_1 = \left( \frac{k_c}{B} + k_\phi \right) (h + Z_0)^n \quad (3.2)$$

$$q_2 = \left( \frac{k_c}{B} + k_\phi \right) Z_0^n \quad (3.3)$$

$k_c$ 、 $k_\phi$ 及び $n$ はBekkerの土壌定数である。

式(3.2)と式(3.3)を式(3.1)に代入すると、次式となる。

$$W = \left( \frac{k_c}{B} + k_\phi \right) BL \{ (h + Z_0)^n \lambda + Z_0^n (1 - \lambda) \} \quad (3.4)$$

実験では荷重が決まっている（本実験では錘による調整で 25kg に設定）ため、式(3.4)は沈下量 $Z_0$ を求めるために用いている。直接導出するのは困難なため二分法を用いて計算する<sup>(22)</sup>。

次に推進力について考えてみる。推進力はグローサ先端部(AB 面)、スペーシング面(DE 面)とそれぞれ接している土の付着力と摩擦および変位によるものであると仮定する。スペーシング下の土が破壊されないものとする。推進力  $F$  はグローサ先端部に作用する円とスペーシング部に作用する $F_1$ とスペーシング部に作用する $F_2$ の和であり、

$$\begin{aligned} F &= F_1 + F_2 \\ &= \lambda BL \tau + (1 - \lambda) BL \tau \end{aligned} \quad (3.5)$$

土のせん断挙動は次第にピーク値へ漸近するため、Janosi, Hamamoto らの式<sup>(23)</sup>を適用すれば、

$$\tau = \tau_{\max} (1 - e^{-i/k}) = (C_a + \sigma \tan \delta) (1 - e^{-i/k}) \quad (3.6)$$

$C_a$  : 土の付着力       $\delta$  : 土の摩擦角

$i$  : 変位量       $k$  : 土壌定数

よって、

$$\begin{aligned} F &= F_1 + F_2 \\ &= \lambda BL (C_a + q_1 \tan \delta) (1 - e^{-i/k}) + (1 - \lambda) BL (C_a + q_2 \tan \delta) (1 - e^{-j/k}) \end{aligned} \quad (3.7)$$

式(3.2)ならびに式(3.3)を式(3.7)に代入し整理すると次式となる。

$$F = BL[C_a + (k_c/B + k_\phi)\{(h + Z_0)^n \lambda + Z_0^n(1 - \lambda)\} \tan \delta](1 - e^{-j/k}) \quad (3.8)$$

また、式(3.8)より

$$\frac{W}{(k_c/B + k_\phi)BL} = \lambda(h + Z_0)^n + Z_0^n(1 - \lambda) \quad (3.9)$$

が得られる．式(3.6)を式(3.5)に代入すれば、次式となる．

$$F = (BLC_a + W \tan \delta)(1 - e^{-j/k}) \quad (3.10)$$

式(3.10)から分かるように、グローサ先端部とスペーシング部に作用する土の反力だけを考慮する場合、グローサ高さやグローサ厚さの比率( $\lambda$  値の大きさ)と関係なく、グローサシューの全体の長さや幅によるものであることがわかる．一方、転がり抵抗は土の圧縮によるもので、土中に轍（わだち）を作るためになされる仕事から求められる．一枚のグローサシューによる土の圧縮になされる仕事 $Q$ は次式で表される．

$$Q = RL = \lambda BL \int_0^{z_0+h} p_1 dZ + (1 - \lambda)BL \int_0^{z_0} p_2 dZ \quad (3.11)$$

式(3.11)からグローサシューの転がり抵抗  $R$  は

$$\begin{aligned} R &= \lambda B \int_0^{z_0+h} p_1 dZ + (1 - \lambda)B \int_0^{z_0} p_2 dZ \\ &= \lambda B \int_0^{z_0+h} (k_c/B + k_\phi) Z^n dZ + (1 - \lambda)B \int_0^{z_0} (k_c/B + k_\phi) Z^n dZ \end{aligned} \quad (3.12)$$

となる．これを整理すると、グローサシューの転がり抵抗 $R$ は次式となる．

$$R = \frac{k_c + Bk_\phi}{n+1} \left\{ \lambda(z_0 + h)^{(n+1)} + (1 - \lambda)z_0^{(n+1)} \right\} \quad (3.13)$$

したがって、グローサシューの牽引力  $P$  は式(3.10)より式(3.13)を差し引いたものとなり、次式で表される．

$$P = F - R \quad (3.14)$$

ここで、グローサシューの長さや幅を一定としているので、グローサの厚さとグローサの高さが推進力に影響を及ぼさないが、転がり抵抗が牽引力に影響を及ぼすことになる．式(3.14)より最大牽引力を得るためには、転がり抵抗が最小になるようなグローサ厚さ比率  $\lambda$  とグローサ高さ  $h$  を求めればよい．



## (2) グローサ全面に作用する土の反力を考慮する場合

車両が走行するとき、履帯が走行路面に対し滑りを生ずる。したがって、スペーシング下の土が垂直方向に圧縮されると同時にグローサ前面(BD 面)に押されて変形しその変形に伴う土の反力も生ずる。図 3.2 にグローサ前面に作用する土の反力を考慮する場合の状態を示す。垂直方向の釣り合い式と推進力はそれぞれ次式で表わされる。

$$W = \left( \frac{k_c}{B} + k_\phi \right) BL \{ (h + Z_0)^n \lambda + Z_0^n (1 - \lambda) \} + F_3 \sin \delta \quad (3.15)$$

$$F = F_1 + F_2 + F_3 \cos \delta$$

$$= \lambda BL \{ (C_a + q_1 \tan \delta) + (1 - \lambda) BL (C_a + q_2 \tan \delta) \} (1 - e^{-i/k}) + F_3 \cos \delta$$

$$= BL \left[ C_a + \left( \frac{k_c}{B} + k_\phi \right) \{ (h + Z_0)^n \lambda + Z_0^n (1 - \lambda) \} \tan \delta \right] (1 - e^{-i/k}) + F_3 \cos \delta \quad (3.16)$$

式(3.15)の中で、 $\delta$ はグローサ前面と土との摩擦角であり、かなり小さいと見なされるので  $F_3 \sin \delta$  を無視すると、式(3.15)を式(3.16)に代入して次式となる。

$$F = (BLC_a + W \tan \delta) (1 - e^{-i/k}) + F_3 \cos \delta \quad (3.17)$$

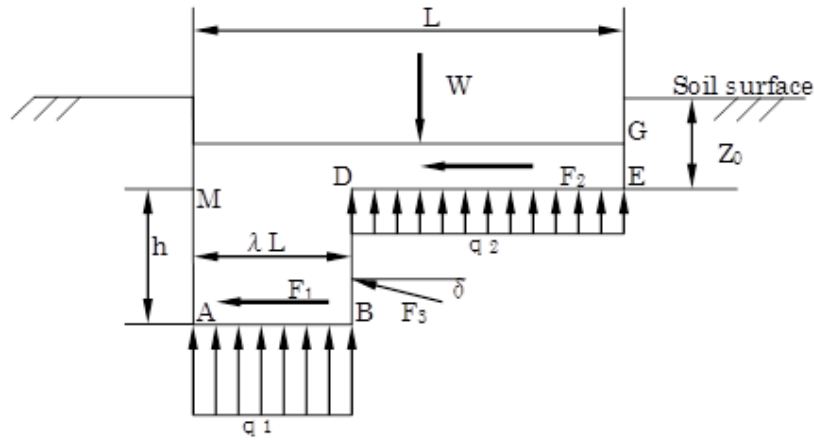


図 3.2 グローサシュエに作用する力

ただしスペーシング下の土が破壊されていないため、破壊理論による推進力の計算はできない。式(3.16)の中で、 $F_3$ は土の水平方向の、変位量  $i$  の関数であると同時にグローサ高さ  $h$  と  $q_2$  の増加につれ大きくなる。

土の変位と反力との関係は相当複雑であり、推進力の予測は難しい。転がり抵抗は上述した式(3.13)で表される。牽引力は次式で表される。

$$P = F - R \quad (3.18)$$

今後、推進力と変位との関係式を導く必要がある。

## 3.1.2 対数螺旋破壊モデル

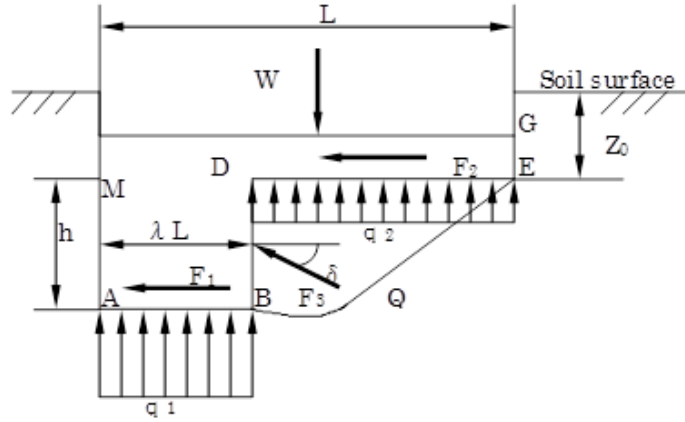


図 3.3 グローサシューに作用する力(対数螺旋破壊モデル)

図 3.3 に示すようにスペーシング下の土が対数螺旋破壊パターンで破壊された場合、土がグローサと同時に破壊線に沿って滑るので、スペーシング下の土がグローサとの間に相対運動を生じないため、スペーシングによる推進力は発生しない。この場合、推進力はグローサ先端面に作用する推進力  $F_1$  と、グローサ前面(BD 面)に作用する土の反力  $F_3$  によるものである。グローサ前面(BD 面)と土との作用はブレードによる土の切削によく似ている。よって、グローサ前面に作用する土の反力の計算には土の切削抵抗の予測法が用いられ、Reece の二次元数学モデルをグローサ前面に作用する反力の計算に適用する<sup>(24)</sup>。グローサシューに作用する力は図 3.3 で示され、グローサ前面への土の反力  $F_3$  は次式で表される。

$$F_3 = B(\gamma h^2 N_\gamma + Ch N_c + C_a h N_a + q_2 h N_q) \quad (3.19)$$

ここで、 $\gamma$  は土の密度であり、 $N_\gamma$ 、 $N_c$ 、 $N_a$ 、および  $N_q$  は降伏面の境界条件を表す無次元項の N-係数であり、土の摩擦角  $\phi$ 、土-金属の摩擦角  $\delta$  およびグローサ先端面の形状と降伏境界の関数である。

しかし、スペーシング下の変形過程を考えると、土には初めに小さい変形が発生するので、 $F_2$  が発生する。 $F_2$  は土の変位の増加につれて大きくなり、スペーシング下の土が破壊される瞬間、最大値になる。この時の  $F_3$  はスペーシング下の土が破壊される時の値である。その後、さらにグローサシューが滑ると、スペーシング下の土がスペーシングと一体となって移動するので  $F_2$  が推進力でなくなり推進力  $F$  は減少する。したがって、最大推進力はスペーシング下の土が破壊される瞬間に発生するものと考えられる。最大推進力  $F$  は、

$$\begin{aligned} F &= F_1 + F_2 + F_3 \cos \delta \\ &= \lambda BL(C_a + q_1 \tan \delta)(1 - e^{-j/k}) + (1 - \lambda)BL(C_a + q_2 \tan \delta)(1 - e^{-j/k}) \end{aligned}$$

$$+ B(\gamma h^2 N_\gamma + ChN_c + C_a hN_a + q_2 hN_q) \cos \delta \quad (3.20)$$

となる。ただし、スレーシング下の土が破壊される場合は、グローサと土との間に相当の滑り(変位量*i*)が生じると考えられ、*i* が十分大きいとみて、式(3.20)は次式のように表される。

$$\begin{aligned} F &= F_1 + F_2 + F_3 \cos \delta \\ &= \lambda BL(C_a + q_1 \tan \delta) + (1 - \lambda) BL(C_a + q_2 \tan \delta) \\ &\quad + B(\gamma h^2 N_\gamma + ChN_c + C_a hN_a + q_2 hN_q) \cos \delta \end{aligned} \quad (3.21)$$

式(3.4)を式(3.21)に代入して整理すると次式になる。

$$\begin{aligned} F &= (BLC_a + W \tan \delta) \\ &\quad + B\{\gamma h^2 N_\gamma + ChN_c + C_a hN_a + (\frac{k_c}{B} + k_\phi) hZ_0^n N_q\} \cos \delta \end{aligned} \quad (3.22)$$

式(3.22)の各項はそれぞれ土粒子重量、粘着力、付着力及び等分布荷重によってグローサ前面への反力を示している。式(3.19)の各 *N* 値はそれぞれ次式で表わされる。

$$N_r = \frac{\cos \delta + \cot \beta}{2\{\cos(\alpha + \delta) + \sin(\alpha + \delta) \cot(\beta + \phi)\}} \quad (3.23)$$

$$N_c = \frac{1 + \cot \beta \cot(\beta + \phi)}{\cos(\alpha + \delta) + \sin(\alpha + \delta) \cot(\beta + \phi)} \quad (3.24)$$

$$N_q = 2N_r \quad (3.25)$$

$$N_c = \frac{1 - \cos \alpha \cot(\beta + \phi)}{\cos(\alpha + \delta) + \sin(\alpha + \delta) \cot(\beta + \phi)} \quad (3.26)$$

$\beta(0^\circ < \beta < 90^\circ)$  は近似した破壊直線と水平線とのなす角度で、その求め方は式(3.23)の  $N_r$  を最小にする時の  $\beta$  値である。 $\alpha$  はグローサ前面(BD 面)と土表面(水平面と見なす)とのなす角度を表わす。グローサの場合は  $\alpha$  が  $90^\circ$  である。式(3.22)の推進力は式(3.4)の条件付きでのものである。式(3.22)と式(3.4)を連立して推進力を求めることができる。転がり抵抗は上述した式(3.13)で表される。牽引力は次式で表される。

$$P = F - R \quad (3.27)$$

### 3.1.3 せん断破壊モデル

スペーシング下の土が図 3.4 のようにグローサ先端面の同一平面状でせん断されるモデルについて理論式の導出を試みる.

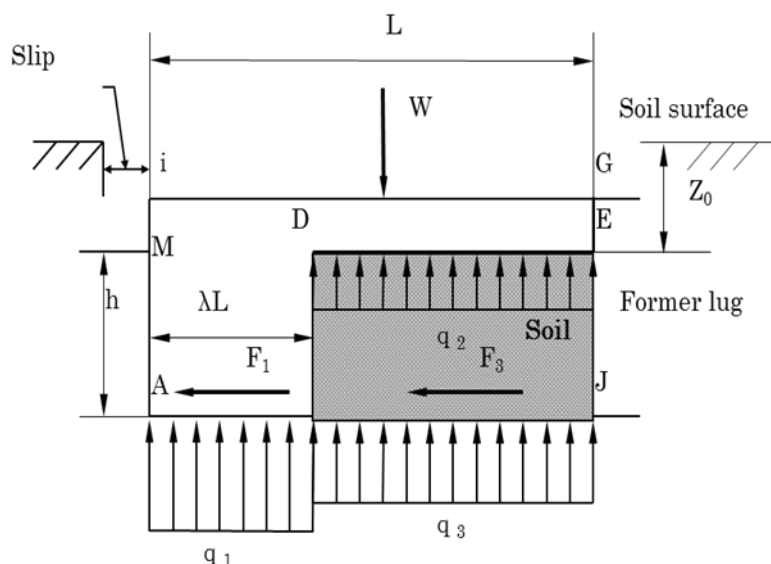


図 3.4 グローサシューに作用する力(せん断破壊モデル)

この場合の垂直方向の釣り合い式は次のようになる。

$$W = q_1 \lambda BL + q_3 LB(1 - \lambda) \quad (3.28)$$

すなわち、スペーシング下の土がグロースアッシュと一緒に移動するので、DE 面に作用する圧力  $q_2$  は内力となり、DE 面に推進力が発生しない。 $q_3$  は破壊面 BJ に作用する分布荷重である。一般に、 $q_3$  は次式で表わすことができる。

$$q_3 = \eta + q_2 \quad (3.29)$$

ここで， $\gamma$ は土の比重である．また，式(3.28)は次のようになる．

$$W = \left( \frac{k_c}{B} + k_\phi \right) BL \{ (h + Z_0)^n \lambda + Z_0^n (1 - \lambda) \} \quad (3.30)$$

推進力  $F$  は次式で表わされる.

$$F = F_1 + F_3$$

$$= \lambda LB(C_a + q_1 \tan \delta)(1 - e^{-j/\kappa}) + (1 - \lambda)BL(C + q_3 \tan \phi)(1 - e^{-j/\kappa}) \quad (3.31)$$

式(3.2), 式(3.3)および式(3.30)を式(3.31)に代入すると

$$\begin{aligned}
 F = & \lambda BL \left\{ C_a + \left( \frac{k_c}{B} + k_\phi \right) (h + Z_0)^n \tan \delta \right\} \left( 1 - e^{-j/K} \right) \\
 & + (1 - \lambda) BL \left\{ C + \gamma h + \left( \frac{k_c}{B} + k_\phi \right) Z_0^n \right\} \tan \phi \left( 1 - e^{-j/K} \right)
 \end{aligned} \tag{3.32}$$

式(3.32)と式(3.4)を連立して, 推進力  $F$  を求めることができる.

ここで, 式(3.32)を簡略化するため, 土とグロースシューとの摩擦角  $\delta$  を土の内部摩擦角  $\phi$  と等しいものとする. したがって, 式(3.32)は次式のような形となる.

$$\begin{aligned}
 F = & BL \left[ (\lambda C_a + (1 - \lambda)(C + \gamma h \tan \phi) + \left( \frac{k_c}{B} + k_\phi \right) \{ (h + Z_0)^n \lambda + Z_0^n (1 - \lambda) \} \tan \phi) \right] \\
 = & BL \{ (\lambda C_a + (1 - \lambda)C) + \{ \gamma BL(1 - \lambda)h + W \} \tan \phi \}
 \end{aligned} \tag{3.33}$$

転がり抵抗は上述した式(3.13)で表される. また牽引力は次式で表される.

$$P = F - R \tag{3.34}$$

### 3.1.4 3次元せん断破壊モデル

実際にシングルグロースシャーに働く力へのより実用的な適応を計るために三次元モデルについて解析を行った.

三次元のモデル解析ではグローサシュー側面に発生する土壌反力  $F_4$  を推進力として考慮にいたれたことが大きな特徴である。図 3.5 に示すように土壌がグローサシューに沿って壁をつくりながらせん断される場合を考える。グローサシューによって発生する推進力はグローサシュー底面、せん断面によるもののほか、グローサシューの両側面に作用する反力  $F_4$  もその一部である。グローサシュー先端面及びせん断面による推進力の予測は前述した通りなので両側面の反力  $F_4$  を導出する。

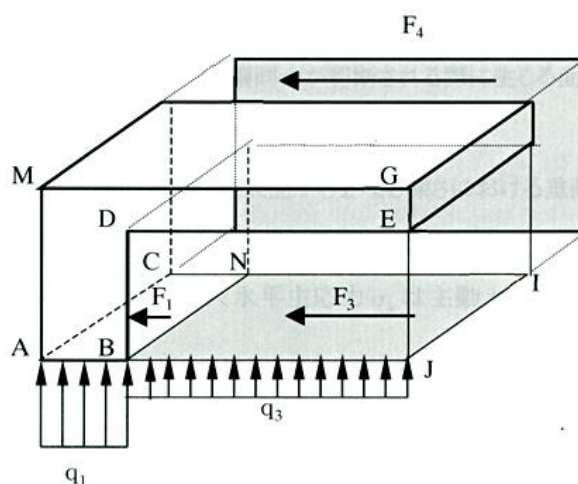


図 3.5 3次元せん断破壊モデル

図 3.6 は土壌に沈下した一組のグローサシューを横断面から見た図である. グローサシューの側面 QAJG 全体に作用する反力を面 MABD における反力 $F_{sg1}$ , 面 QMEG における反力 $F_{sg2}$ , そして土壌同士がせん断される際に生じる面 DBJE の反力 $F_{ss}$ の 3 つに分けてそれぞれについて計算式を導出した.

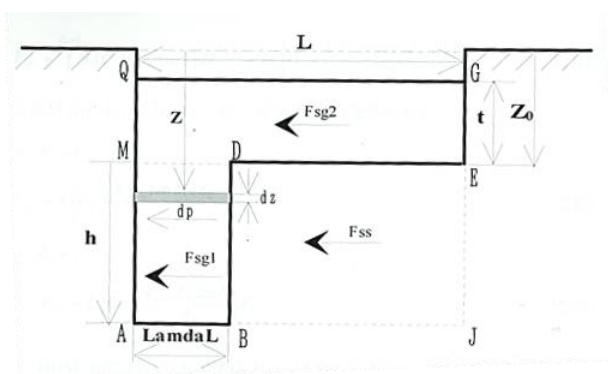


図 3.6 せん断破壊時に側面に作用する反力

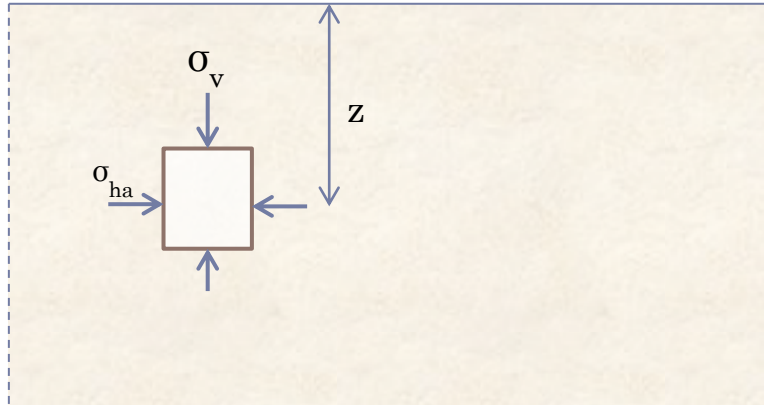


図 3.7 深さ  $Z$  における土の立方体に働く応力状態

図 3.7 で示されるような半無限に広がる土壌の水平な地表面から  $Z$  なる深さにおける垂直主応力  $\sigma_v$  は,

$\sigma_v = \gamma_t Z$  で表される.  $\gamma_t$  は土壌の単位容積重量 (比重) である.

塑性平衡状態にある土中に働く水平主応力  $\sigma_h$  は主働土圧係数  $k_a$  を用いて

$$\sigma_h = k_a \gamma_t Z \quad (3.35)$$

で与えられる<sup>(25)</sup>.

主働土圧係数  $k_a$  は, ランキン土圧の算出過程で定められる. 一面せん断試験を実施することで, せん断応力  $\tau$  と垂直応力  $\sigma$  は直線上にプロットを取ることができ, 土は直線より上に応力状態を取ることはできない. これをクーロンの破壊規準と呼ぶ. クーロンの破壊規準に, せん断応力と垂直応力の関係であるモールの応力円を当てはめると図 3.8 のように表現できる.

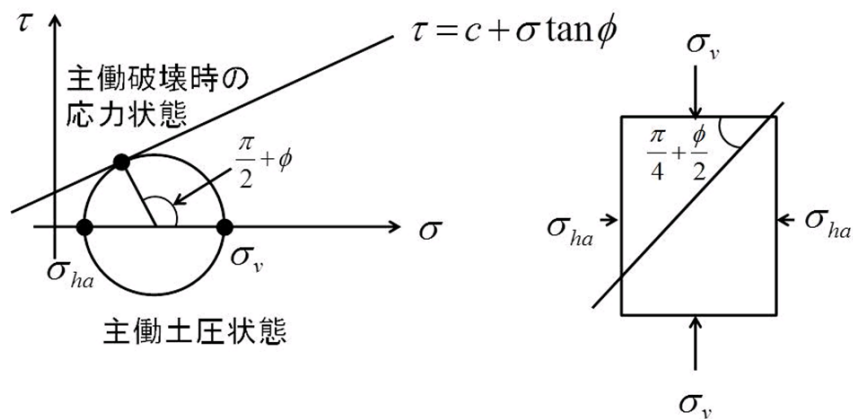


図 3.8 ランキン土圧の考え方

図 3.8 で、最大主応力 $\sigma_v$ と最小主応力 $\sigma_{ha}$ の関係式は、

$$\sigma_v - \sigma_{ha} = 2C \cos \phi + (\sigma_v + \sigma_{ha}) \sin \phi \quad (3.36)$$

と表される。

この式を整理すると、

$$\sigma_{ha} = \sigma_v \tan^2 \left( \frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2} \right) - 2C \tan \left( \frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2} \right) \quad (3.37)$$

となる、式(3.37)において、粘着力 $C$ が微小（砂質土壌の場合）であれば

$$\sigma_{ha} = \sigma_v \tan^2 \left( \frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2} \right) \quad (3.38)$$

と表せる。そして、式は次のように示される。

$$\frac{\sigma_{ha}}{\sigma_v} = \tan^2 \left( \frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2} \right) \quad (3.39)$$

式(3.39)により最大主応力と最小主応力の比が示され、これを主働土圧係数 $k_a$ と定義する。よって、 $k_a$ は次式で表される。

$$k_a = \tan^2(45^\circ - \frac{\phi}{2}) \quad (3.40)$$

$k_a$ を用いた応力関係式は、式(3.41)のようになる。

$$\sigma_{ha} = \sigma_v k_a - 2c\sqrt{k_a} \quad (3.41)$$

ただし、理論解析を行うプログラムでは、平方根を表現することで煩雑になることを避けるため、

$$k_a = \tan(45^\circ - \frac{\phi}{2}) \quad (3.42)$$

とし、必要に応じて2乗する。

また、微小高さ $dz$ で囲まれた微小面積に働く反力 $dp$ は

$$dp = \lambda L(dz)\tau = \lambda L(C_a + \sigma_h \tan \delta) dz \quad (3.43)$$

したがって、MABD 面における反力 $F_{sg1}$ は、

$$F_{sg1} = \int_{Z_0}^{Z_0+h} \lambda L(C_a + \sigma_h \tan \delta) dz = \lambda L \left\{ C_a + \frac{k_a \gamma_t \tan \delta (2Z_0 + h)}{2} \right\} h \quad (3.44)$$



QGEM 面における反力 $F_{sg2}$ はつぎの2通りの条件を考えて

$$i) \quad Z_0 \leq t$$

$$F_{sg2} = L\{C_a + \frac{k_a \gamma_t Z_0 \tan \delta}{2}\}Z_0 \quad (3.45)$$

$$ii) \quad Z_0 \geq t$$

$$F_{sg2} = L\{C_a + \frac{k_a \gamma_t \tan \delta (2Z_0 - h)}{2}\}t \quad (3.46)$$

また, DBSE 面において水平主応力  $\sigma_v'$  は DE 面にかかる内圧  $q_2$  の影響を受けて

$$\sigma_h' = k_a(q_2 + \gamma_t Z) \text{ となるから } \tau = C + \sigma_h' \tan \phi \text{ と合わせて}$$

$$\begin{aligned} F_{ss} &= \int_{Z_0}^{Z_0+h} (1-\lambda)L\{C + k_a(q_2 + \gamma_t Z) \tan \phi\}dz \\ &= (1-\lambda)L[C + k_a \tan \phi\{q_2 + \frac{\gamma_t (2Z_0 + h)}{2}\}]h \end{aligned} \quad (3.47)$$

以上より一枚のグローサシユーの側面に生じる反力 $F_4$ は $F_4 = 2(F_{sg1} + F_{sg2} + F_{ss})$

ABNC 面に $F_1$ , スペーシング下 BSIN 面に $F_3$ の推進力が発生するのでグローサシユー全体に作用する推進力は

$$\begin{aligned} F &= F_1 + F_3 + F_4 \\ &= \lambda BL(C_a + q_1 \tan \delta)(1 - e^{-j/k}) + (1-\lambda)BL(C_a + q_2 \tan \delta)(1 - e^{-j/k}) \\ &= 2L[\lambda\{C_a + \frac{k_a \gamma_t \tan \delta (2Z_0 + h)}{2}\}h + \{C_a + \frac{k_a \gamma_t Z_0 \tan \delta}{2}\}Z \\ &\quad + (1-\lambda)\{C + k_a q_2 \tan \phi + \frac{k_a \gamma_t (2Z_0 + h) \tan \phi}{2}\}h] \end{aligned} \quad (3.48)$$

転がり抵抗は上述した式(3.13), 牽引力は次式で表される.

$$P = F - R \quad (3.49)$$

### 3.1.5 3次元 Mckyes-Ali モデル

図 3.9 は 3 次元の McKeyes-Ali モデルによる破壊パターンを示している。グローサと土との相互作用はブレードによる土の切削に似ており、土の切削理論を用いてグローサの推進力を予測することができる。3 次元切削モデルとして McKeys 及び Ali モデルがよく知られており<sup>(26)</sup>、このモデルによる推進力の予測値が実験値によく一致すると報告されている。したがって、ここで、グローサシューの牽引力の予測に McKeys-Ali モデルを適用することにする。

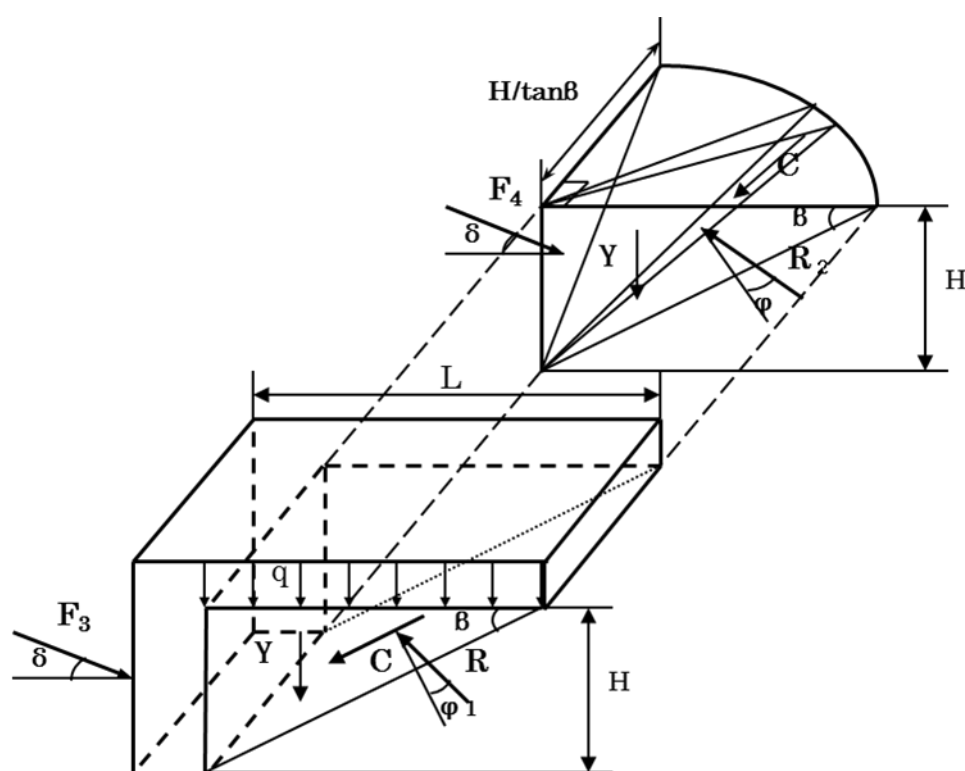


図 3.9 McKeys-Ali モデルにおける破壊形態

McKeys および Ali モデルによる推進力は次式で表される.

$$F_{34} = (\gamma H^2 N_\gamma + c H N_c + q_2 H N_q) B \quad (3.50)$$

式(3.50)の中の  $N$ -係数は,

$$N_{\gamma} = \frac{3 \tan \beta + 2H/B}{6\{\cot(\beta + \phi) - \tan \delta\} \tan^2 \beta} \quad (3.51)$$

$$N_c = \frac{\{1 + \cot \beta \cot(\beta + \phi)\}(\tan \beta + H/B)}{\{\cot(\beta + \phi) - \tan \delta\} \tan \beta} \quad (3.52)$$

$$N_q = \frac{\tan \beta + H/B}{\{\cot(\beta + \phi) - \tan \delta\} \tan^2 \beta} \quad (3.53)$$

式(3.51)における  $N_\gamma$  の最小値に対する  $\beta$  の値を求めておき、 $\beta$  の値を他の式に代入し  $N$ -係数を求める。これらの  $N$ -係数はいずれもグローサ高さ  $h$  および角度の関数で、グローサの幅  $B$ /グローサ高さ  $h$  比に影響を受ける。

しかしスペーシング下の土の変形過程を考えると、土には初めに小さい変位が発生するので、 $F_2$ が発生する。 $F_2$ は土の変位の増加につれて大きくなり、スペーシング下の土が破壊される瞬間、最大値になる。この時の $F_{34}$ はスペーシング下の土が破壊される時の値である。また、グローサ先端面に $F_1$ が作用している。その後、さらにグローサが滑ると、スペーシング下の土がスペーシングと一体となって移動するので $F_2$ が推進力でなくなり、推進力 $F$ は減少する。したがって、最大推進力はスペーシング下の土が破壊される瞬間に発生するものと考えられる。したがって、最大推進力 $F$ は

$$\begin{aligned} F &= F_1 + F_2 + F_{34} \\ &= BL(C_a + (k_c/B + k_\phi)\{\lambda(h + Z_0)^n + (1 - \lambda)Z_0^n\} \tan \delta)(1 - e^{-i/k}) \\ &\quad + (\gamma^2 N_\gamma + chN_c + q_2 h N_q)B \end{aligned} \quad (3.54)$$

となる。ただし、スペーシング下の土が破壊される場合は、グローサと土の間に相当の滑り(変位量  $i$ )が生じると思われるため、 $i$  が十分大きいとみて、式は次式のようなになる。推進力の最大値は次式で表される。

$$\begin{aligned} F &= BL \left[ C_a + (k_c/B + k_\phi)\{\lambda(h + Z_0)^n + (1 - \lambda)Z_0^n\} \tan \delta \right] \\ &\quad + (\gamma^2 N_\gamma + chN_c + q_2 h N_q)B \end{aligned} \quad (3.55)$$

ここで、スペーシング下の土の滑り線とスペーシング面との交点からグローサ前面までの距離がスペーシングの長さより小さい場合は上記の計算式でグローサシェーの推進力、転がり抵抗及びけん引力を予測することが可能であることを示している。すなわち、次式が成立するときである。

$$H / \tan \beta \leq (1 - \lambda)L \quad (3.56)$$

しかし、グローサの高さが増えるに伴い、滑り線が延びるので、スペーシング面との交点が先行のグローサを超えた場合、つまり次項の図 3.10 に示すように、実際、先行グローサがあるので、このケースが不可能である。

仮に先行グローサがないとする。グローサの高さが増えて滑り線とスペーシング面との交点が  $E_1$  とする。この場合、 $B_1E_1$  を滑り線とする McKyes モデルを用いて推進力を計算する。実際には先行グローサがあるので、滑り線が先行グローサ背面と交わり  $B_1E'$  となる。グローサシューの推進力は  $B_1E'$  を滑り線とする破壊パターンによるものである。 $B_1E'$  を滑り線とする破壊パターンによる推進力は  $B_1E'$  を滑り線とする破壊パターンによるものから、同幅で高さ  $EE'$  をブレードとし、 $E'E_1$  を滑り線とする破壊パターンによるものを差し引いたもので近似する。理論上この方法で予測した推進力はやや大きい値となる。これは McKyes モデルを用いて  $EE'E_1$  部分の推進力を計算するとき、に示す陰影部分によるものである。

したがって、 $H / \tan \beta > (1 - \lambda)L$  の場合、図 3.10 の陰影の部分  $EE'$  の高さは

$$h_s = h - (1 - \lambda)L \tan \beta \quad (3.57)$$

となり、グローサシューの推進力は次式で表される。

$$F = BL(C_a + (k_c/B + k_\phi)\{\lambda(h + Z_0)^n + (1 - \lambda)Z_0^n\} \tan \delta) + \{\gamma(h^2 - h_s^2)N_\gamma + c(h - h_s)N_c + q_2(h - h_s)N_q\}B \quad (3.58)$$

したがって、McKyes モデルによるグローサシューの推進力は式(3.55)と式(3.58)を用いて予測する。

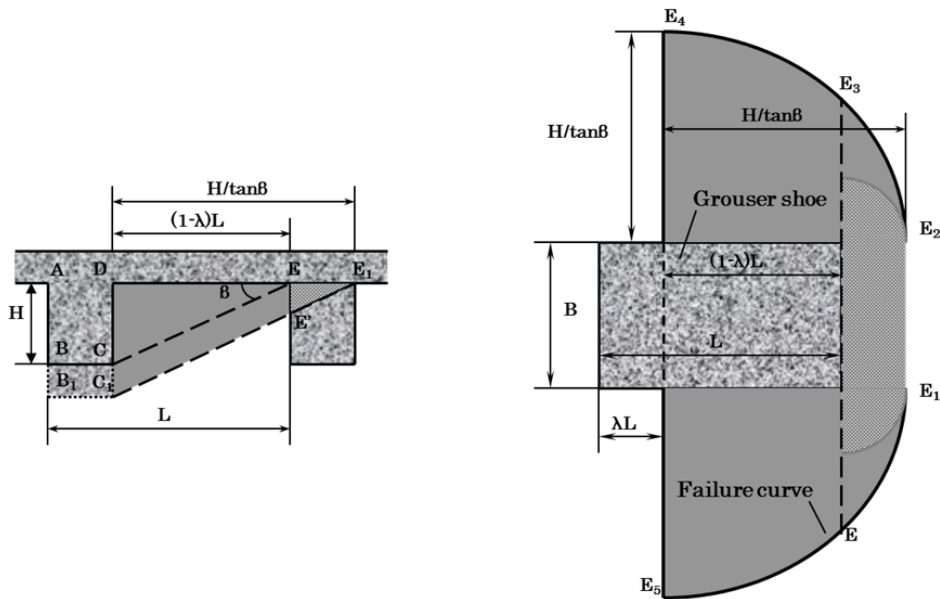


図 3.10

McKyes-Ali モデルにおけるグローサ前方面の影響

### 3.2 グローサシュー諸元と土壌のパラメータ

理論解析で用いたグローサシューの諸元と以下の表 3.1 に示す. グローサシューの諸元は実際のブルドーザなどの寸法に即して<sup>(27)(28)(29)</sup>, 比率を合わせて決定した. なお, グローサシューのグローサ厚さならびにグローサ高さは, 本研究では変化させるものであるため, ここでは数値を示さない.

表 3.1 理論解析に用いたグローサシューの諸元

シングルグローサシューの諸元	
荷重 $W$ [kg]	25
シュー幅 $B$ [mm]	150
シューピッチ $L$ [mm]	90
スペーシングの厚さ $t$ [mm]	30

土壌のパラメータを表 3.2 に再掲する.

表 3.2 供試土壌のパラメータ

Test soil	Sand	Sandy Loam
Mowasture content(d.b), %	0.23	13.01
Density ( $\gamma$ ), kg/m <sup>3</sup>	$1.51 \times 10^3$	$1.09 \times 10^3$
Cohesion ( $C$ ), kPa	1.06	2.43
Internal friction angle ( $\phi$ ), degree	32.71	20.2
Adhesion ( $C_a$ ), kPa	1.01	1.94
External friction angle ( $\delta$ ), degree	28.51	19.6
Exponent of sinkage ( $n$ )	1.238	0.23
Modulus of Bekker's Equation ( $k_c$ )	0.006	0.024
Modulus of Bekker's Equation ( $k_\phi$ )	0.647	0.20

### 3.3 3次元せん断破壊モデルによる理論解析

#### 3.3.1 理論値算出の過程

3次元せん断破壊モデルの理論にもとづき、グローサシューの推進力を予測するプログラムを C++ 上で作成し、計算を行った。図 3.16 のフローチャートに示すように、グローサシューに載荷する荷重、グローサシュー寸法、供試土壌パラメータを設定し、まずグローサ厚さ比率 $\lambda$ を  $1 > \lambda > 0$  の範囲で決定する。次にグローサ高さを変化させ、スペーシングの沈下量を算出し、推進力を計算した。沈下量が 0 となった所でプログラムを終了した。

なお、計算に用いた車両及び、土壌のパラメータは、3.2 項で述べた砂と sandy loam を用いる。 $\lambda=0.1$ における推進力成分を図 3.17, 図 3.11,  $\lambda=0.2$ における推進力成分を図 3.18, 図 3.15 で示した。

図 3.17 と図 3.12 より、グローサ厚さ比率が一定であれば、推進力 $F$ はグローサ側面の推進力 $F_4$ の影響が大きく、グローサ高さが増加すると $F$ は $F_4$ とともに増加することが分かる。また、グローサ高さが増加することでグローサ先端面の推進力 $F_1$ は増し、土のせん断面の推進力 $F_3$ は減していることが分かる。ただし、グローサ高さが 0cm のときはグローサがないと考えることができるので、 $F_3$ を定義せずにせん断面全体を $F_1$ としている。そのため、グローサ高さ  $h$  を 0 cm から 0.5 cm にした際の値は大きく異なる。グローサ高さに応じた傾向を述べる際には、0 cm から 0.5 cm (あるいは 1cm) の傾向は除外して記述する場合もある。

図 3.18 と図 3.135 より、グローサ厚さ  $\lambda$  を 0.1 から 0.2 増加させた場合は、グローサ先端面の推進力 $F_1$ が増加し、土のせん断面の推進力 $F_3$ が減少しているが、面積の変化により明らかである。また、グローサ側面の推進力 $F_4$ が減少しているが、沈下量  $Z_0$  が減少したからであると考えられる。

式(3.4)において定められたパラメータを省略した場合、

$$(h + Z_0)^n \lambda + Z_0^n (1 - \lambda) = (\text{一定}) \quad (3.59)$$

となり、高さ $h > 0$ であるため  $\lambda$ が増加したときに左辺を一定にするには  $Z_0$  を小さくしなければならない。

グローサ厚さ比率  $\lambda$  を 0.1~0.5 まで 0.1 ずつ変化させた場合の、グローサ高さ  $h$  に対する推進力の値を、図 3.22 で示した。グローサ厚さが薄いほど ( $\lambda$ が小さいほど) グローサの推進力が大きくなるが、 $\lambda=0.1$  と  $\lambda=0.2$ における推進力成分を比較した結果と同じことが  $\lambda=0.5$ までの範囲でいえるためであると考えられる。転がり抵抗ならびに牽引力の予測結果をそれぞれ図 3.23, 図 3.24, 図 3.14, 図 3.159 に示す。

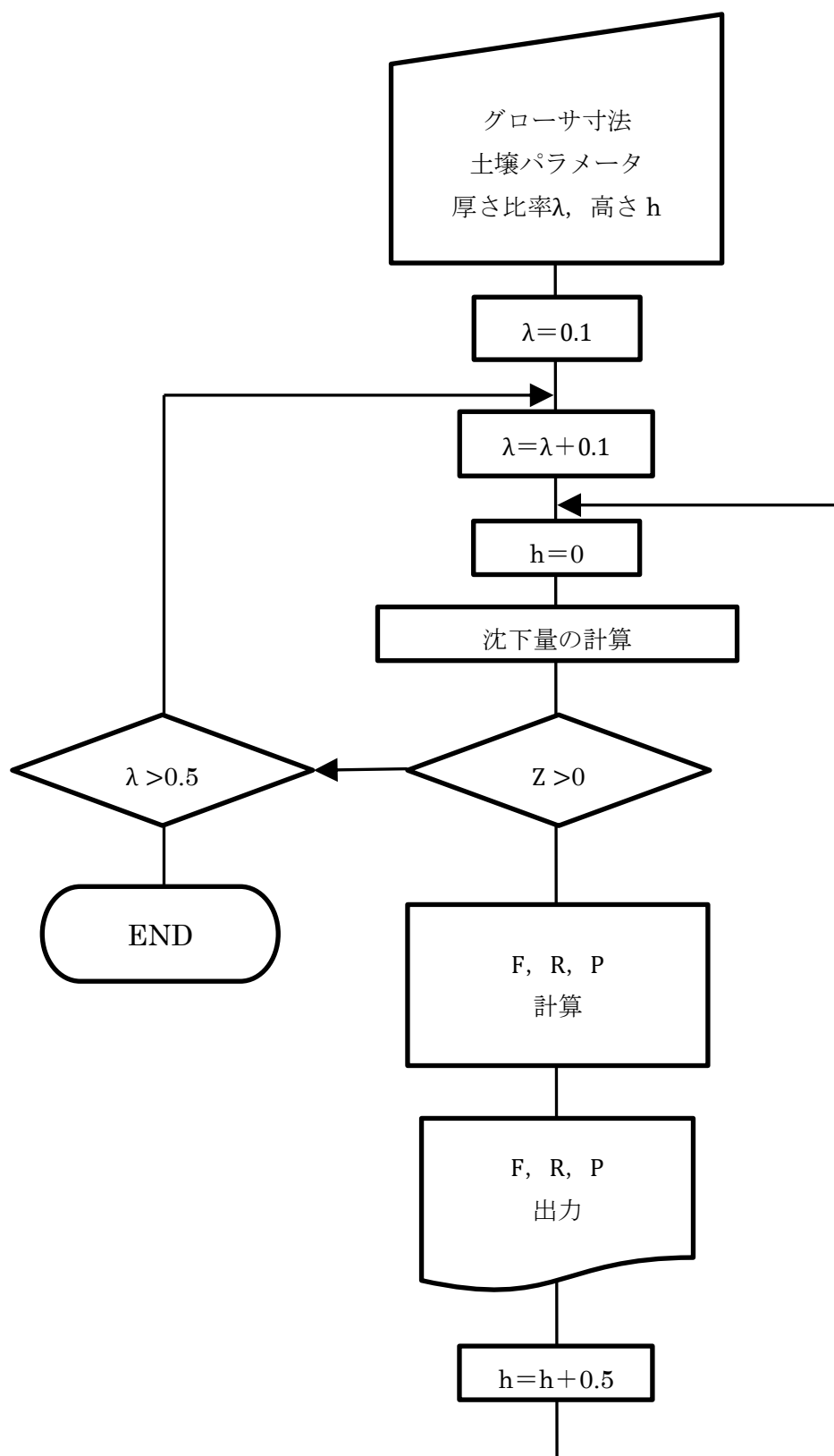


図 3.16 推進力，転がり抵抗，牽引力算出フローチャート

3.3.2 推進力の成分

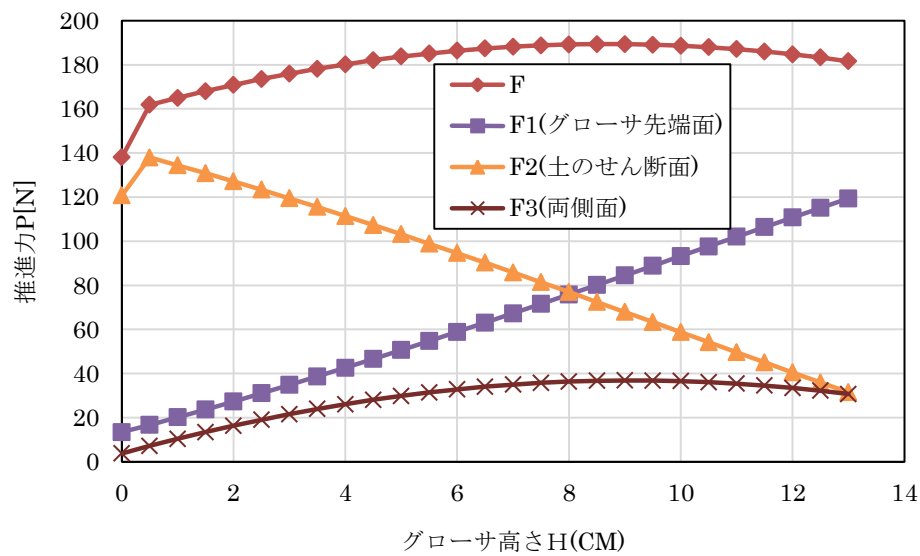


図 3.17  $\lambda=0.1$  における推進力成分の理論値(砂)

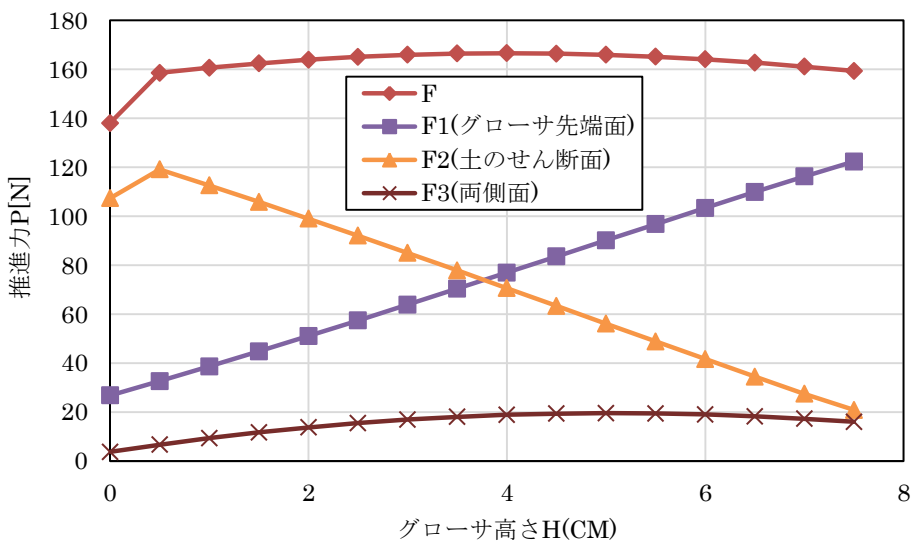


図 3.18  $\lambda=0.2$  における推進力成分の理論値(砂)



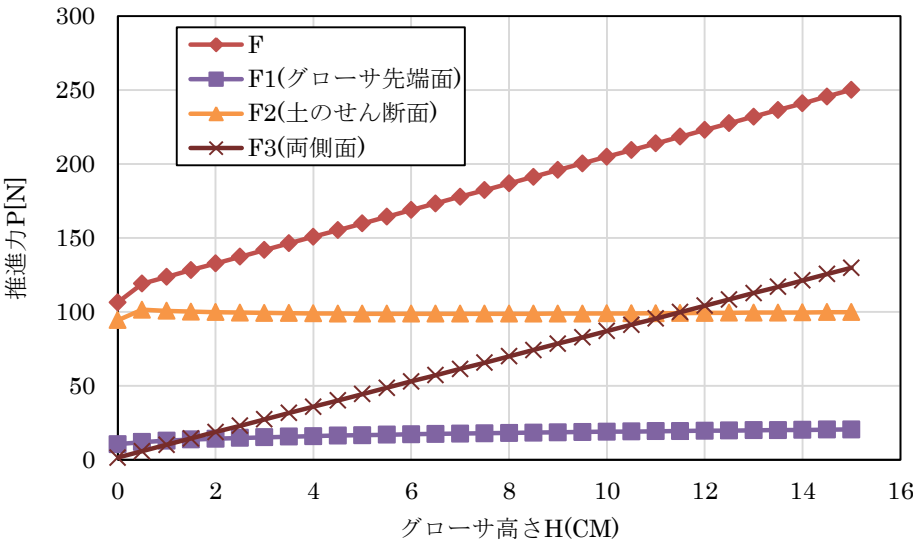


図 3.19  $20\lambda=0.1$  における推進力成分の理論値 (sandy loam)

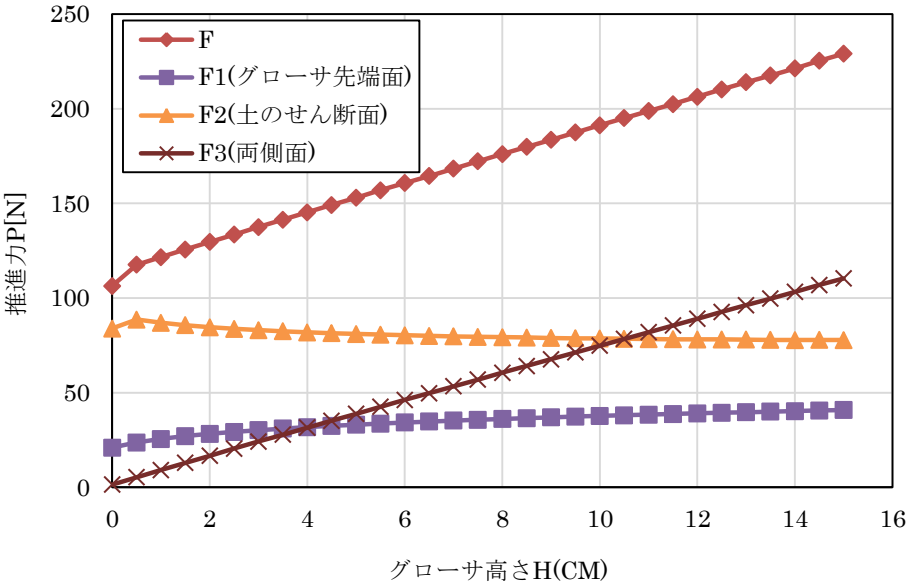


図 3.21  $\lambda=0.2$  における推進力成分の理論値 (sandy loam)

3.3.3 推進力，転がり抵抗，牽引力の理論値

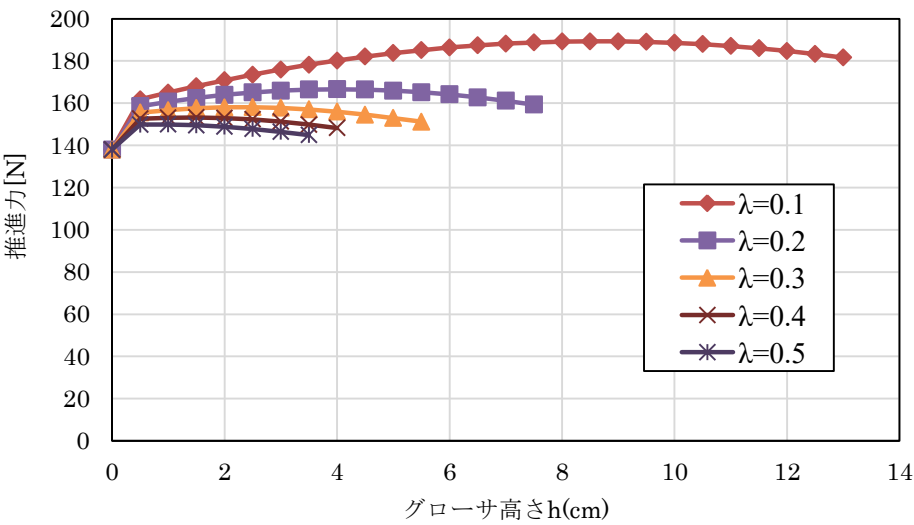


図 3.22 推進力の理論値 (砂)

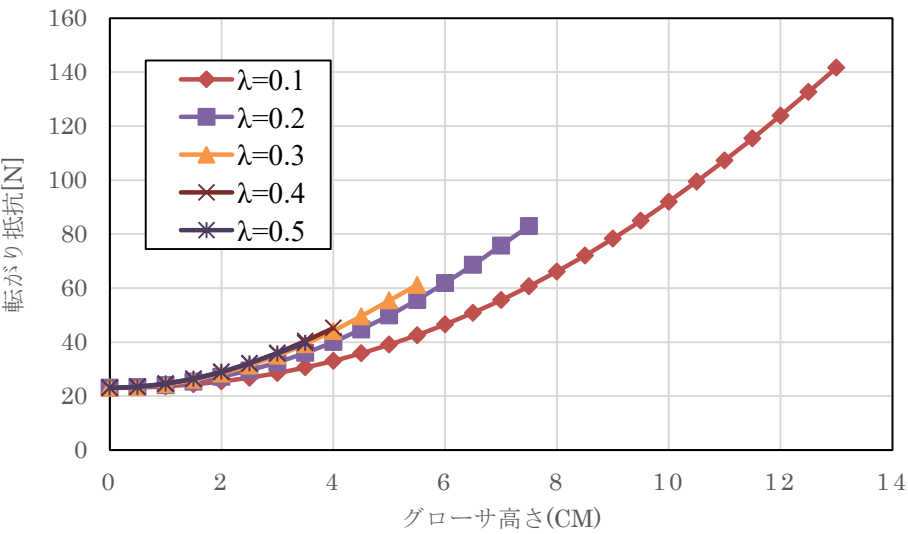


図 3.23 転がり抵抗の理論値 (砂)

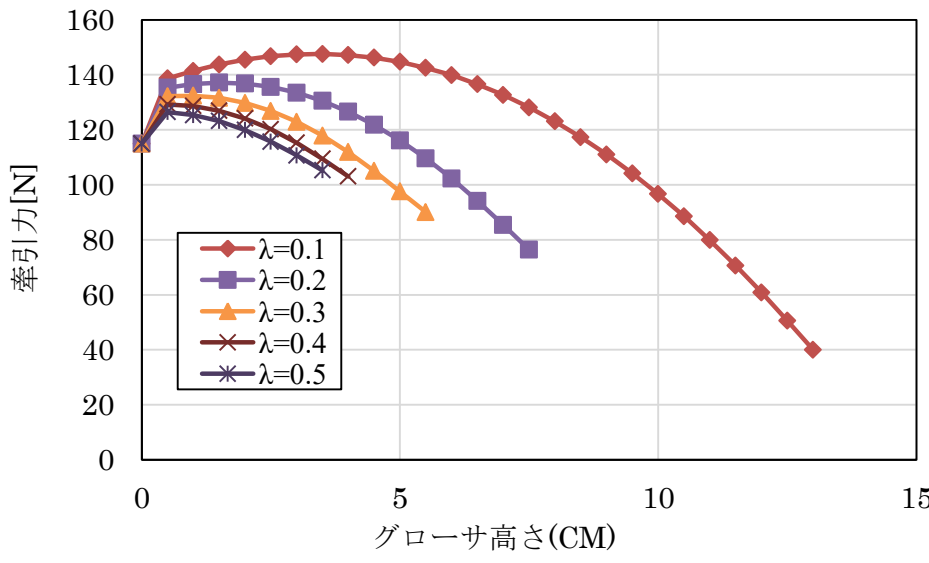


図 3.24 牽引力の理論値 (砂)

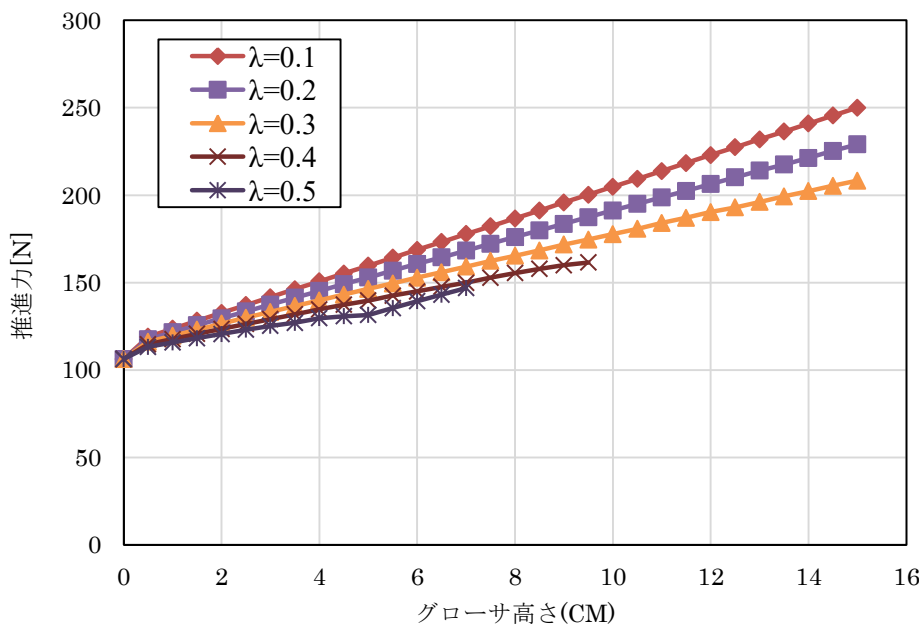


図 3.25 推進力の理論値 (sandy loam)

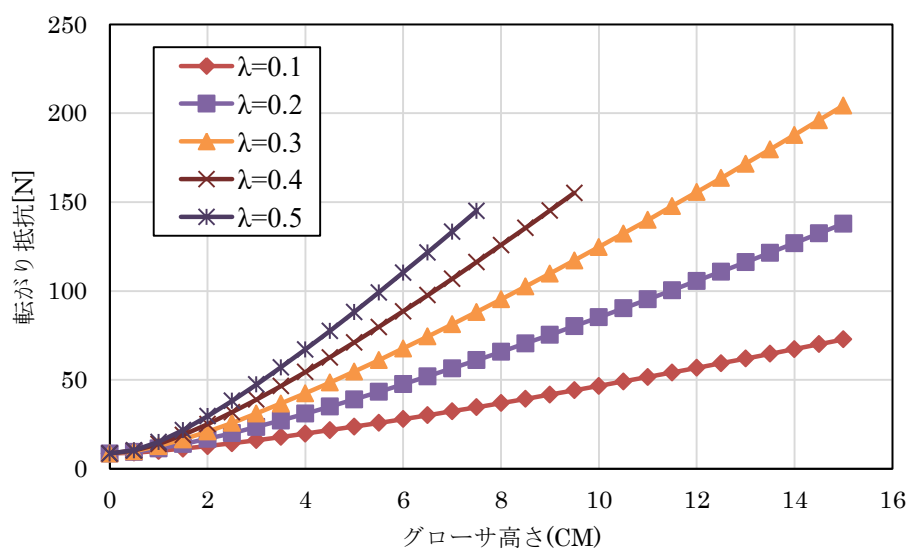


図 3.26 転がり抵抗の理論値 (sandy loam)

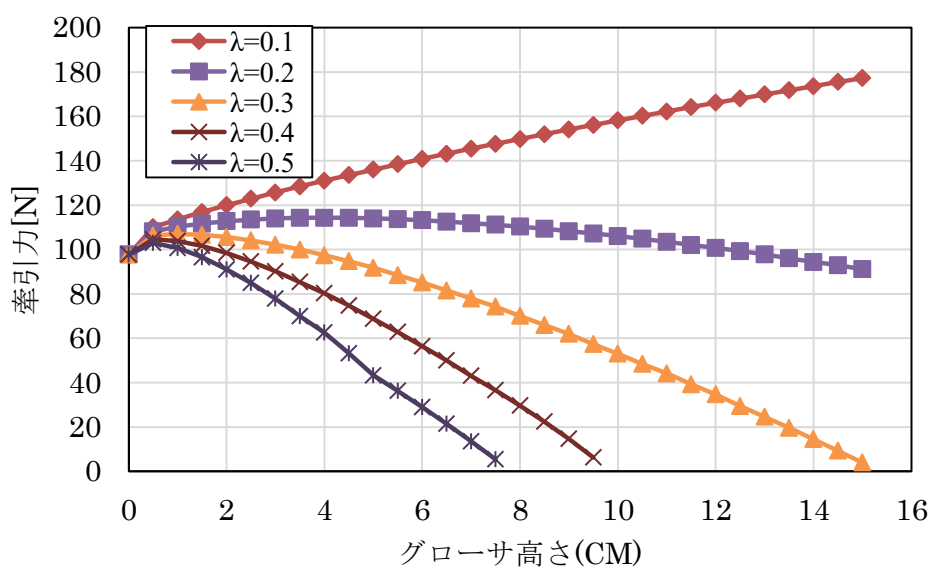


図 3.27 牽引力の理論値 (sandy loam)

## 第4章 モデルグローサシューによる推進力測定実験

### 4.1 実験の目的

履帯車両は接地履帯と土との力学的な相互作用によって反力が得られ、車両の推進力として発生している。走行時における履帯下の土の挙動を考慮し、適切な構造を有する(つまり、牽引性能を最も効率よく発揮できる)グローサシュー形状を明らかにすることを本研究の目的にしているが、そのためには、グローサシュー形状による推進力への影響を知る必要がある。そこで、本実験では、シングルグローサシューを用意し、グローサシューピッチ  $L$  に対するグローサ厚さ比率  $\lambda$  を  $0.1 \sim 0.5$  まで変えていき、それぞれのグローサ高さについての推進力を測定することによって、グローサ厚さ比率ならびにグローサ高さと推進力の関係について新たな知見を見出すことを目的としている。また、理論解析結果との比較を行うことで、グローサシューに作用する推進力の予測にデータを提供する。

ただし、実験を実際の履帯車両で行うには、測定用のセンサの設置、あるいは計算モデル各種パラメータの設定、各測定装置設定、その他多くの困難が予想されるため、シングルグローサシューをモデル化したものを用いて実験を行った。便宜上これをグローサシューモデルと呼ぶ。

### 4.2 実験装置

#### 4.2.1 実験装置の概要

グローサシューモデル推進力測定試験に使用した実験装置の概略図を図 4.1、写真を図 4.2 に示す。

本装置は、メインフレームに取り付けられたグローサシューモデル装着部を土が敷き詰められた土壌槽に垂直に上下させ、他方、車輪のつけられた土壌槽がレール上を水平に移動する機構になっている。土壌槽を油圧駆動装置部によって駆動し、沈下したグローサシューモデルを水平方向に対して固定した状態でせん断させることによって、その反力をグローサシューに走行時に発生する土壌反力とみなし実験を行うこととする。

また、グローサシューモデルと一体となっている八角形リングで、モデルに発生する推進力、支持力、曲げモーメントを、ポテンシオメータにて、モデルの沈下量、土壌槽の変位量をそれぞれ測定する装置である。

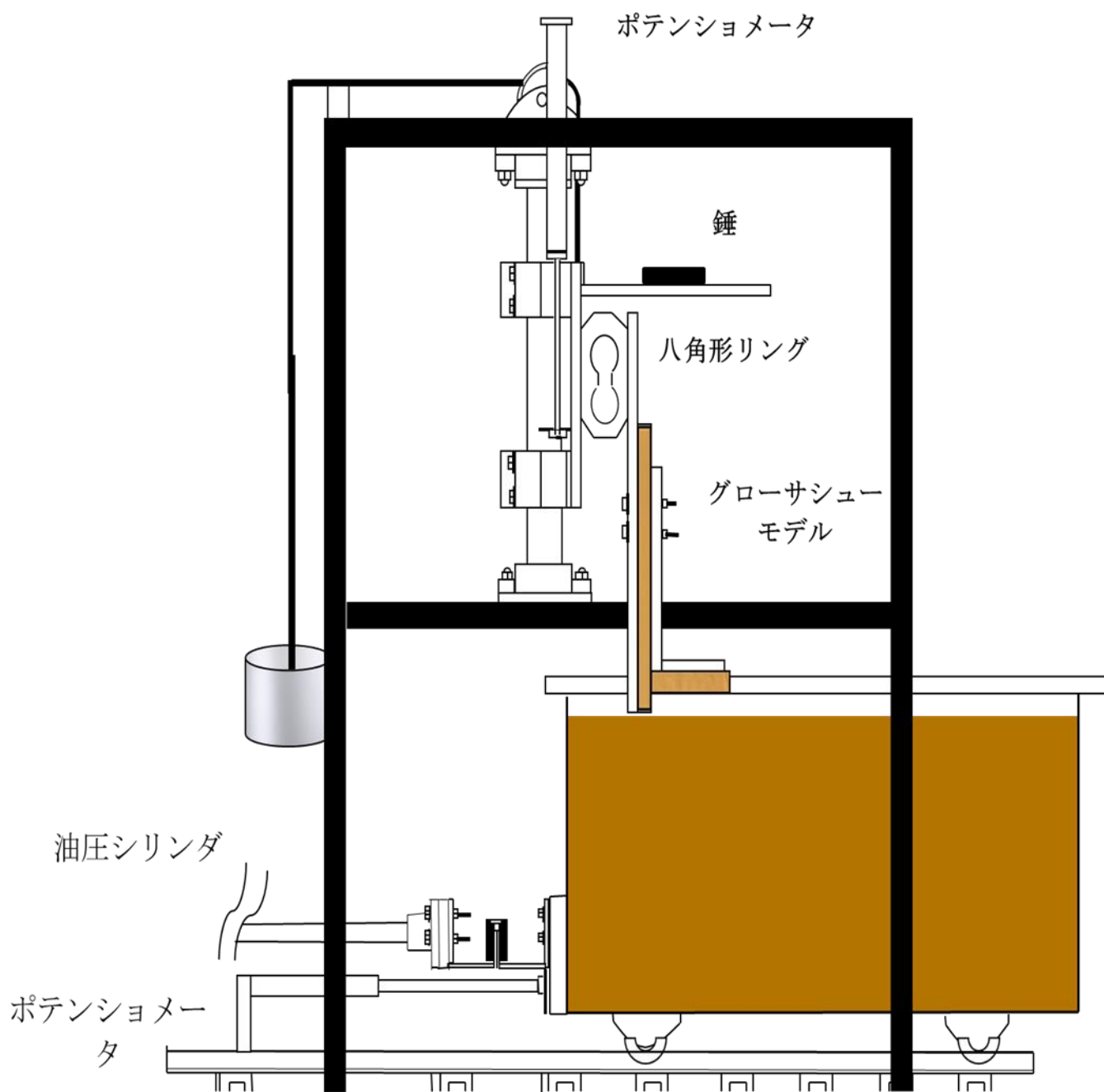


図 4.1 実験装置概略図



図 4.2 実験装置側方全景

### 4.2.2 実験装置の構成

実際に履帯車両が走行する際、グローサは地面と角度をなして貫入し、角度は刻一刻と変わっていく。また、履帯下の接地圧分布は一定ではなく時間と共に変化する。本実験装置では、グローサシューもモデルが土中に静的沈下し、地面に対して、水平の状態のままで測定を開始する。そのため、グローサシューモデルの角度が一定 ( $0^\circ$ ) の条件であり、厳密には実機における走行時のグローサシューの挙動に沿った測定にはならない。しかし、一様に長いグローサでは、角度が変わるのは貫入時と離脱時のみであり、土中において水平方向に駆動するグローサシューが大部分である。したがって、実機の場合と同じでないにせよ、傾向を知る上では、本装置の機構でも十分であると考えられる。

グローサシュー推進力測定装置は、主に次の三つの部分から構成されている。

- (1) 土壌槽部
- (2) グローサシューモデル装着部
- (3) 油圧駆動装置部



## (1) 土壌槽部

土壌槽部は供試土壌を入れる容器，土壌槽を動かすための車輪フレームとレール，変位を検出するためのポテンシオメータ等から構成されている．その概略図を図4.3に示し，写真を図4.4に示した．以下に土壌槽と変位量検出部について記す．なお，土壌槽と駆動油圧装置部とのジョイントは図に示すストッパーを連結部に被せて固定する方法をとった．

### a. 土壌槽容器

プラスチックでできた土壌容器の寸法は，縦610 mm×横880 mm×高さ510mmである．この寸法の容器を本装置に使用した理由は，

1. グローサシユモデルが土壌槽内の土をせん断する際，その影響が容器の側面，底面に及ばない位，十分に容器が大きいこと
2. 別棟を見渡して適当な容器が他に見つからなかったこと

の2点である．この土壌槽を車輪のついたフレームに載せレール上を自由に移動できるようにした．このことによって，駆動油圧装置が土壌槽を前後に一定の速度で送り出すことが可能となり，また実験毎ごとの土の攪拌作業を容易に行うことができるようになった．また，レールの下にコ形鋼を等分に敷き，レールが地面と平行になるように注意した．

### b. 変位量検出部

土壌槽は車輪を介してレール上を前後に移動するが，油圧駆動装置による土壌槽の移動量を測定するために，ポテンシオメータを実験装置本体のフレームに固定した支持板に取り付け，移動量を電氣的に検出した．

キャリブレーションの方法はポテンシオメータを装置から取り外した状態で，ポテンシオメータを変位0mmから10mmずつ伸ばしていき，その時のひずみをパソコンによって読み取った．

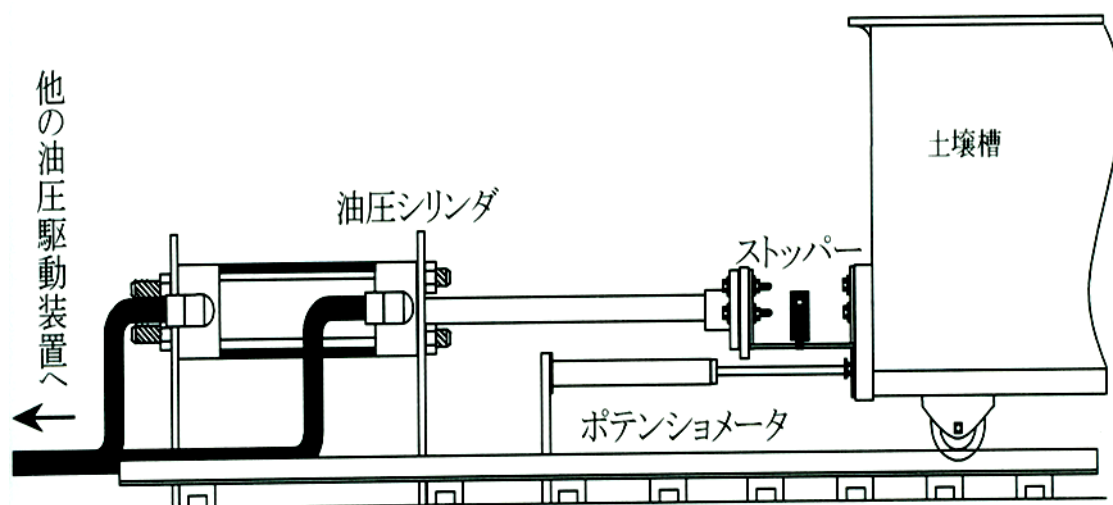


図 4.3 土壌槽部の概略図

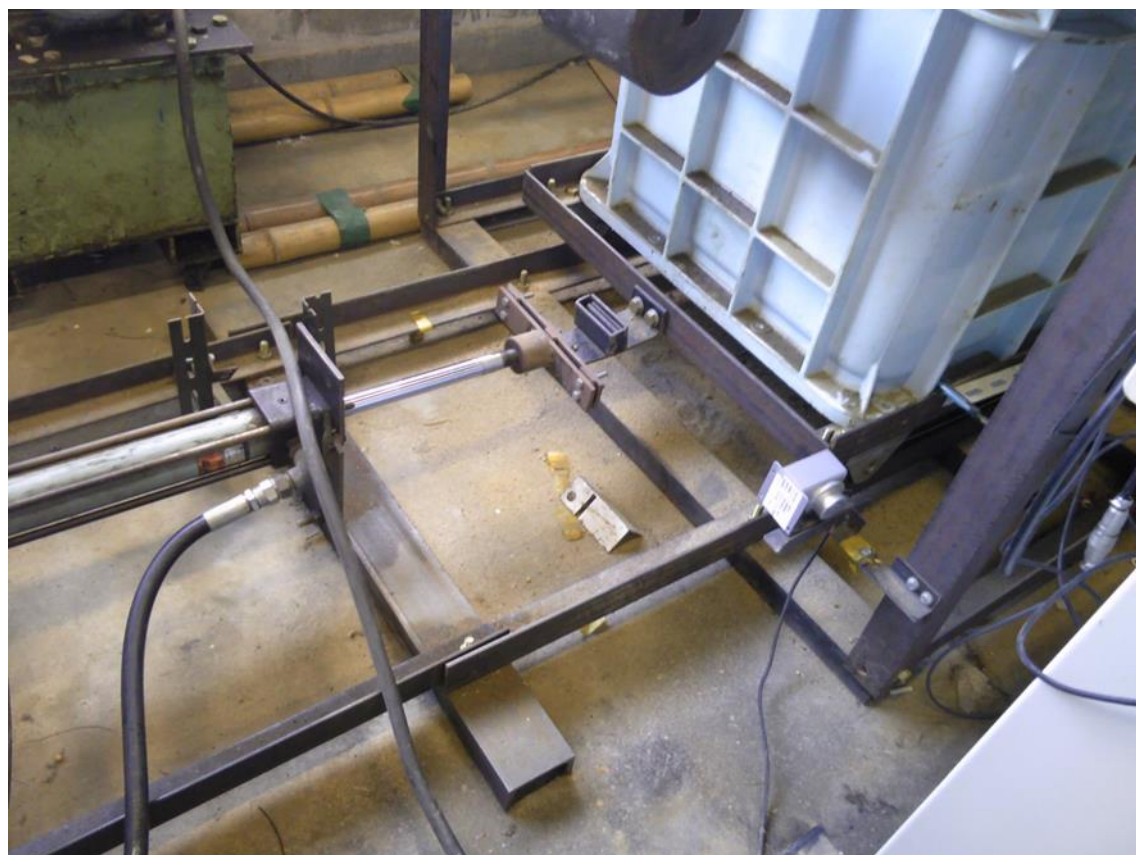


図 4.4 土壌槽部後方

## (2) グローサシューモデル装着部

グローサシュー装着部はグローサシューモデル及び八角形応力計とこれを上下に移動させるスライドユニットが一体となっており、2本のシャフトを介してメインフレームに取り付けられている。また、上下に運動をスムーズに行えるようにグローサシュー装着部に鋼線をつけ、滑車を通して他端に約 16kgf の錘（おもり）を垂らしている。なお、グローサシュー装着部の重さは約 13kgf で、上部に受け錘を載せて全体の重さを調節している。

その概略図を図 4.5 に示し、写真を図 4.6 に示す。以下にグローサシューモデル部、推進力・支持力検出部、沈下量検出部について記す。

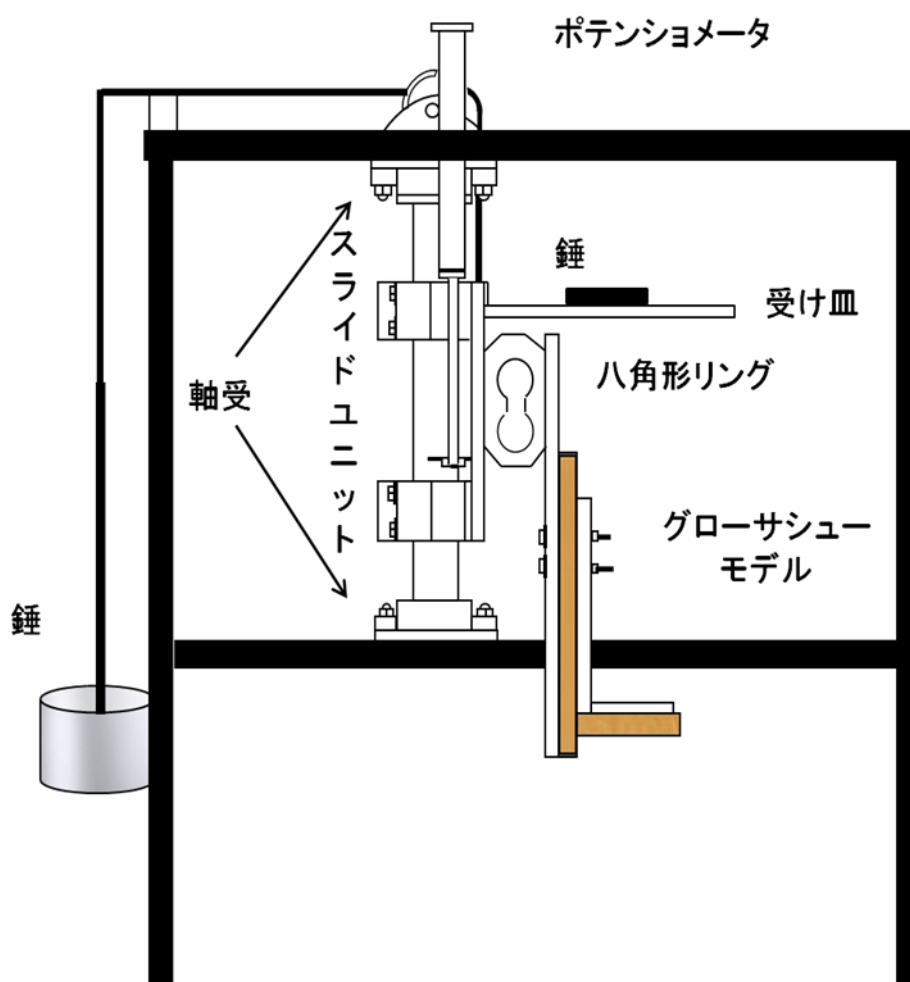


図 4.5 グローサシュー装着部

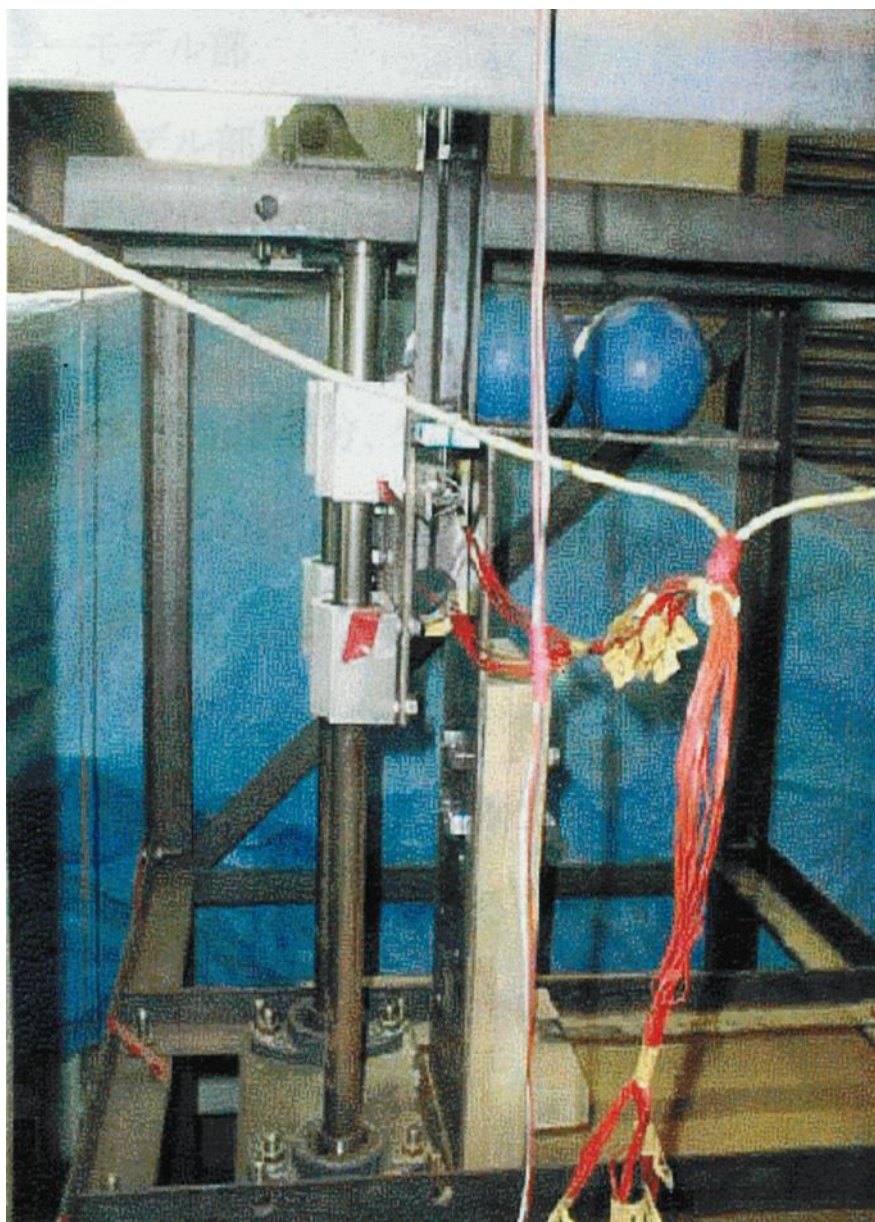


図 4.6 グローサシューモデル装着部

## a. グローサシューモデル部

グローサシューモデル部は 2 つの木製ブロックから成り立っている。グローサシューのグローサ先端部分とスペーシング部分とが対になっており、2 つが合わさることでシングルグローサシューモデルを構成している。八角形リングに固定された鉄板とグローサ先端部分、グローサ高さ調節部分とスペーシング部分とをそれぞれねじ止めし、この 2 つを任意の位置でボルト固定する。ボルトの固定位置でグローサ高さを調節することが可能である。また、実験時グローサシューモデル前方に衝立を固定する。これは実際のクローラにおいては先行するグローサシューの影響を受けているため、実際の条件により近づけるために先行グローサシュー背面の代わりとするために用いた。なお、グローサシューモデルと衝立との概略図は図 4.7 に記す。

グローサシューモデルを木製とした理由は、本装置に取り付けが容易であり、また実験時におけるグローサ高さの調節が容易であるためである。本来ならば実際のクローラ車両に使われる材質であるゴムあるいは金属を用いることが望ましいが、材質が異なっているため定性的なデータを得ることは可能である。

本実験で使用したグローサシューモデルの仕様を以下に記す。

グローサシューピッチ  $L=9\text{cm}$

グローサシュー幅  $B=15\text{cm}$   $L/B=0.6$

スペーシング厚さ  $t=3\text{cm}$

グローサシューピッチ  $L$ 、グローサシュー幅  $B$  及びスペーシング厚さ  $t$  に関しては理論解析で使ったものを使用した。

グローサシューモデルの詳しい仕様を以下の表 4.1 および表 4.2 に記す。また供試グローサシューの写真を図 4.8 に示す。

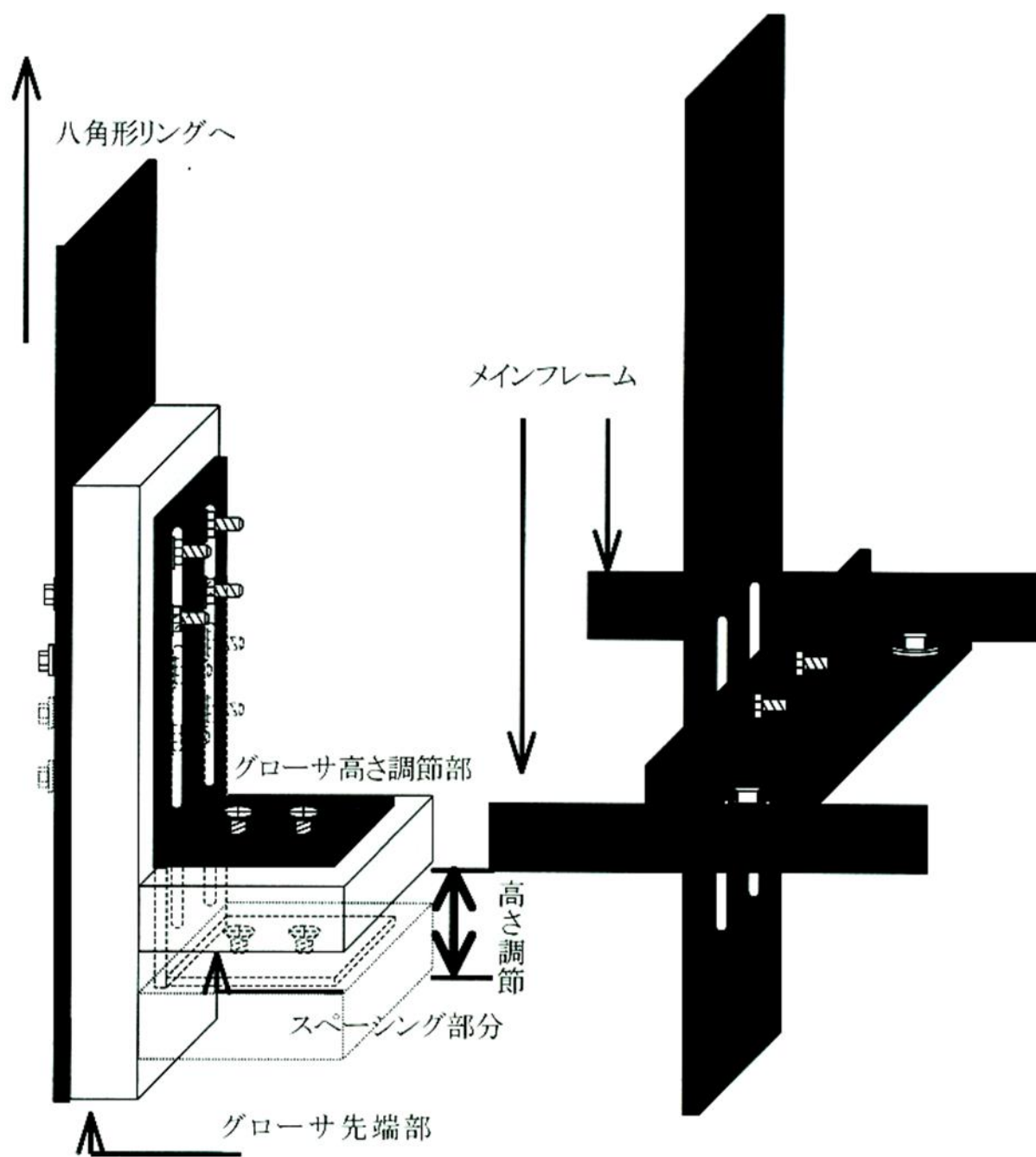


図 4.7 左：グローサシェーモデル 右：衝立

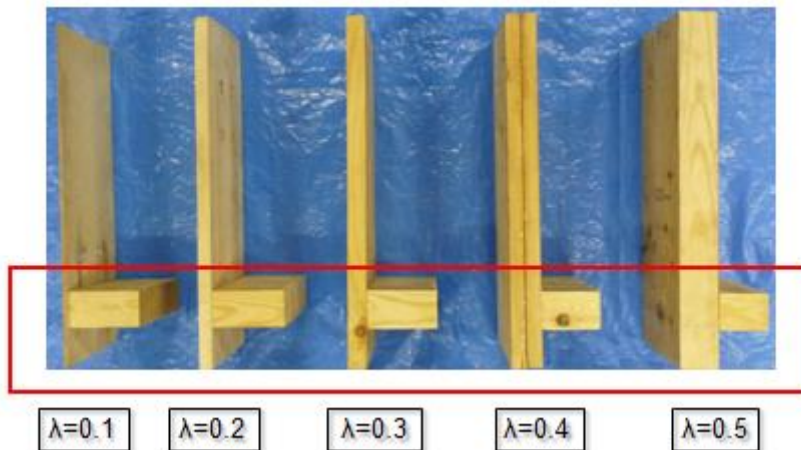


表 4.1 供試グローサシューモデルの仕様 単位[mm]

シングルグローサシューの諸元	
荷重 $W$ [kg]	25
シュー幅 $B$ [mm]	150
シューピッチ $L$ [mm]	90
スペーシングの厚さ $t$ [mm]	30

表 4.2 グローサ厚さ比率 $\lambda$ によるグローサ厚さ, スペーシング長さ[mm]

グローサ厚さの比率 $\lambda$	グローサ厚さ $\lambda L$ [mm]	スペーシング長さ $(1-\lambda)L$ [mm]
0.1	9	81
0.2	18	72
0.3	27	63
0.4	36	54
0.5	45	45

図 4.8 グローサシューモデル  $\lambda=0.1\sim0.5$

## b. 推進力・支持力・曲げモーメント検出部

グローサシューモデルに作用する推進力・支持力を測定するために八角形リング（八角形応力集中計）を用いた．荷重 $F_z$ (支持力),  $F_x$  (推進力)及び $M_y$ (曲げモーメント)が八角形リングに作用した状態, 及びゲージ貼り付け位置と結線方法を図 4.9 に示す．本研究では測定端子が不足していたため $M_y$ (曲げモーメント)は測定できなかったがグローサシューモデルには設置されているため示しておく．

$F_x$ 回路では両端部の円外にゲージを貼り付けし, 外側と内側のゲージを交互に連結し, ホイーストン・ブリッジを作れば外側のゲージが引っ張り(+)のときに内側のゲージは圧縮(－)となる． $F_z$ 回路では斜めの方向のゲージを順次結べば, 対角線で向かい合うゲージは同じ応力状態となる．また,  $M_y$ 回路では両端のゲージを使い, 同じ側のゲージを対角線上に結線すれば, それが応力状態となる．以下の結線方法で完全なホイーストン・ブリッジを形成する．八角形リングのキャリブレーションは, 図 4.10 のようにセンサを角度 $\alpha(=45^\circ)$ で取り付け, 八角形リングの中心から  $L(=28.7\text{cm})$ の点で荷重を加えていき, そのときの電圧をストレインアンプで増幅してから電圧計で読み取り, 荷重－電圧の一次回帰直線を求める．

$F_z$ ,  $F_x$ ,  $M_y$ の荷重は次の式で表せる．

$$F_z = W \sin \alpha \quad (4.1)$$

$$F_x = W \cos \alpha \quad (4.2)$$

$$M_y = W \cos \alpha \times L \quad (4.3)$$

キャリブレーションでのストレインアンプの設定と電圧計への出力結果を表 4.3 に, キャリブレーションの結果を図 4.11 に示す．



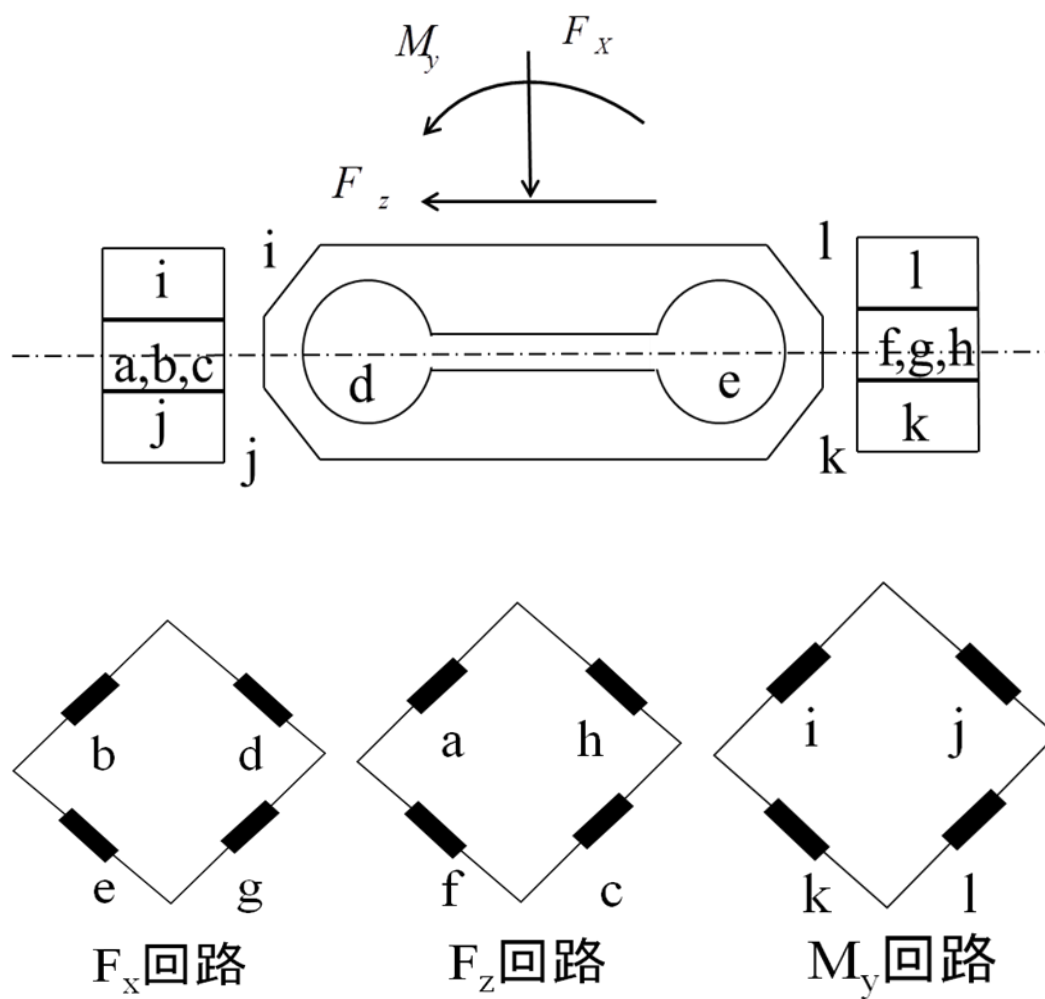


図 4.9 ゲージ貼り付け位置と結線方法

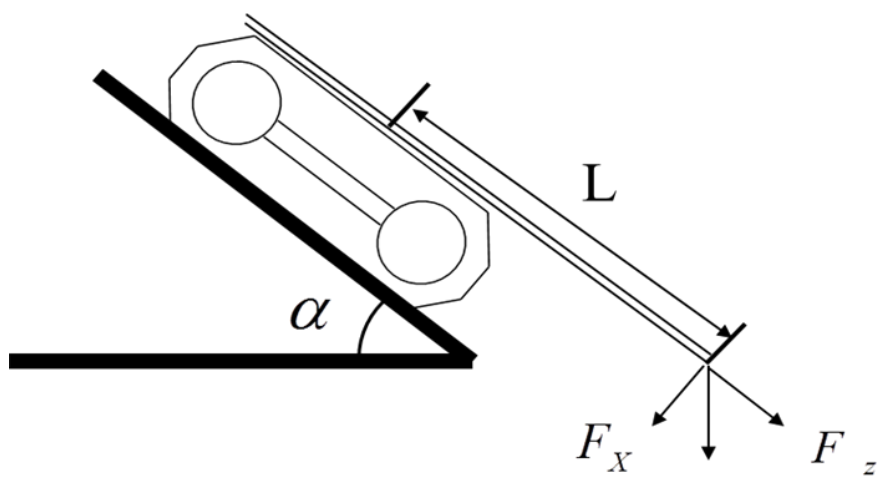
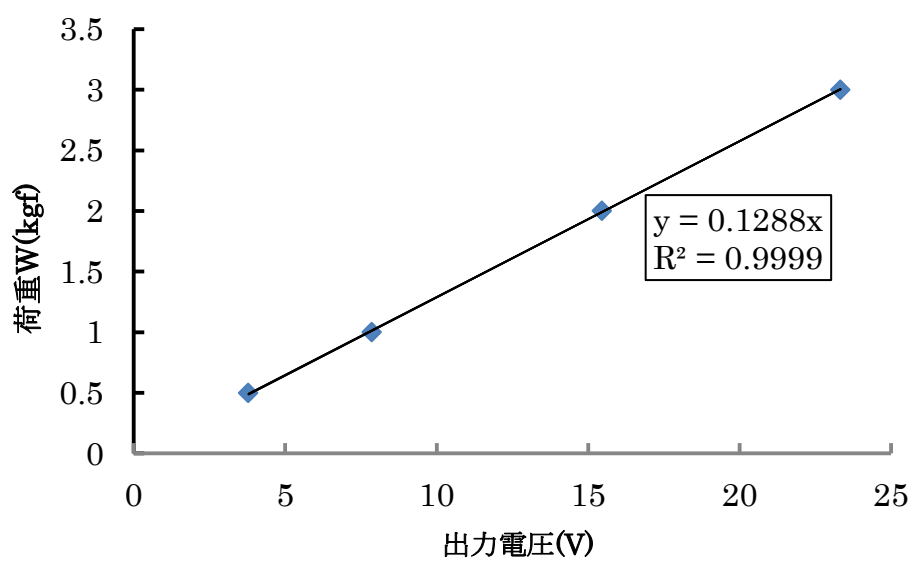


図 4.10 八角形リングのキャリブレーション方法

表 4.3 トレインアンプの設定と出力電圧結果

No.	荷重 W(kgf)	電圧(V)		
		F <sub>x</sub> 水平方向	F <sub>z</sub> 垂直方向	M <sub>y</sub> モーメント
1	0.5	3.785259	4.354413	23.08609
2	1	7.8592	8.223533	45.70068
3	2	15.45914	16.75255	92.07138
4	3	23.33339	24.8986	137.9026

図 4.11 F<sub>x</sub> キャリブレーション結果

## c. 沈下量検出部

2本のシャフトに計4個のスライドユニットを通して上下運動が可能となったグローサシユーモデル装着部を土壌槽の土壌表面に降ろしてから、土壌反力と自重が釣り合うまでの（装着部が停止するまでの）、沈下量を測定するためにポテンションメータを用いた。ポテンションメータはメインフレームに固定されており、伸縮部の先端をモデル装着部に応力がかからないように取り付ける。

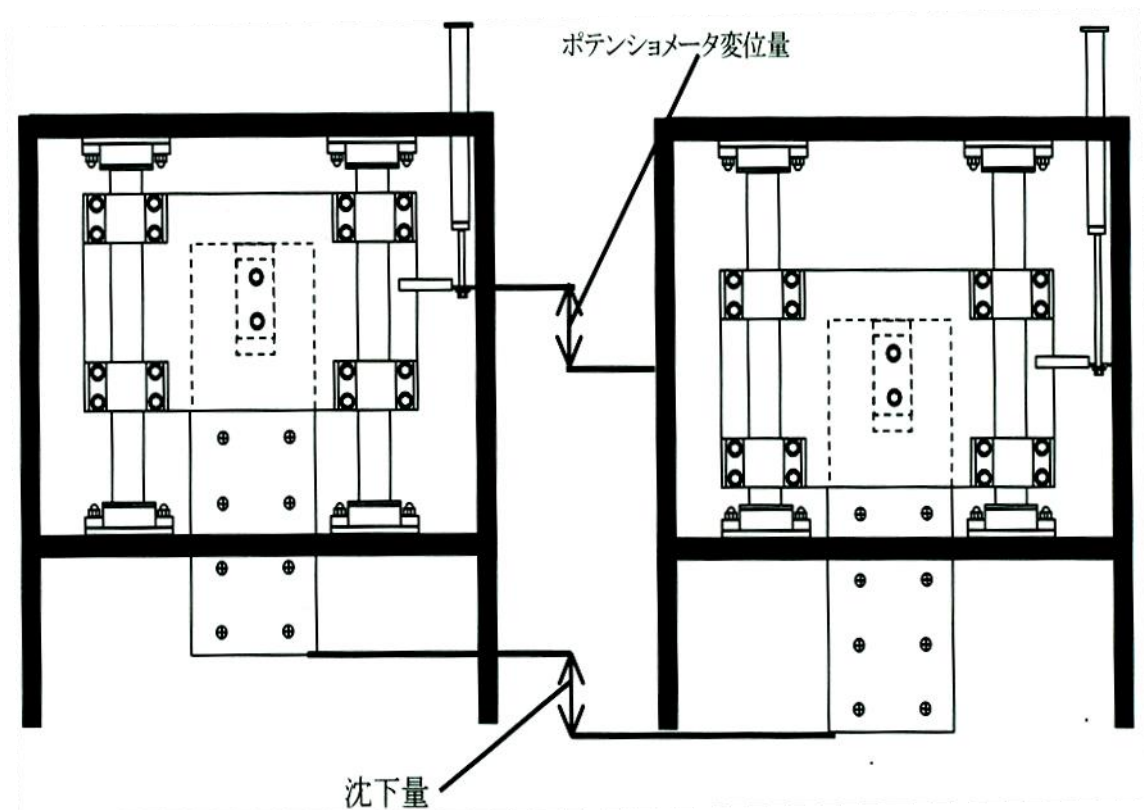


図 4.12 モデルの沈下量測定部の理論図

### (3) 油圧駆動装置部

油圧駆動装置部はレール上の土壌槽を前後に送り出すものであり、油圧シリンダ、油圧ポンプ、流量制御弁、電磁制御弁、オイルタンク、インバータなどから成り立っている。シリンダの作動は電磁制御弁(12V)で行われ、油圧ポンプは三相交流モータによって駆動される。油圧駆動部の概略図と油圧回路・制御回路図をそれぞれ図 4.13、図 4.14 ならびに図 4.15 に示す。

制御回路は、モータスイッチⅠ、電磁弁コントロールスイッチⅡからなり、電磁弁コントロールⅡによってシリンダの動作方向が制御される。流量制御弁は手動のもので、ボル

ト調節ネジによりシリンダに供給するオイルの量を制御し、ピストンの速度を変えられるが、微調整がきかず思うような設定ができなかった。そこで、インバータ(HITACHI 社製 SJ100 シリーズ 3相 200v)により三相交流モータの回転速度を制御することによってピストンの速度を調整した。なお、このインバータの可変週波数領域は 0~50Hz で 0.1Hz 単位まで調整可能である。

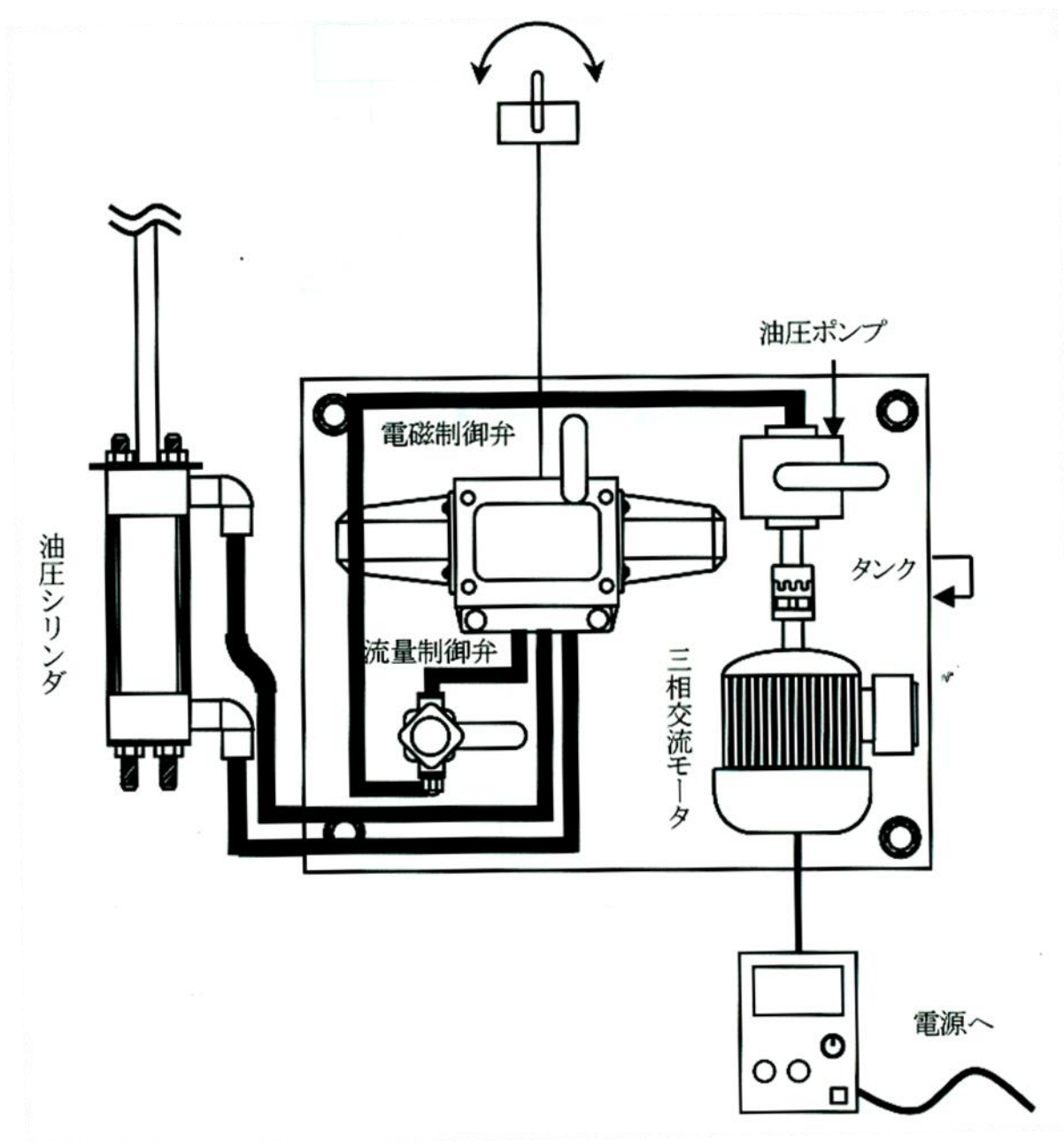


図 4.13 油圧駆動部の概略図

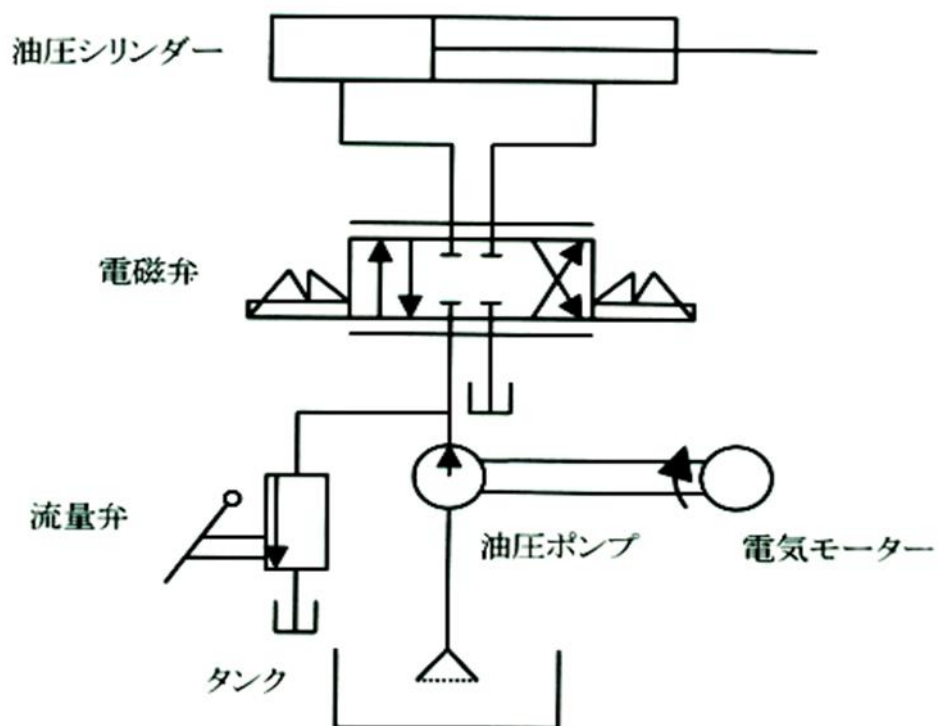


図 4.14 油圧回路

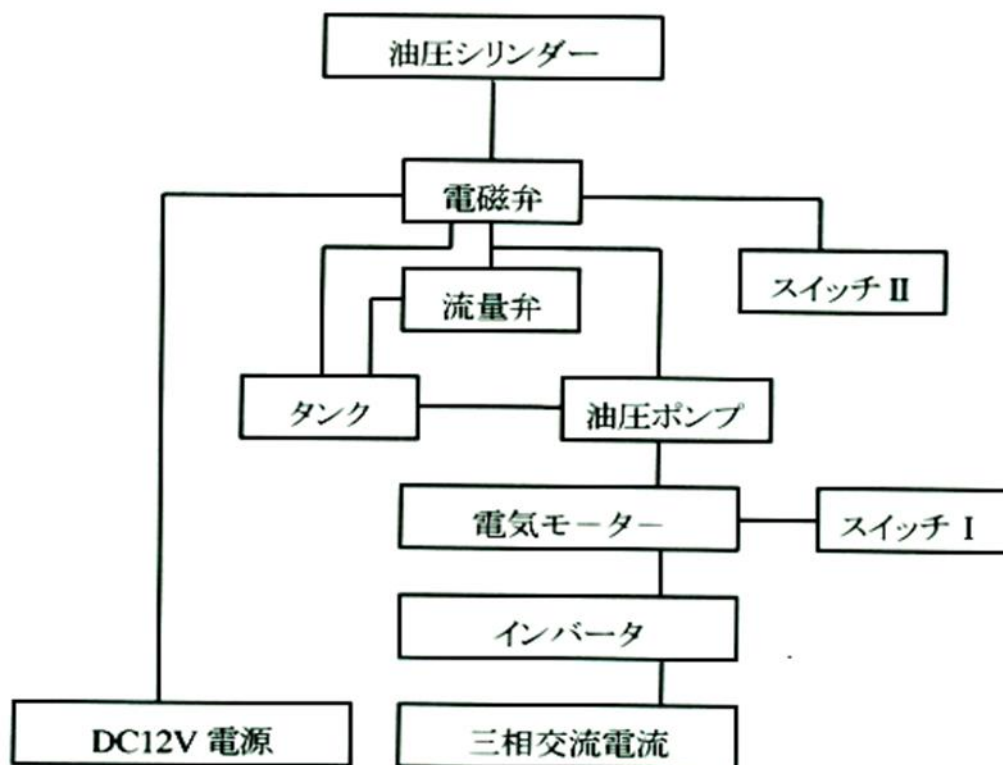


図 4.15 制御回路

### 4.3 測定システムの構成とデータ収集法

グローサシューモデルに作用する推進力，支持力及びモデルの沈下量，土壌槽の変位量をデータとして取り出す方法を次に示す．

推進力，支持力は，八角形リング(材質 SUS304)に貼り付けられたストレインゲージとブリッジボックスにより電氣的に取り出し，PCD300B で増幅する．モデル沈下量及び土壌槽の変位量はポテンショメータから電氣的に取り出す．これらをアナログデータレコーダに記録，保存したのちそれらを A/D 変換ソフト(PCD300B)で変換してコンピュータに取り込みデータ解析を行う．また，図 4.16 にデータ収録ブロック線図を示すとともに，本実験装置の測定機器の一覧を表 4.4 に，その構成を図 4.17 に示す．

表 4.4 使用機器

名称	型式名	メーカー
ストレインゲージ	9W01-L41-10K	KYOWA
ポテンショメータ	DTH-A-100	KYOWA
	DTP-D-S	KYOWA
アンプ&A/D 変換器	PCD-300B	KYOWA
パーソナルコンピュータ	OPTIPLEX 960	DELL

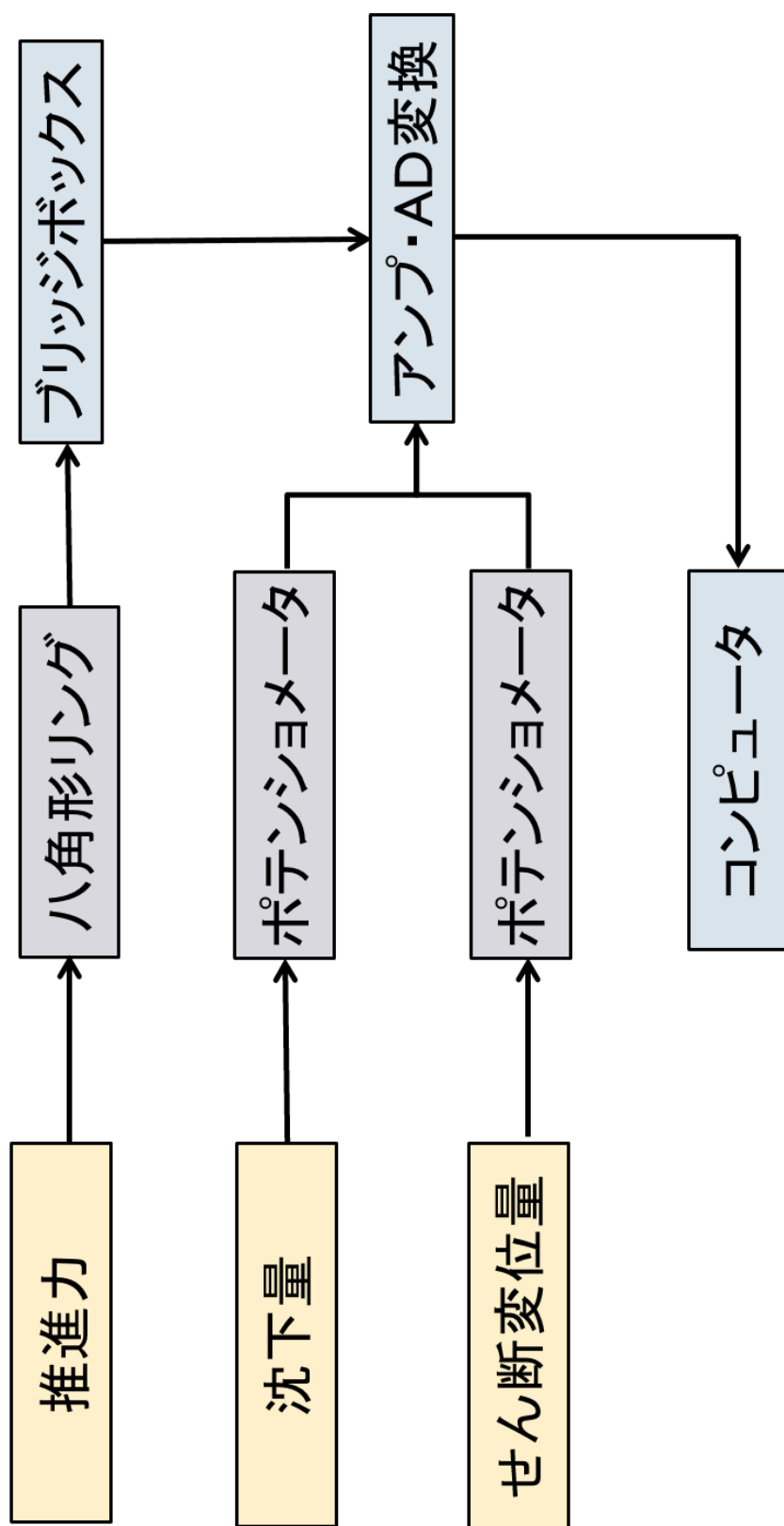


図 4.16

グローサシューモデル推進力測定実験のデータ収録ブロック線図

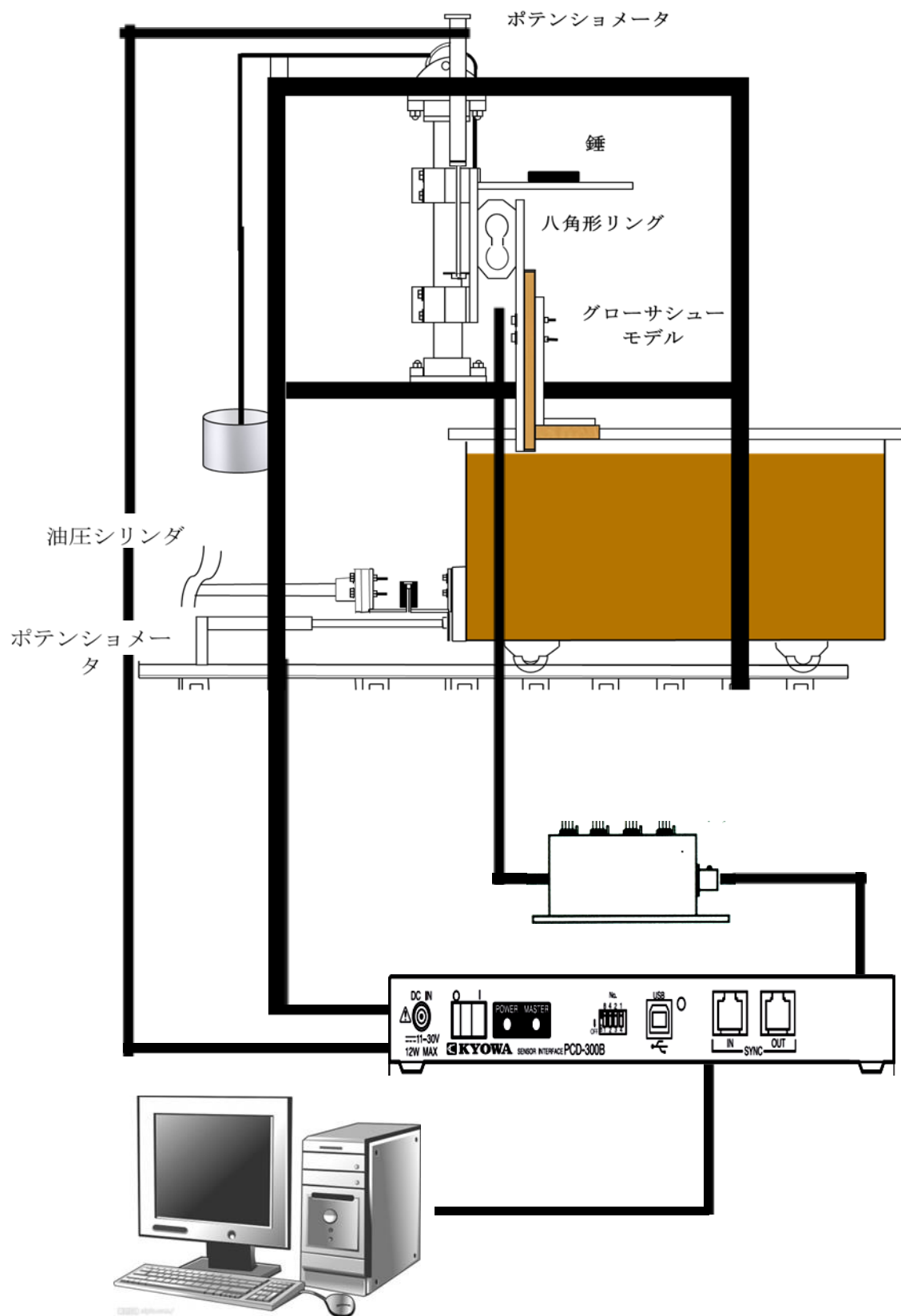


図 4.17

測定システムの構成



## 4.4 実験条件

### 4.4.1 実験装置及び測定機器の設定

グローサシューモデルの仕様については前述したので、その他の設定を以下の表 4.5, 表 4.6, 表 4.7 に示す. グローサシューモデルにかかる荷重を, グローサシュー装着部の受け皿に 12kgf の錘を載せてトータル約 22.5kgf とした. これは, グローサシューモデルの接地圧を市販のグローサトラクタの仕様に合わせるため, 概ね接地圧が  $0.1\text{kgf/cm}^2$  以下になるように錘を加えた. また, 油圧駆動装置部のインバータの設定を 20Hz に調節したのは, 周波数をこれ以下小さくしても油圧シリンダの速度にあまり変化が見られないだけでなく, 油圧シリンダがスムーズに動かなくなるからである.

実験の際, グローサシューモデルを土壤に自重沈下させたあと土壤層を動かすとグローサシューモデルは滑り沈下 $Z_j$ を生じる. そこで, モデルを垂直方向に拘束した(滑り沈下を考慮しない)条件での実験を行うことにした. その理由は, 予測モデルでは滑り沈下が生じないものとして解析を行ったので, 実験データと理論解析データとのより近い条件での比較を行うためである.

表 4.5 実験装置の設定

モデルにかかる荷重	約 22.5 kg
接地面積	135cm <sup>2</sup>
接地圧	0.185kgf/cm <sup>2</sup>

表 4.6 測定機器の設定

周波数	20Hz
土壤槽移動速度	4.93cm/s

表 4.7 レンジと校正係数

チャンネル名称	推進力	支持力	せん断変位	沈下量
チャンネル No	CH01	CH02	CH03	CH04
レンジ	10000	10000	10000	10000
校正係数	0.1293	0.12	0.009999	0.04999

#### 4.4.2 実験手順

最初に土壌槽内の供試土壌を攪拌し、表面が平面になるように整地を行う。グローサ高さを  $h = 0\text{mm}$  に設定しグローサシューモデルのラグ部分とスペーシング部をボルトで固定し、推進力、沈下量、土壌槽変位量の測定を始める。次にグローサ高さを  $1\text{cm}$  ずつ大きくしていき測定を繰り返すが、スペーシング部が土壌表面から浮いたところで測定を終了する。このようにして、グローサ厚さ比率 $\lambda = 0.1$  から  $0.2, 0.3, 0.4, 0.5$  と順次、供試グローサシューモデルを変えて測定を繰り返す。以上を一回の実験とした。ただし、各グローサ高さでの測定終了ごとに整地作業を行って次の実験に備えた。

#### 4.4.3 実験方法

- (1) 推進力測定装置を取り付けたグローサシューモデルを土壌槽の表面まで降ろす。このとき滑車を基点に鋼線で結ばれた錘とグローサシューモデル装着部はバランスをとっており、錘を上げることによってグローサシューモデル装着部を比較的容易に下まで降ろすことができる。
- (2) 地表面まで降ろしたらモデルを止め、受け皿に錘  $12\text{kgf}$  を載せる。その後、アナログデータレコーダによる収録を **ON** にし、鋼線でつながっている錘をメインフレームに載せグローサシューモデルを静的に自重沈下させる。
- (3) 収録を一時停止し、グローサシューモデルの前方に衝立を固定する。
- (4) 衝立を固定する作業が完了したら、再びインターフェース **PCD-300B** を **REC** にしインバータのスイッチを入れ、油圧モータが回転したのを確認してから、電磁弁のスイッチを下にする。油圧駆動部と連動して土壌槽が引っ張られるので  $20\text{cm}$  位移動したところでスイッチを元に戻し、収録を **OFF** にして、測定を終了する。
- (5) 次の測定に備え、衝立をメインフレームから外し、また受け皿の錘を地面に垂らす。そしてグローサシュー装着部を初期状態まで上げる。
- (6) 電磁弁のスイッチを上にして土壌層を初期状態の位置まで押し戻す。それから油圧駆動部と土壌槽との連結部にかけてあるストッパーと、土壌槽と連動していたポテンシオメータ伸縮部の先端を外し、土壌槽をメインフレームの中から出す。
- (7) 土を攪拌し表面を平面にしてから、土壌槽を初期の位置に移動させる。ポテンシオメータとつなげ、油圧駆動部とジョイントする。

以上の(1)～(7)を一回の測定とし、それぞれのグローサ高さ、幅について実験を繰り返した。土壌状態による影響を少なくし実験の再現性を高めるため、測定は 3 回ずつ行い、同一性があるものの 2 つをとって平均し、実験データとして用いた。

## 第5章 測定実験の結果及び考察

### 5.1 実験条件

上下運動を拘束させないで実験を行うとグローサシューモデルはかなりの滑り沈下を生じる。滑り沈下に伴い、測定結果（特に沈下量や推進力）が変わってくると考えられるので、その作用を出来る限りなくし理論解析との比較が行いやすくするために、モデルを水平方向に固定して実験を行った。これにより自重後の沈下量を概ね固定できる。

記録したデータは電圧単位なので、パソコンに出力した後、データをそれぞれ変換させる必要がある、そこで、出力結果（電圧）を書く単位に直す変換式を以下に示す。

推進力

$$F_x = -14.907 \times \frac{range}{2} \times V_{Fx} \quad (5.1)$$

支持力

$$F_z = -10.492 \times \frac{range}{2} \times V_{Fz} \quad (5.2)$$

沈下量

$$Z = 2.066 \times \frac{range}{2} \times [V_z - V_{Z=0}] \quad (5.3)$$

土壌変位量

$$X = 2.1307 \times \frac{range}{2} \times [V_x - V_{x=0}] \quad (5.4)$$

ここで、**range** はアナログデータレコーダに設定した **range** の値であり、 $V_{Z=0}$ 、 $V_{x=0}$  はそれぞれの出力電圧の初期値である。

グローサシューモデルは八角形リングに続くグローサシュー装着部の一部となっており、これらが一体となって上下に移動できる機構になっている。したがって、メインフレームに固定した衝立が装着部の一部である受け皿につかえることによってモデルの沈下が止められる。この実験では、高さのある衝立を用意した。ただし、ここで注意することとして、土壌層を駆動する瞬間までモデルは上下方向に自由な状態であることである。つまり、土壌をせん断する直前までは衝立と受け皿に少し隙間がなければならない。

実験は、シングルグローサシューのピッチに対するグローサ厚さ比率を $\lambda=0.1\sim0.5$ まで順次変えていき、それぞれにおいてグローサ高さを 0cm からスペーシング部分に完全に供試土壌が付かなくなる高さまで 1.0cm ずつ増やしていき、その高さにおいて 3 回ずつ計測を行った。そして、その中で同一性のある 2 つのデータを取り出し平均したものを実験結果とした。

供試土壌は砂壤土であり、パラメータは表 5.1 に示された通りである。

表 5.1 供試土壌パラメータ

Test soil	Sand	Sandy Loam
Mowasture content(d.b), %	0.23	13.01
Density ( $\gamma$ ), kg/m <sup>3</sup>	$1.51 \times 10^3$	$1.09 \times 10^3$
Cohesion ( $C$ ), kPa	1.06	2.43
Internal friction angle ( $\phi$ ), degree	32.71	20.2
Adhesion ( $C_a$ ), kPa	1.01	1.94
External friction angle ( $\delta$ ), degree	28.51	19.6
Exponent of sinkage ( $n$ )	1.238	0.23
Modulus of Bekker's Equation ( $k_c$ )	0.006	0.024
Modulus of Bekker's Equation ( $k_\phi$ )	0.647	0.20

## 5.2 実験結果

### 5.2.1 データの出力結果と考察

実験データの出力結果の一例（グローサ厚さ比率 $\lambda=0.2$ ，グローサ高さ $h=2.0\text{cm}$ における3回目）を図5.1に示し，これについて述べる．

実験の流れに沿ってグラフを見てみる．まず，グローサシューモデルを土壌表面から地中に自重沈下させると，推進力と沈下量の各センサが値を検出し，グラフに変化が起きる．供試土壌は，かなりの摩擦角を有するため，モデルの側面との摩擦によって水平応力が発生し，モーメントが掛かってしまうためではないかと推察される．

その後も推進力検出部の八角形リングで細かい値の変化があるが，この理由として，

- (1) モデルが完全に停止してからも土中で何かしらの動的な力が働いている
- (2) 八角形リングとグローサシューモデルの距離があり，沈下によって振動を起こしてしまう
- (3) 八角形リング自体に問題がある

の三点が挙げられる．

次に，衝立をメインフレームに固定するために，記録を一時中断する．この間に値が多少変わるため，再開時には段差となってグラフにプロットされる．そのため再開後しばらく時間を置いてから土壌槽を駆動させた．土壌層を駆動することにより，全てのセンサにおいて出力が変化した．それぞれの実験で各測定値が示す傾向は，図5.1を見ても分かるように大きく異なる．

モデルを滑り沈下させないようにして測定したため，推進力は土壌層が動き出した時点で極大値をとり，その後減少した．土壌槽駆動時の出力データの詳細については次の「データ選択」の項で述べる．

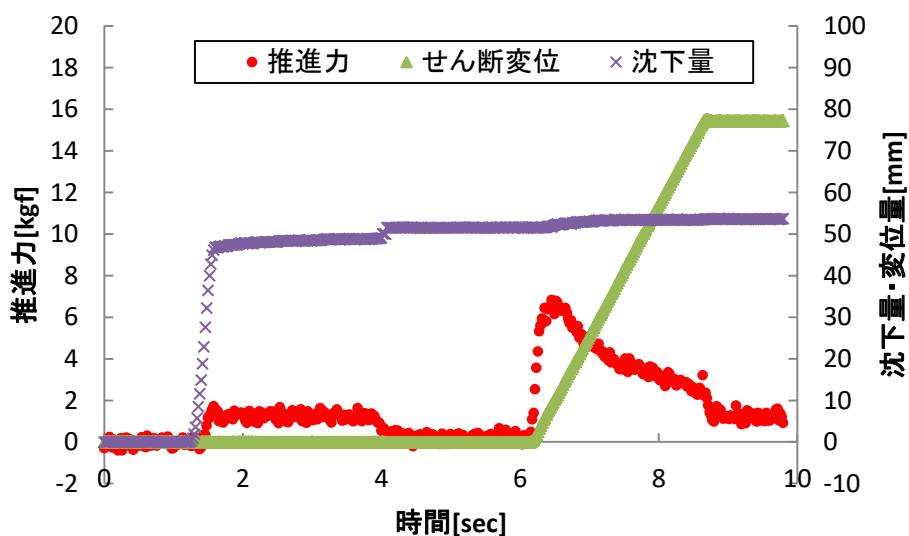


図 5.1 データ出力結果  $\lambda=0.2$   $h=2.0\text{cm}$  3 回目

### 5.2.2 データの選択

出力されたデータのどの値を推進力として選択すればいいか検討してみたい．土壌層駆動時の出力結果について図 5.2 に，その一例を載せる．ここで，出力結果を横軸—時間，縦軸—推進力，沈下量，変位量ととりグラフにプロットしたものである．

実験結果より，土壌層を駆動すれば，変位量とともに推進力は急に増加する．しかし，ピーク値をとり，しばらく経つと急に減少し始め，最後はなだらかな曲線となって駆動前の値に近づく山波のグラフとなった．このとき，土壌の変位量は一定値に落ち着いている．他のデータにおいても同様に再現され，土壌層をせん断するのに十分である点からこの値を推進力として選択することにした．

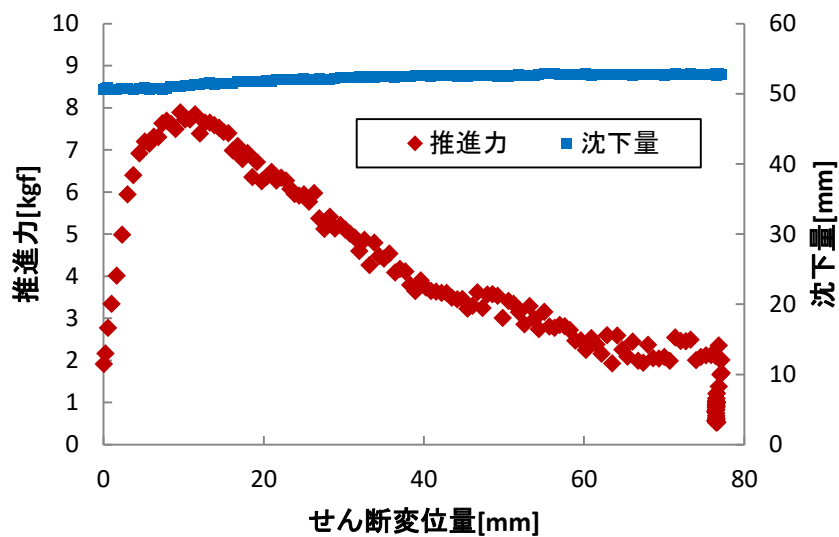


図 5.2 土壌せん断時の各測定値実験例  $\lambda=0.2$   $h=2.0\text{cm}$  2 回目

### 5.2.3 推進力の計測値

推進力の測定結果のまとめを

図 5.3 と図 5.4 に示す．図にはデータのプロット値を示した．

砂と sandy loam において，グローサシューと土との相互作用によって発生する推進力は，同じグローサ高さにおいては，グローサ厚さ比率 $\lambda$ が小さいほうが大きくなる傾向があり， $\lambda = 0.1$ のときに最も大きな推進力を発揮した．これは，同じグローサ高さではグローサ厚さ比率が小さいほど沈下量が大きいためである．沈下量が大きいということは土壤に深く貫入することであり，その分せん断される土の量が増えると考えられる．

また，推進力はいずれのグローサ厚さに対してもグローサ高さが高くするのにしたがって増大していき，ある一定の高さを超えると収束し減少に転じる傾向があった．これは，グローサ高さが高くなるほど，スペーシング部分が増えてせん断される土の量が多くなるためであり，一定の高さを超えるとスペーシング部分のシューに土が接しなくなるためである．また，上からの圧力がかからなくなったことでスペーシング部分下の土が破壊され易くなり，推進力が増えなくなると考えられる．

最大推進力を発揮できるグローサ高さ $h$ は，グローサ厚さ比率が小さいほど高くなる．具体的には，砂の場合、 $\lambda=0.1$ のときは $h=5\text{cm}$ ， $\lambda=0.2$ のときは $h=4\text{cm}$ ， $\lambda=0.3$ のときは $h=2\text{cm}$ であった．しかし， $\lambda=0.4$ と $0.5$ では同一の高さ（ $h=1\text{cm}$ ）であった．Sandy loam の場合、 $\lambda=0.1$ のときは $h=8\text{cm}$ ， $\lambda=0.2$ のときは $h=5\text{cm}$ ， $\lambda=0.3$ のときは $h=3\text{cm}$ であった．しかし， $\lambda=0.4$ のときは $2\text{cm}$ ， $\lambda=0.5$ のときは $3\text{cm}$ であった．

結論として，砂と砂壤土では，各々のグローサ厚さ $\lambda L$ で推進力が最大となる適切なグローサ高さが存在し，またシングルグローサシューのピッチに対するグローサ厚さ比率 $\lambda$ が小さくなるにつれて推進力は増加する傾向にあり，砂の場合には，グローサ厚さが最も薄い $\lambda=0.1$ でグローサ高さが $5\text{cm}$ のときに最も大きな推進力を発揮してあった．Sandy loam の場合には，グローサ厚さが最も薄い $\lambda=0.1$ でグローサ高さが $8\text{cm}$ のときに最も大きな推進力を発揮するということが挙げられる．

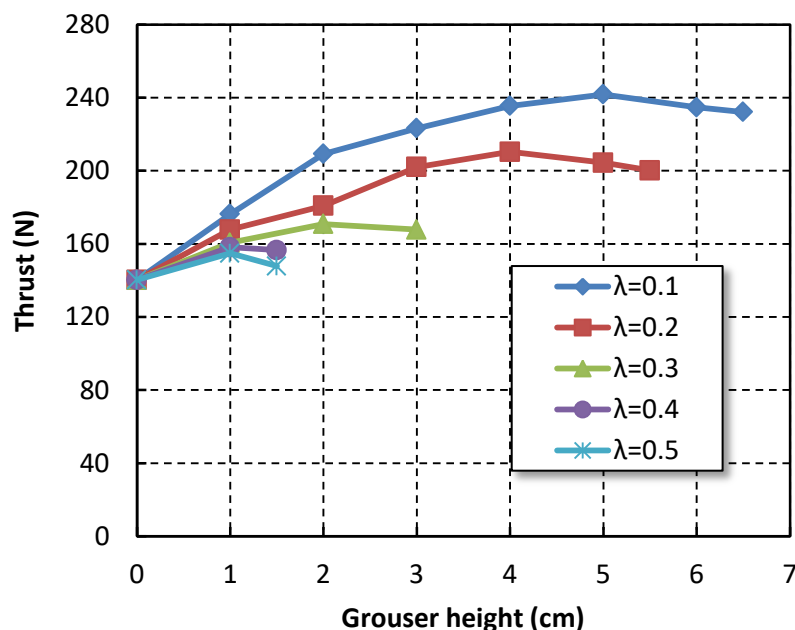


図 5.3 Thrust generated by the grouser shoe in the sand

図 5.4 Thrust generated by the grouser shoe in the sandy loam

#### 5.2.4 転がり抵抗の計測値

実験を基にした転がり抵抗のまとめをエラー! ブックマークが自己参照を行っています。

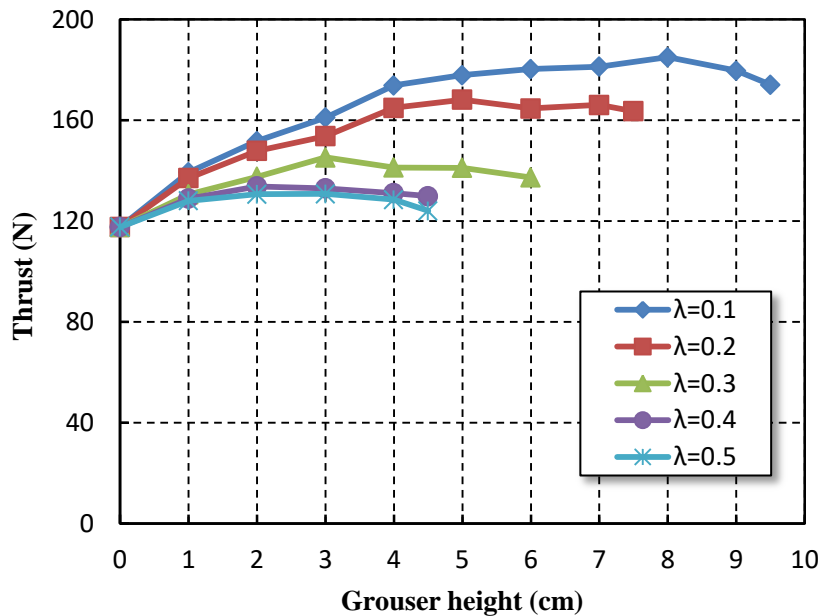
Rolling resistance generated by the grouser shoe in the sand

とエラー! ブックマークが自己参照を行っています。

Rolling resistance

generated by the grouser shoe in the sand

に示す。転がり抵抗は直接計測できないため、式(5.5)で示される抵抗の式に、沈下量および土パラメータの値を代入することにより導出した。

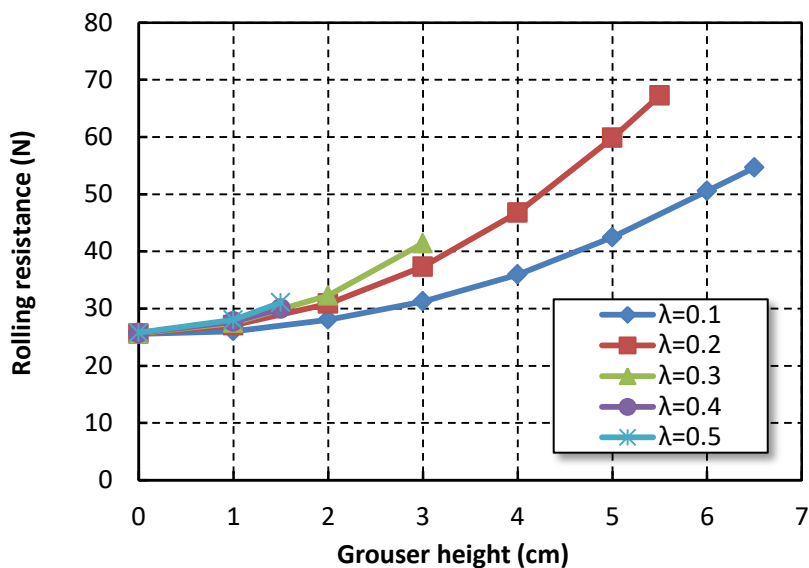


$$R = \frac{k_c + Bk_\phi}{n+1} \left\{ \lambda(z_0 + h)^{(n+1)} + (1-\lambda)z_0^{(n+1)} \right\} \quad (5.5)$$

転がり抵抗は、グローサ厚さ比率 $\lambda$ が大きいほうが大きくなる傾向があり、 $\lambda = 0.5$ のときに最も大きな転がり抵抗がかかった。また、いずれのグローサ厚さ比率に対してもグローサ高さが高くするのにしたがって指数関数的に増大していく傾向があった。これは、グロ



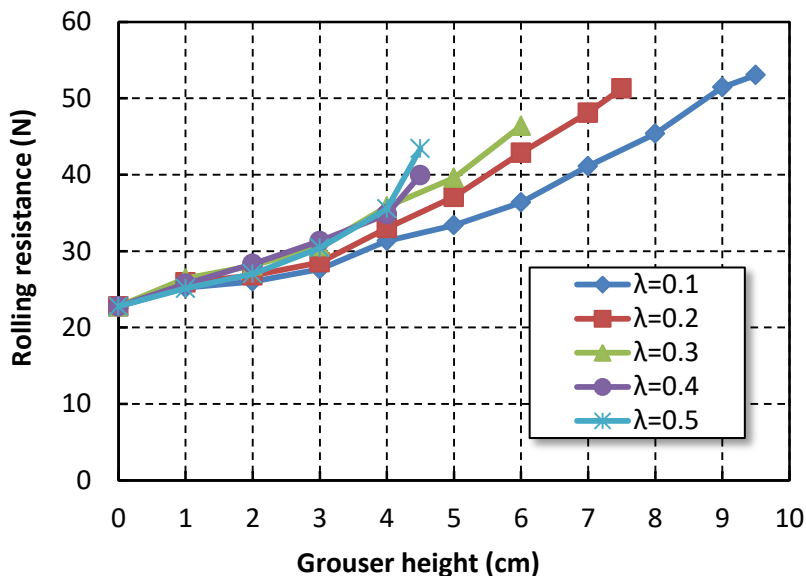
一サ厚さ比率が大きいほど、あるいはグローサ高さが高いほど土の圧縮される量が多くなり、反力が増えるからであると考えられる。



エラー! ブックマークが自己参照を行っています。

Rolling resistance generated

by the grouser shoe in the sand



エラー! ブックマークが自己参照を行っています。

Rolling resistance

generated by the grouser shoe in the sand

Rolling resistance generated by the grouser shoe in the sandy loam



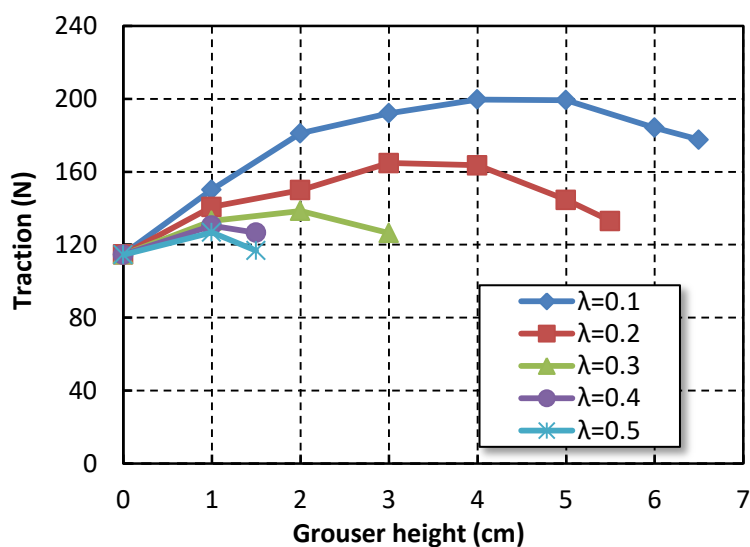
### 5.2.5 牽引力の計測値

牽引力は式(5.6)で示すように推進力から転がり抵抗を引いて導出した。

$$P = F - R \quad (5.6)$$

牽引力は、同じグローサ高さにおいては、グローサ厚さ比率 $\lambda$ が小さいほうが大きくなる傾向があり、 $\lambda = 0.1$ のときに最も大きな牽引力を発揮した。

また、同じグローサ厚さ比率の場合の牽引力は、砂の場合、 $\lambda = 0.1$ では、0cm から 2cm では増加し、2cm から 5cm では横ばいで、5cm 以上では減少していた。 $\lambda = 0.2$ では 0cm から 3cm では増加、3cm 以上で減少、他はグローサ高さを高くするほど牽引力は減少する傾向があった。Sandy loam の場合、 $\lambda = 0.1$ では、0cm から 4cm では増加し、4cm から 8cm では横ばいで、5cm 以上では減少していた。 $\lambda = 0.2$ では 0cm から 4cm では増加、4cm 以上で減少、他はグローサ高さを高くするほど牽引力は減少する傾向があった。砂と sandy loam では、特に高さ $h$ の値が大きくなるにつれて減少幅も大きくなった。推進力の増加よりも転がり抵抗の増加分が大きかったためである。

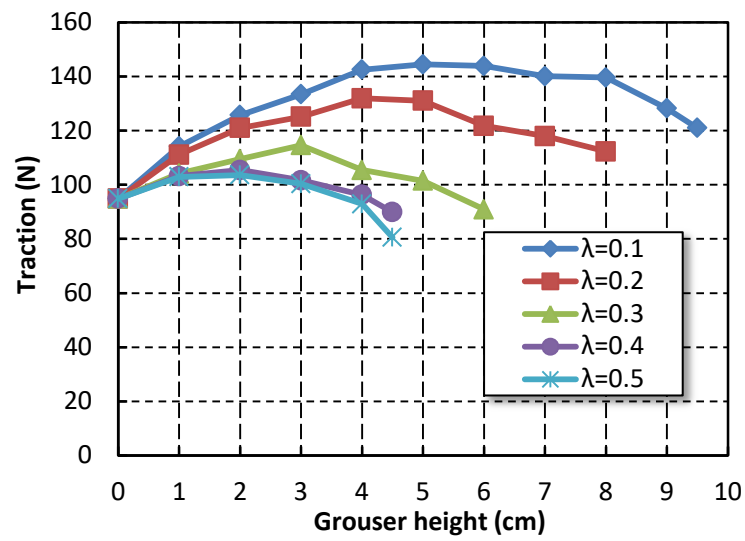


エラー! ブックマークが自己参照を行っています。

Rolling resistance generated

by the grouser shoe in the sand

Traction generated by the grouser shoe in the sand



エラー! ブックマークが自己参照を行っています。 Rolling resistance generated  
by the grouser shoe in the sand  
Traction generated by the grouser shoe in the sandy loam

## 第6章 理論値と計測値の比較

### 6.1 推進力の比較

各々のグローサ厚さによって、推進力の測定結果と 3 次元せん断破壊モデルによる推進力の理論値の比較を行い、その結果をグラフに示す。理論値は図 3.226 と図 3.19 も参考にされたい。図 6.1～図 6.510 はそれぞれ $\lambda=0.1\sim0.5$ に対応する。

理論値と計測値双方で、グローサ厚さ比率 $\lambda$ が小さいほど推進力が大きくなる結果が示された。これはグローサ厚さ比率が小さいほど沈下量は大きくなり、土のせん断量が増えるためであるが、理論値においても傾向が反映されていた。

すべての形状において、推進力の理論値が計測値より大きく示される傾向があった。特に、グローサ高さ $h$ が大きい場合、グローサ厚さ比率 $\lambda$ が大きい場合に理論値が過大評価となった。推進力の理論値はグローサ高さに増加にあわせて直線的に増え続けるが、推進力の計測値は一定の高さをピークにして減少に転じていた。一定の高さを超えるとスペーシング部分のシューに土が接しなくなることで摩擦力が小さくなり、上からの圧力が無くなることでスペーシング部分下の土が破壊され易くなるが、推進力の予測値ではほとんど考慮できなかったと考えられる。

よって、3 次元せん断破壊モデルによる推進力の理論解析では、同じグローサ高さではグローサ厚さ比率が小さくなるほど推進力が大きくなることが示された。しかし、同じグローサ厚さ比率において最大推進力を示すグローサ高さが存在することは確認できなかった。

### 6.2 転がり抵抗の比較

転がり抵抗の測定結果と 3 次元せん断破壊モデルによる理論値を以下のエラー! 参照元が見つかりません。1～エラー! 参照元が見つかりません。に示す。それぞれ $\lambda=0.1\sim0.5$ に対応する。

グローサ厚さ比率 $\lambda=0.1$ では、すべてのグローサ高さにおいて転がり抵抗の理論値が計測値より大きかった。理論値での沈下量が実際の沈下量より大きかったことが原因と考えられる。正確な沈下量を出すためには土壌密度や土壌表面の高さが一様な土壌を用いる必要があるが、理論値では土全体が土壌パラメータに当てはまる状態の一様な土壌をせん断したときの沈下量である。実験では推進力測定で破壊した土を再度ならして利用しており、一様な状態とはいえないからである。もっとも、実際の土壌（畑など）も一様ではないため、誤差が出ることを想定して考える必要がある。グローサ高さを高くすることで転がり抵抗が漸増する傾向は理論値、計測値とともに確認できた。

グローサ厚さ比率 $\lambda=0.2\sim0.5$ においては、転がり抵抗の理論値および計測値はほぼ一致した。グローサ高さを増加することで転がり抵抗が漸増した。

よって、3次元せん断破壊モデルによる転がり抵抗の理論解析では、グローサ厚さ比率が大きいほど、グローサ高さが高いほど増加することが示された。転がり抵抗の理論値の妥当性については、均一性ある土壌を用意する課題はあるものの、示されたと考えられる。

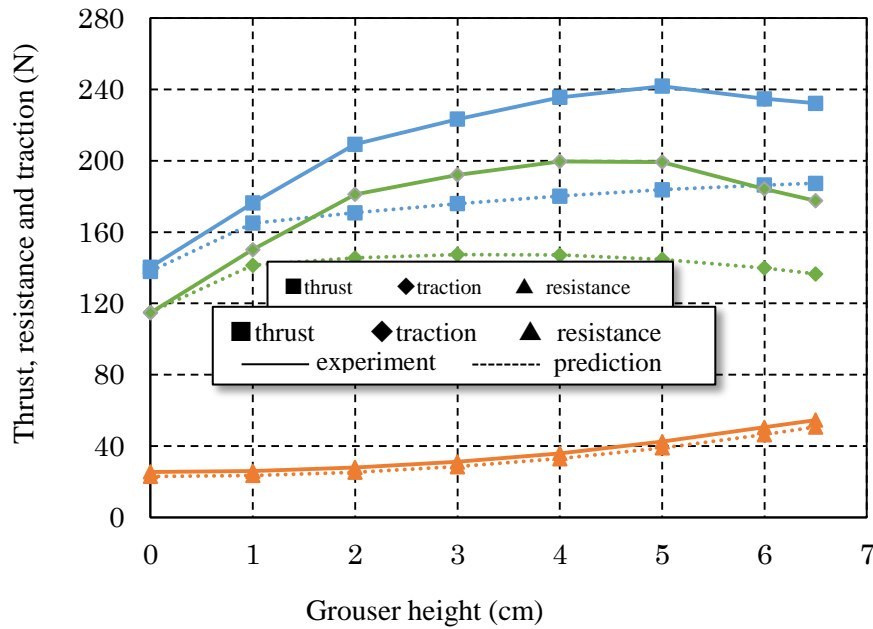


図 6.1 Experimental and predictive results in the sand ( $\lambda=0.1$ )

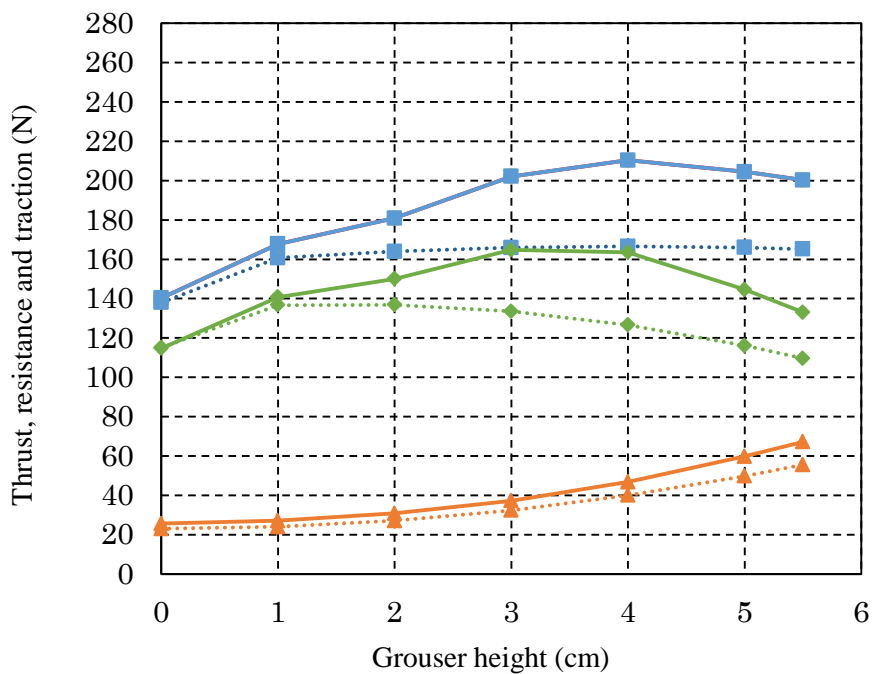


図 6.2 Experimental and predictive results in the sand

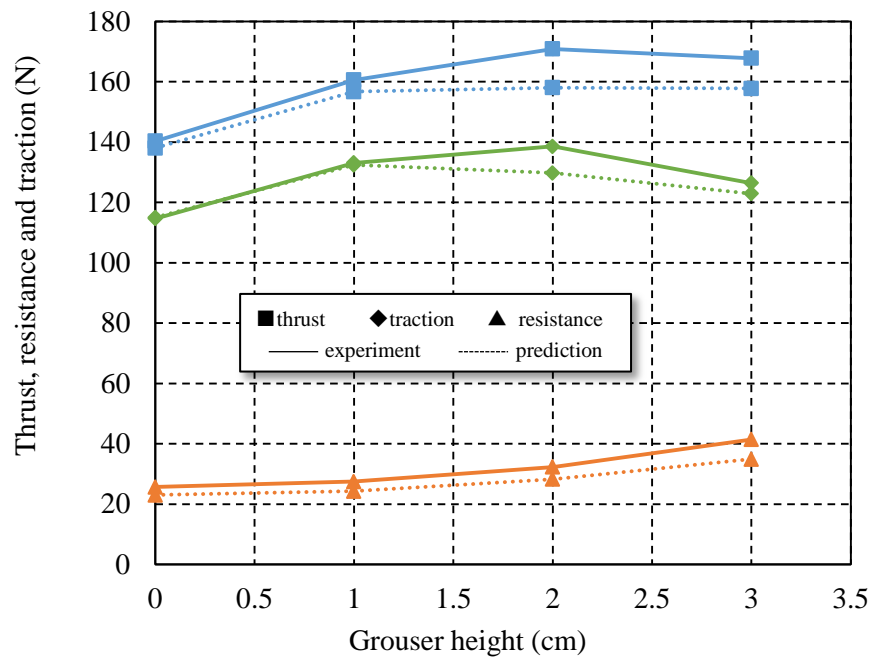


図 6.3 Experimental and predictive thrust, resistance and traction in the sand ( $\lambda=0.3$ )

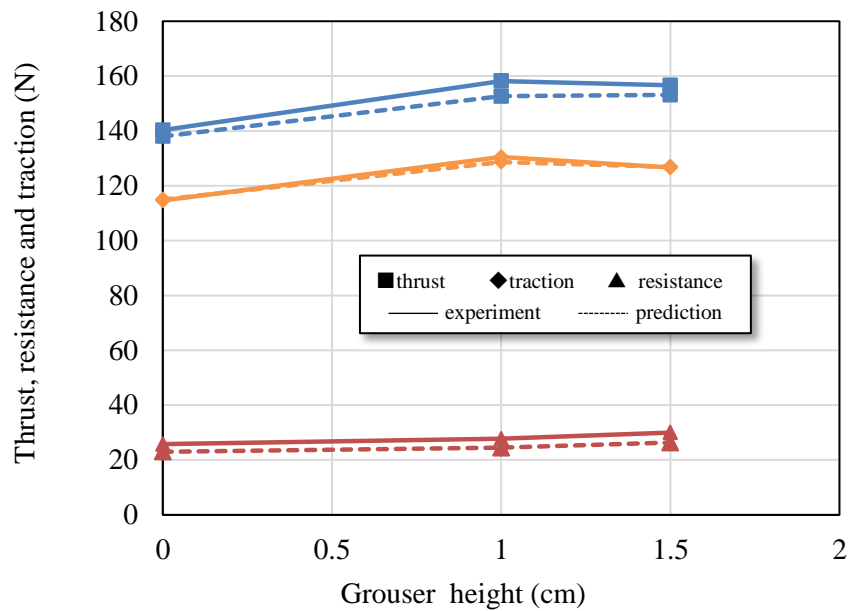


図 6.4 Experimental and predictive thrust, resistance and traction in the sand ( $\lambda=0.4$ )

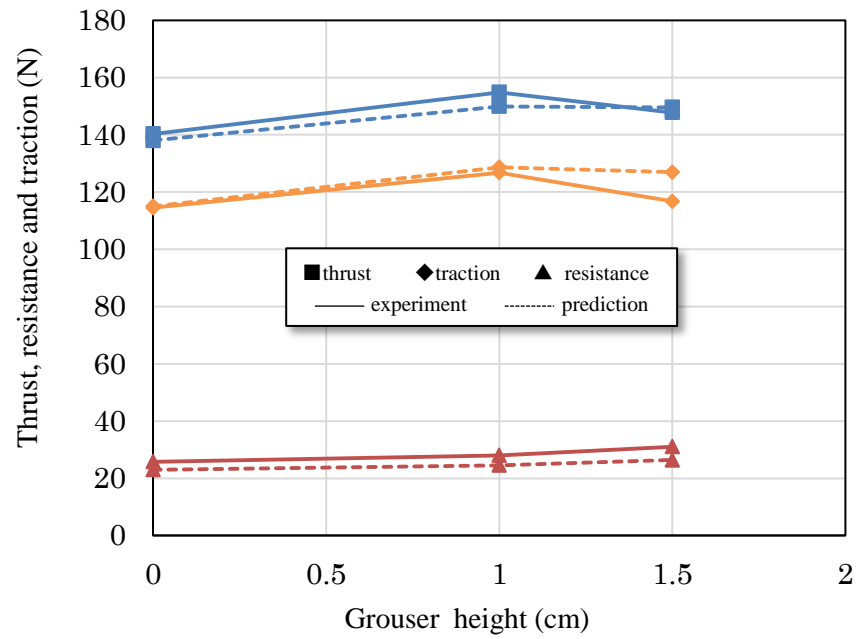


図 6.5 Experimental and predictive thrust, resistance and traction in the sand ( $\lambda=0.5$ )

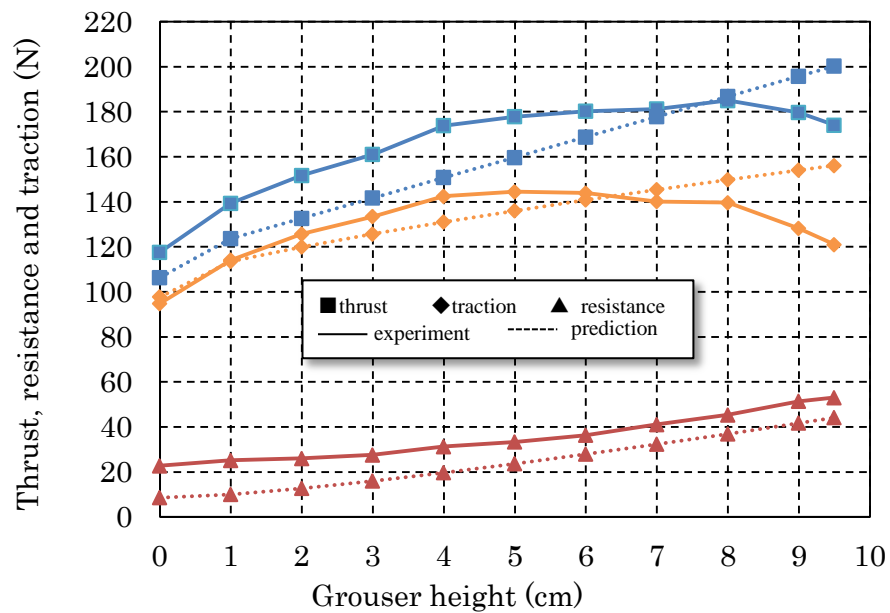


図 6.6 Experimental and predictive thrust, resistance and traction in the sandy loam ( $\lambda=0.1$ )



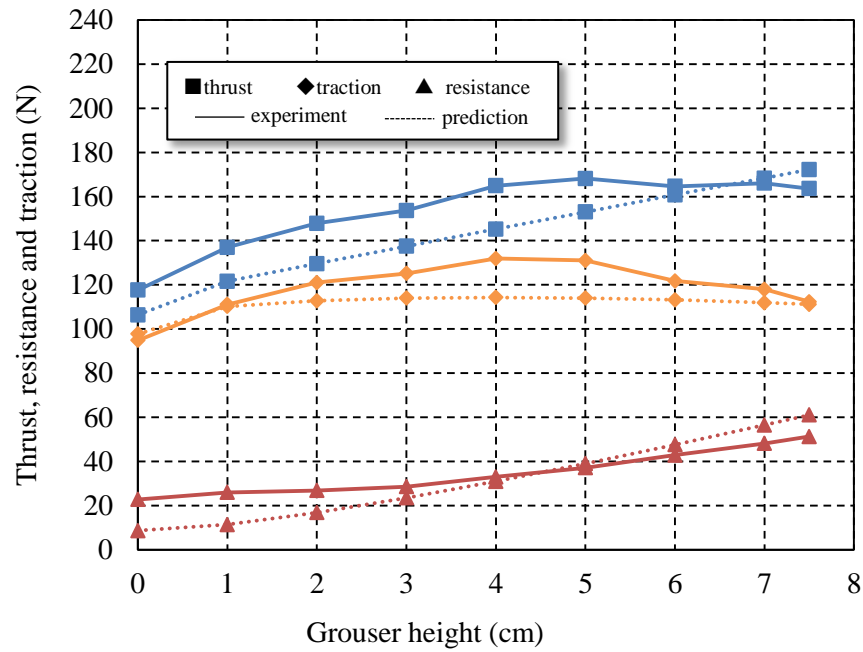


図 6.7 Experimental and predictive thrust, resistance and traction in the sandy loam ( $\lambda=0.2$ )

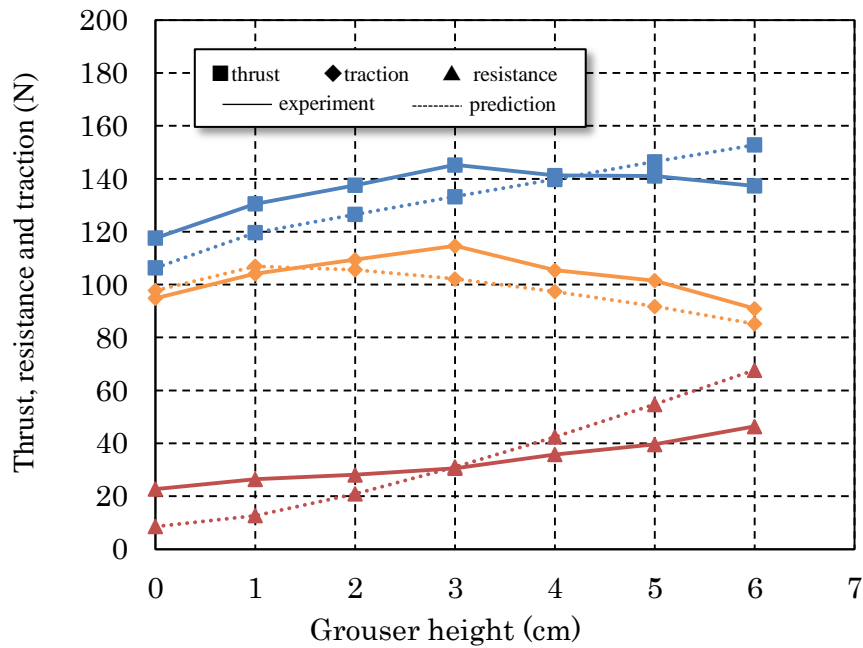


図 6.8 Experimental and predictive thrust, resistance and traction in the sand loam ( $\lambda=0.3$ )

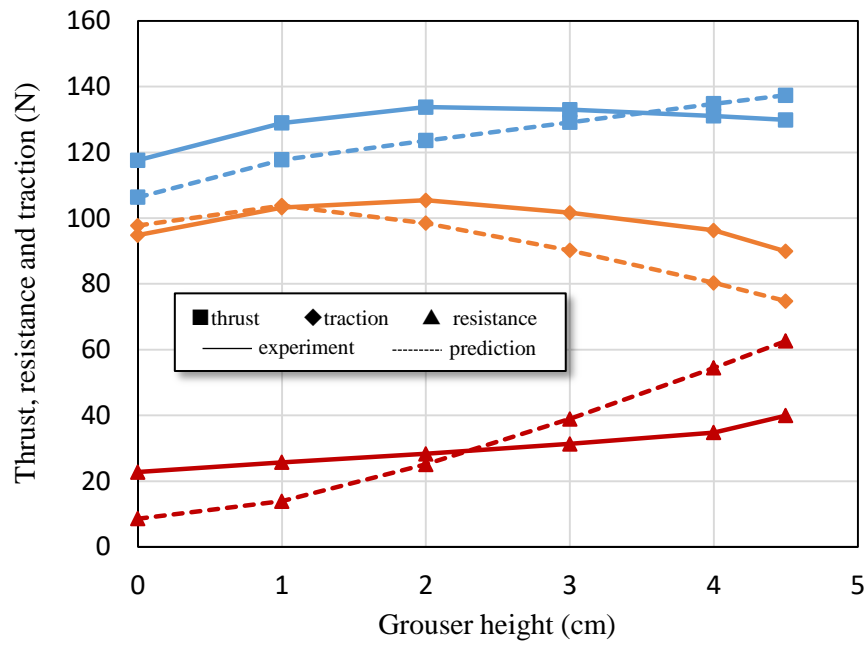


図 6.9 Experimental and predictive thrust, resistance and traction in the sand loam ( $\lambda=0.4$ )

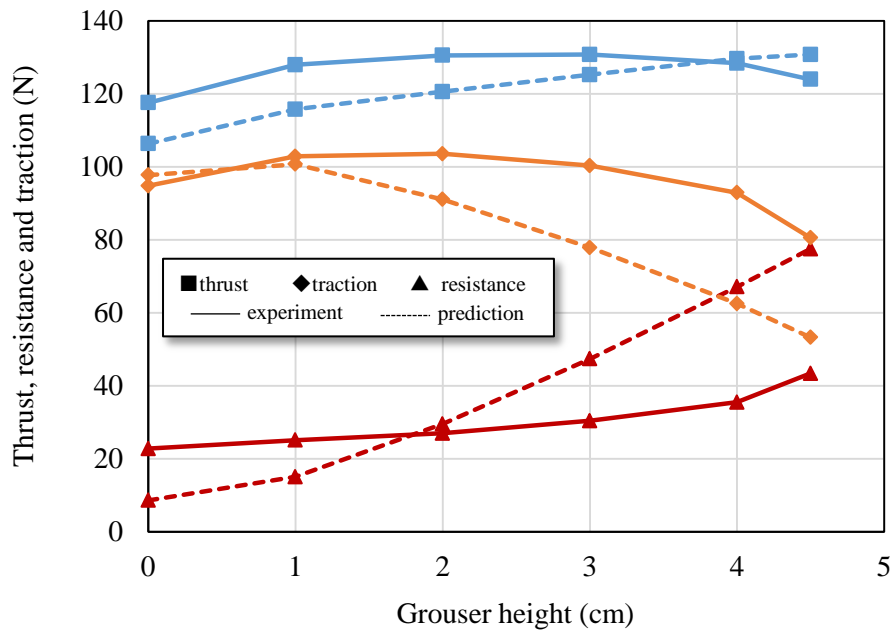


図 6.10 Experimental and predictive thrust, resistance and traction in the sand loam ( $\lambda=0.5$ )

### 6.3 牽引力の比較

転がり抵抗の測定結果と 3 次元せん断破壊モデルによる理論値を以下のエラー! 参照元が見つかりません。～エラー! 参照元が見つかりません。0 に示す。それぞれグローサ厚さ比率 $\lambda=0.1\sim0.5$ に対応する。

いずれのグローサ厚さにおいても、牽引力の理論値が計測値より大きくなる傾向があった。特にグローサ厚さ比率が大きい場合、グローサ高さが高い場合に大きくなった。転がり抵抗に近い値を示していたため、推進力の誤差が牽引力に現れた。グローサ厚さ比率 $\lambda=0.1, 0.2$  で高さ $h=1\sim2\text{cm}$ における値はほぼ一致していた。

グローサ厚さ比率が $\lambda=0.1$ の場合の牽引力はグローサ高さが高くなるにつれて理論値では増加するのに対して計測値では減少していた。グローサ厚さ比率が $\lambda=0.2\sim0.5$ の場合は、理論値と計算値双方でグローサ高さが高いほど牽引力が小さくなり、グローサ厚さ比率が大きいほど減少幅が大きくなる傾向が確認できた。

## 第7章 結語

### 7.1 結言

本研究では、シングルグローサシューの形状による牽引性能への影響について、予測モデルを用いて究明した。グローサシューピッチに対するグローサ厚さ比率  $\lambda$  ならびにグローサ高さ  $h$  を変化させることによる推進力、転がり抵抗および牽引力への影響について、3次元せん断破壊モデルを用いて検討した。

その結果、以下のことが明らかになった。

- 1) 理論値では、グローサ厚さ比率が小さいほど推進力が大きくなり、転がり抵抗は小さくなる。よってグローサ厚さ比率が小さいほど牽引力が大きくなる。
- 2) 同じグローサ厚さ比率においては、推進力はグローサが高いほど直線的に増加する傾向がある。転がり抵抗はグローサ高さが高いほど指数関数的に増加する。牽引力は、グローサ厚さが $\lambda=0.1$ と薄い場合はグローサ高さが高くなるにつれて増加するが、グローサ厚さが $\lambda=0.2\sim0.5$ の場合は、グローサ高さが高くなるにつれ減少する。また、グローサ高さが高くなるにつれて牽引力の減少幅が大きくなる。

また、実際のオフ・ロード車両に装着されるクローラを構成するグローサシューを参考にしたグローサシューモデルによる推進力測定実験も行い、推進力、転がり抵抗を計測し、牽引力を算出した。

- 3) 計測値では、グローサ厚さ比率が小さいほど推進力が大きくなり、転がり抵抗は小さくなる。グローサ厚さ比率が小さいほど牽引力が大きくなる。
- 4) 同じグローサ厚さ比率においては、推進力はグローサ高さが高くなるにつれて最初は増加するが、ある高さでピークをむかえてそれから減少する。グローサ厚さ比率が大きいほど最大推進力を発揮するグローサ高さが低くなる。転がり抵抗は、グローサ高さが高くなるにつれ指数関数的に増加する。牽引力は、グローサ高さが高くなるにつれ減少する傾向があり、グローサ厚さ比率が大きいほど牽引力の減少幅が大きい。

理論値と計測値の比較から、

- 5) 3次元せん断破壊モデルは、グローサ厚さと牽引性能の関係を示しており、グローサ厚さ比率が小さいほど牽引性能を発揮することが確認できた。
- 6) 推進力の理論値は計測値より大きく示される傾向があった。グローサ厚さ比率が大きい場合やグローサ高さが高い場合に理想通りに破壊されていないと考えられる。厳密な破壊を考慮するためには予測モデルの見直しが必要である。

## 7.2 今後の課題

本研究では、3次元せん断破壊モデルによる予測の妥当性についての課題が出た。推進力および牽引力の理論値が計測値より大きくなる傾向があった。牽引力は推進力から転がり抵抗を引くことにより得られる値であり、転がり抵抗はほぼ一致していたことから推進力の値に問題があると考えられる。3次元せん断破壊モデルでは、グローサの両側面が土同士の部分も含めて真四角に破壊されることを考慮している。しかし、実際のせん断破壊では限られた容器内における土の逃げ場のことを考慮しなければならず、破壊断面が四角形になっているとは限らない。推進力測定試験でせん断破壊後に実験装置を止め、真上に持ち上げることで破壊跡が残るため、跡の形状を測定することにより実際の破壊状態の考慮が可能である。

本研究で用いた土壌が一種類であり、他の土壌についても考慮が必要になる。含水比や粘着力による牽引性能への影響を考えたい。また、制約のあるグローサモデルによる実験ではなく、実際のグローサシューならびに農地を用いた実験を行い、牽引性能を考慮することも考えられる。

## 謝辞

本修士論文を作成するにあたり，王秀崙教授，鬼頭孝治准教授をはじめとする環境情報システム工学講座の諸先生方に多大なるご指導，ご支援を賜り，ここに厚く御礼申し上げます．

特に，指導教官の王秀崙教授には，力学の基礎から論文の書き方まで幅広く，丁寧にご指導していただき感謝の気持ちでいっぱいです．

また，研究室の皆様にも多大なるご協力をいただき，深く感謝の意を表します．

今後もしもご指導，ご鞭撻の程よろしくお願いします．

平成28年9月 記

三重大学大学院 生物資源学研究科

共生環境学専攻 環境情報システム工学講座

エネルギー利用工学研究室

顧 楠

## 参考文献

- (1) IPCC第4次評価報告書,2007.  
全国地球温暖化防止活動推進センターウェブサイト (<http://www.jccca.org/>) より
- (2) 国土交通省 自動車燃費一覧 (H25.3) ,2013.
- (3) 履帯設計指針作成委員会編: 履帯の設計工学－履帯設計と性能予測の基礎－,第一章, テラメカニックス研究会,2000.
- (4) 田中 孝・笈田 昭: 車両・機械と土系の力学,pp1-52,pp166-178,pp223-229,学文社,1993.
- (5) 室 達郎: テラメカニックス,技報堂等生成堂出版,pp118,1993.
- (6) D.R.P.Hettiaratchi,B.D.Witney and A.R.Reece: The calculation of passive in two-dimensional soil failure,J.agric.Engng Res.,11(2),pp89-107,1966.
- (7) R.N.ヤン,E.A.ファタ,N.スキアダス著,北野昌則訳:オフロード車両の走行力学,技術教育研究社,1986.
- (8) 杉山 昇: 建設機械と土の諸問題,pp65-88,99,105-122,鹿島出版会,1982.
- (9) 田中 孝 他共著: 農業動力学. 新版,文永堂出版,1991.
- (10) 赤井 浩一: 土質力学,朝倉土木工学講座,1966.
- (11) 林 磐男: タンクテクノロジー,山海堂,1992.
- (12) 土木工学会編: 土の試験実習, 土木工学会,1991.
- (13) 王 秀崙: ラグ車輪と土との相互作用に関する研究,京都大学博士論文,1990.
- (14) 杉山 昇: pp105,1982.
- (15) 杉山 昇: pp108,1982.
- (16) V.V.Guskov: Effect of forward speed on the drawbar performance of a track-laying tractor. Jour. Agric. Engng. Research, 13(3).203-209,1968.
- (17) A.R.Reece:Overland transport without reads. Jour. Terrmech., 11(2), 37-47,1974.
- (18)田中 孝・笈田 昭:,pp51-52, 1993.
- (19) M.G.Bekker:Off-the-Road Locomotion. The University of Michigan Press, Ann Arbor,1960.
- (20) E. McKyes: Soil Cutting and Tillage, Elsevier Science Ltd, 1986.
- (21)杉山 昇: pp55,1982.
- (22) 森口 繁一, 伊理 正夫, 武市 正人:C による算法通論,東京大学出版会, pp.84-86 (二分法の説明) ,1992.
- (23) Zoltan Janosi, Ben Hanamoto: Analytical determination of drawbar pull as a unction of slip for tracked vehicles, Transaction of ASAE,1961.
- (24) A.R.Reece: The fundamental equation of earth-moving mechanics. Symp. on earthmoving Mach. Auto. Div., Institute of Mechanical Engineers, 1965.
- (25) Braja M.Das:Soil Mechanics,The Iowa State University Press,153-202,1979.
- (26) E. McKeys, O.S. Ali : The cutting of soil by narrow blades, Jour. Agric. Engng. Research, 9(1), 3-31,1964.
- (27) クボタ(株),クボタ農業機械用クローラ寸法及びカタログ
- (28) ヤンマーディーゼル(株), ヤンマーディーゼル農業機械用クローラ寸法及びカタログ
- (29) コマツ(株),コマツ建設機械用鉄クローラ寸法及びカタログ

## 付録 3 次元せん断破壊モデル

3次元せん断破壊モデルの理論値はC言語で算出した。以下にプログラムを掲載する。

```
#include "stdafx.h"
#include "stdio.h"
#include "stdlib.h"
#include "math.h"
#include <float.h>

#define PI 3.141592
#define j_max 90
double dNr[j_max];
double Nr1[j_max];
double Nr2[j_max];
#define g_max 200
double g[g_max];

double gamma, fai, derta, alfa, C, Ca, Kc, Kfi, N, L, B, W, T;

double Ka, q2;
double ramda, Z0;

double h;
double f(double x) {
    return
(Kc/B+Kfi)*B*L*(pow((h+x), N)*ramda+pow(x, N)*(1-ramda))-W;
}

void main(void)
{

    FILE *fp_w; //牽引力計算
    FILE *fp_ww; //Z0判定
    FILE *fp_wf; //F4検証
```



```

char Filepath[500] , SaveFilepath[500] , Foldername[300] ,
Filename[100], SaveFilepath2[500];
char SaveFilepath3[500];

int nFlag;
int nCommand;

double Dfai, Dderta;

double F, F1, F3, F4, Fsg1, Fsg2, Fss, R, P;
double F0, F10, F30, F40, Fsg10, Fsg20, Fss0, R0, P0;

nFlag = 1;

while( nFlag > 0 ){

printf(“¥n3次元せん断破壊モデルです¥n”);
printf(“<< 1 >> : input parameter ¥n”);
printf(“<< 10 >> : calc ¥n”);
printf(“<< 99 >> : exit ¥n”);

printf(“¥ncommand = ”); scanf(“%d”, &nCommand);

switch( nCommand ){

case 1:
ganma=0.00109;//密度
Dfai=20.2;//内部摩擦角
fai = Dfai * PI / 180;
Dderta=19.6;//外部摩擦角
derta = Dderta * PI / 180;
alfa = PI / 2;

C=0.0013;//粘着力

```

```

Ca=0.0021;//付着力
Kc=0.0243;//土壌係数
Kfi=0.2025;//土壌係数
N=0.2281;//沈下係数
L=9;B=15;W=22.5;T=3;

break;

case 10:

    /*グローサ厚さλ指定（場所変えました）*/
    printf("λramda = "); scanf("%lf", &ramda);

    /*出力先ファイルパス入力*/
    printf("folder path (e.g. C:/programming/output)¥n="
);scanf("%s", Foldername);
    printf("file name= ");scanf("%s", Filename);

    sprintf(SaveFilepath, "%s/%s%.1lf_result.csv", Foldername, Filename, ramda);

    sprintf(SaveFilepath2, "%s/%s%.1lf_zresult.csv", Foldername, Filename, ramda);

    sprintf(SaveFilepath3, "%s/%s%.1lf_F4result.csv", Foldername, Filename, ramda);

    //sprintf(SaveFilepath, "D:/3D_result.csv");

    if( (fp_w = fopen(SaveFilepath, "wt") ) == NULL ){
        printf("cannot save");
        exit(1);
    }

    //sprintf(SaveFilepath2, "D:/3D_z.csv");

    if( (fp_ww = fopen(SaveFilepath2, "wt") ) == NULL ){
        printf("cannot save");

```

```

        exit(1);
    }

    if( (fp_wf = fopen(SaveFilepath3, "wt") ) == NULL ){
        printf("cannot save");
        exit(1);
    }

    //data output

    F=0.0;
    F1 = 0.0;
    F3 = 0.0;
    F4 = 0.0;
    R = 0;
    P = 0;

    Ka=tan((PI/4)-(fai/2));

    fprintf(fp_w, "result, ramda, %lf\n", ramda);
    fprintf(fp_w, "h, F, F1, F3, F4, R, P, Z0\n");

    fprintf(fp_ww, "h, xi, f(xi), xi1, f(xi), xi2(Z0), f(xi)\n", h);

    fprintf(fp_wf, "h, F4, Fsg1, Fsg2, Fss, q2\n");

    //printf("---result %.1lf--- \n", ramda);
    //printf("h, F, F1, F3, F4, R, P\n");

    //h=0の場合
    double t, Z0;
    t=W/((Kc/B+Kfi)*B*L);
    Z0=pow(t, (1/N));
    fprintf(fp_ww, "0, , , , %lf, \n", Z0);

```

```

F10 = ramda*L*B*(Ca+(Kc/B+Kfi)*pow(Z00,N)*tan(derta));

F30 =
L*B*(1-ramda)*(Ca+(Kc/B+Kfi)*pow(Z00,N)*tan(derta));

Fsg10 = 0;

if (Z00>=T)
{Fsg20=L*(Ca+Ka*Ka*ganma*tan(derta)*(2*Z00-T)/2)*T;}
else

{Fsg20=L*(Ca+Ka*Ka*ganma*Z00*tan(derta)/2)*Z00;}

Fss0=0;

F40 = (Fsg10+Fsg20+Fss0)*2;

F0 = F10 + F30 + F40;
R0
=((Kc+Kfi*B)/(N+1))*(ramda*pow(Z00,N+1)+(1-ramda)*pow(Z00,N+1));

P0 = F0 - R0;

fprintf(fp_w, "0, %lf, %lf, %lf, %lf, %lf, %lf, %lf\n", F0, F10,
F30, F40, R0, P0, Z00);

fprintf(fp_wf, "0, %lf, %lf, %lf, %lf\n", F40, Fsg10, Fsg20,
Fss0);

//printf("0, %lf, %lf, %lf, %lf, %lf, %lf\n", F0, F10, F30,
F40, R0, P0);

//高さ・推進力・推進力分力(3力)・転がり抵抗・牽引力・
沈下量出力

//h=0.5~
for (h=0.5;h<=15;h=h+0.5) {

```

```

// z0 calculation

double xi=0, xi1=10.0; //初期値xi, xi1 (xi<xi1)
double xi2, e=0.001, nmax=100000; //2点直線とx軸交点, 収束判定値, 反復最大回数

if( f(xi)*f(xi1)>0 ) { //初期値の適正確認
    printf("f(xi)<0<f(xi1) or f(xi)>0>f(xi1) となるxi, xi1 (xi<xi1)を入力してください.
¥n");
    break;
}

for(int i=1; i<nmax; i++ ) { //2分法
    xi2=(xi+xi1)*0.5;

    if(f(xi)*f(xi2)>0) {
        xi=xi2;
    }
    else{
        xi1=xi2;
    }

    if( fabs(xi-xi1)<e ) {break;} //収束判定
}

fprintf(fp_ww, "%lf, ", h);
fprintf(fp_ww, "%lf, %lf, ", xi, f(xi));
fprintf(fp_ww, "%lf, %lf, ", xi1, f(xi1));
fprintf(fp_ww, "%lf, %lf¥n", xi2, f(xi2));
//xi2=Z0 コピペ

Z0=xi2;

//fprintf(fp_ww, "Z0=%lf¥n", Z0);

F1 = ramda*L*B*(Ca+(Kc/B+Kfi)*pow(h+Z0, N)*tan(derta));

```

```

F3 =
L*B*(1-ramda)*(C+(gamma*h+(Kc/B+Kfi)*pow(Z0,N))*tan(fai));

Fsg1 =
ramda*L*(Ca+Ka*Ka*gamma*tan(derta)*(2*Z0+h)/2)*h;

if (Z0>=T) {

Fsg2=L*(Ca+Ka*Ka*gamma*tan(derta)*(2*Z0-T)/2)*T;
}
else {
Fsg2=L*(Ca+Ka*Ka*gamma*Z0*tan(derta)/2)*Z0;
}

q2=(Kc/B+Kfi)*pow(Z0,N);

Fss=(1-ramda)*L*(C+Ka*tan(fai)*(q2*Ka+gamma*Ka*(2*Z0+h)/2-2*C))*h;

F4 = (Fsg1+Fsg2+Fss)*2;
F = F1 + F3 + F4;
R
=((Kc+Kfi*B)/(N+1))*(ramda*pow(h+Z0,N+1)+(1-ramda)*pow(Z0,N+1));

P = F - R;

fprintf(fp_w, "%lf, %lf, %lf, %lf, %lf, %lf, %lf, %lf\n", h, F,
F1, F3, F4, R, P, xi2);

fprintf(fp_wf, "%lf, %lf, %lf, %lf, %lf, %lf\n", h, F4, Fsg1,
Fsg2, Fss, q2);

//printf("%lf, %lf, %lf, %lf, %lf, %lf, %lf\n", h, F, F1, F3,
F4, R, P);

//高さ・推進力・推進力分力(3力)・転がり抵抗・牽引力・
沈下量を出力
}

```

```
fclose(fp_w);
fclose(fp_ww);
fclose(fp_wf);

break;

case 99:
    nFlag = -1;
    break;
}

}

}
```