

## トラクタタイヤ接地面積の3次元計測に関する研究

全 亨奎\*<sup>1</sup>・谷口哲司\*<sup>1</sup>・大友功一\*<sup>1</sup>・岸本 正\*<sup>1</sup>・大山 毅\*<sup>1</sup>

## 要 旨

タイヤ性能を改善し土壌踏圧を解明するための基礎研究として、タイヤ変形を考慮しての接地面積計測方法を確立した。走行時のタイヤ断面形状を楕円で近似し、タイヤのラジアル方向および横方向変形量、沈下量、踏面長さ等の測定値から、タイヤ走行時の3次元接地面積を求めた。また、レーザセンサ距離計により土壌面上部定位置から踏圧面までの距離をメッシュ状に測定できる土壌変形計測装置を開発し、タイヤ静荷重時の3次元接地面積を求めた。これより、静荷重時接地面積は走行時の約1.3倍となった。さらに、同装置により静荷重時の土壌深さの違いによる土壌変形量を測定した。その結果、変形前の土壌の10cmより浅い土壌層にラグによる土壌変形がみられた。

[キーワード] タイヤ変形, 土壌踏圧, 接地面積, 土壌変形, 空気圧, トラクタタイヤ, ラジアルタイヤ

## Determination of the Three Dimensional Contact Area between Tractor Tire and Soil

Hyung-gyu JUN\*<sup>1</sup>, Tetsuji TANIGUCHI\*<sup>1</sup>,  
Ko-ichi OHTOMO\*<sup>1</sup>, Tadashi KISHIMOTO\*<sup>1</sup>,  
Tsuyoshi OHYAMA\*<sup>1</sup>

## Abstract

Methods for the determination of 3-D contact area between a tire and soil were presented to improve tire performance and to clarify soil compaction. The contact area during tire operation on the soil was calculated with radial, lateral and longitudinal deflections of the tire and the sinkage. The device with a laser sensor was developed to measure the distances from a fixed position to soil surface for the calculation of contact area under static condition. The contact area under static condition was 1.3 times as that under operating condition. The soil deformations in specific soil depth were measured with the device. The effect of tire lug on soil deformation was recognized in the layer shallower than 10 cm of initial soil condition.

[Keywords] tire deformation, soil compaction, contact area, soil deformation, inflation pressure, agricultural tractor tire, radial tire

\*1 会員, 帯広畜産大学畜産学部 (〒080 帯広市稲田町西2線11番地 ☎0155-49-5520) Faculty of Agriculture and Veterinary Medicine, Obihiro Univ. of Agriculture and Veterinary Medicine, Nishi 2-11, Inada-cho, Obihiro, 080 Japan

## I 緒 言

北海道の畑作地帯や草地酪農地帯のようにトラクタおよび各種作業機械の大形化が進むと、トラ

クタ等の農用車両がほ場を走行することによって土壌が締固められ、ほ場環境の悪化が憂慮されている。この土壌の締固め、つまり土壌踏圧の問題を解決するには様々な観点から取り組む必要があるが、農業機械分野では車両のパラメータと土壌踏圧との関係を明らかにすることで土壌踏圧のメカニズムを解明し、土壌踏圧を低減する方法を確立する必要がある。一般的には接地面積を増加すれば、土壌踏圧(タイヤ走行による土壌密度(dry bulk density)増加など)が小さくなると報告されている<sup>1)</sup>。土壌踏圧を測定し、定量的に把握することができれば、土壌踏圧現象と農用車両との関係を明らかにするための基礎データになると考えられる<sup>2)</sup>。さらに、接地面積はタイヤ接地面での応力分布と関係があり、トラクタタイヤの場合は、けん引性能に係る重要な要素である。特に、動荷重時の接地面積がわかれば車両作業時のタイヤのけん引力、推進力、トルクおよびころがり抵抗などを接地圧とともに計算が可能となる<sup>3)</sup>。

タイヤ変形および土壌変形の発生には様々な要因があり、タイヤでは空気圧、荷重、タイヤの強度、走行速度等が、土壌では、土性、土壌強度等が考えられる。タイヤ変形を利用した接地面積測定器が過去に種々開発された。Krick<sup>4)</sup>、Yuら<sup>5)</sup>は走行中のタイヤのラジアル方向および横方向変形量を、Freitagら<sup>6)</sup>は、タイヤ踏面の中心での変形量を測定するための測定装置を開発し、空気圧、滑り率と土壌強度の違いによるタイヤ変形量を測定した。Abeels<sup>7)</sup>はカーカス部分の膨らみによるタイヤ変形量を測定するための測定器を開発し、硬軟両面上で荷重と空気圧による接触面でのタイヤ接地幅、接地長さ、接地面積とみかけの密度の変化との関係を表した。Blaszkiwicz<sup>8)</sup>はタイヤのラジアルおよび横方向変形量と踏面長さを用いて、2次元接地面積を計測するモデルを示した。Wulfsohnら<sup>9)</sup>は土壌表面にひもを置いてタイヤ走行後、轍の端面の変形から3次元接地面積を求めた。土壌変形に関して、Komandi<sup>10)</sup>はタイヤによる接地面積と轍形状を測定するため、走行中のタイヤを停止し、タイヤを持上げ、土壌に残った轍形状を測定した。柏寄ら<sup>11)</sup>はほ場面形状を非接触で計測するデバイスとして超音波距離計を用い、3次元形状計測システムを作成した。

本研究では動荷重時と静荷重時の接地面積を3次的にそれぞれ次のように求めた。タイヤのラジアル方向および横方向変形量、踏面長さおよびタイヤ接地角を測定し、これらから動荷重時の接地面積を算出した。土壌に残るタイヤ跡はレーザアナログセンサ距離計を用いて測定し、これらから静荷重時の接地面積を算出した。次に、タイヤ荷重と空気圧の違いが接地面積に与える影響について検討した。

深さ毎の土壌変形量は、所定の深さ毎にアルミニウム箔を埋めタイヤを所定の静荷重で土壌に作用させ、それぞれの深さの変形量を測定し、タイヤが土壌変形にどのような影響をおよぼすかを検討した。

## II タイヤ変形量による動荷重時3次元接地面積の計算

### 1. 動荷重時の3次元接地面積の定義

#### (1) 動荷重時の3次元接地面積

動荷重時の3次元接地面積とはタイヤが回転しているとき、ある瞬間において、タイヤが土壌に接触している表面積をいう。

タイヤが回転している時には、タイヤの轍跡を利用して接地面積を測定することは困難である。本研究では、測定が可能であるタイヤラジアル方向および横方向変形量とタイヤ沈下量を利用して、また、変形したタイヤ断面形状を楕円と仮定して<sup>8)</sup>、動荷重時3次元タイヤ接地面積を算出する。

#### (2) 接地面長さ

車輪が回転している場合、土壌変形はタイヤの回転とともに進行する。図1に示したように、A地点から土壌の締固めが始まってB地点で終わるが、車軸直下以後はある程度土壌の弾性回復が発生することも考えられる。つまり、本研究で用いた『接地面長さ』とは、実際にタイヤ外周の任意の点が土壌に接触した時から、土壌から離脱するまでの点を直線で結んだ長さで、図1の $\overline{AB}$ である。実際の沈下量は $\overline{AB}$ からラグの先端までの距離とする。

### 2. 動荷重時3次元接地面積の計算式

#### (1) タイヤ接地角 $\theta$ での沈下量の計算方法

図1に示したように、タイヤ外周の任意の1点Aが接地してからタイヤが回転することによるA点

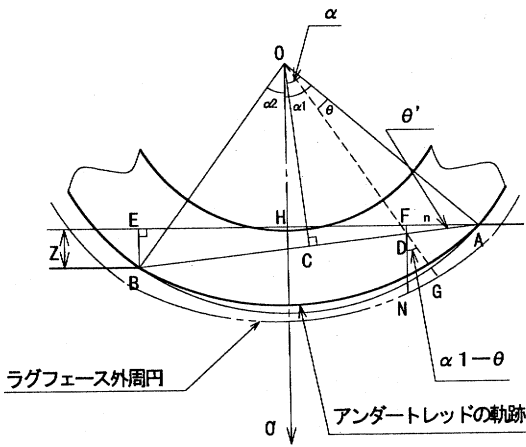


図1 タイヤ接地角  $\theta$  での幾何学的な関係  
Fig.1 Geometrical relationships defining  $\theta$  position of a tractor tire

の回転角を接地角  $\theta$  とする。

タイヤ変形を利用して、3次元接地面積を求めするためには沈下量を計測する必要がある。接地角  $\theta$  における沈下量は図1の接地面Dから鉛直線のラグフェースNまでの距離DNとなる。しかし、接地角  $\theta$  を用いて接地面積を計算することになるので、ここではまず接地角  $\theta$  における接地面からラグフェースまでの長さDGを求める。DNはDGと角度要素により計算することができる。

図1に示すAEは従来接地長さと呼ばれていたものである。接地長さAEを  $l$  とすれば、

$$l = l_1 + l_2 \quad (1)$$

ただし、 $l_1 = OA \sin \alpha_1$   $l_2 = OB \sin \alpha_2$

$l_1$  (AH):  $\alpha_1$  に対する接地長さ (cm)

$l_2$  (HE):  $\alpha_2$  に対する接地長さ (cm)

$\alpha_1$  ( $\angle AOO'$ ): タイヤ円周上の一点が接地して車軸直下に到達するまでの進入角 ( $^\circ$ )

$\alpha_2$  ( $\angle BOO'$ ): タイヤ円周上の一点が車軸直下から土壌表面に到達するまでの脱出角 ( $^\circ$ )

OA: タイヤが土壌に進入する時のアンダートレッドフェースまでの距離 (cm)

OB: タイヤが土壌から脱出する時のアンダートレッドフェースまでの距離 (cm)

また、接地面長さ  $l'$  (AB) は次式となる。

$$l' = \sqrt{l^2 + z^2} \quad (2)$$

$z$ : アンダートレッドフェースまでの沈下量 (cm)

タイヤが土壌に進入する時のOAからOCまで

の角度  $\alpha$  ( $\angle AOC$ ) は、次式で表わされる。

$$\alpha = \frac{\pi}{2} - \sin^{-1} \left( \frac{OB \times \sin(\alpha_1 + \alpha_2)}{l'} \right) \quad (3)$$

タイヤ軸中心点Oから接地面(AB)に下ろした垂線OCは、

$$OC = OA \cos \alpha \quad (4)$$

タイヤ接地角  $\theta$  に対する接地面長さADは、

$$AD = \frac{OA \sin \theta}{\sin \left( \frac{\pi}{2} + \alpha - \theta \right)} \quad (5)$$

水平面と接地面とのなす角を  $\theta'$  ( $\angle DAF$ ) とすると、

$$\theta' = \tan^{-1} \frac{z}{l} \quad (6)$$

接地角  $\theta$  に対する接地長さ  $n$  (AF) は、(5)および(6)式によって、

$$n = AD \cos \theta' \quad (0 \leq n \leq l) \quad (7)$$

また、タイヤ軸中心点から接地面までの長さODは、

$$OD = \frac{OC}{\cos(\alpha - \theta)} \quad (0 < \theta < (\alpha_1 + \alpha_2)) \quad (8)$$

接地角  $\theta$  での接地面からラグフェースまでの長さDGは、

$$DG = OG - OD \quad (9)$$

OG: タイヤが変形した時の接地角  $\theta$  でのタイヤ軸中心点からラグフェースまでの距離 (cm)

また、実際のトラクタタイヤのようにタイヤ半径が大きな場合、接地角  $\theta$  でのラグフェースまでの沈下量DNは次式で近似することにする。

$$DN \approx \frac{DG}{\cos(\alpha_1 - \theta)} \quad (10)$$

(2) タイヤ接地角  $\theta$  での接地面積の計算方法

前項で求めたタイヤ接地角  $\theta$  における接地面からラグフェースまでの長さDG, および接地角  $\theta$  でのタイヤの横方向変形量がわかれば、その時の接地面積が求められる。

図2に示したタイヤの断面に、楕円方程式を利用すると、xy軸に関する関係は次のように表すことができる。

$$\frac{x^2}{IJ^2} + \frac{y^2}{IG^2} = 1 \quad (11)$$

IJ: 接地角  $\theta$  での変形したタイヤの横方向長さ (cm)

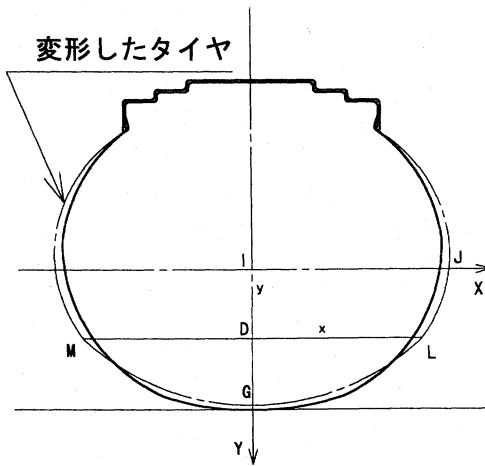


図2 タイヤ断面での幾何学的な関係

Fig.2 Geometrical relationships of the cross-section of tire

IG: 接地角  $\theta$  での変形したタイヤのラジアル方向長さ (cm)

(11)式を  $x$  に関して整理すると, (12)式になる。

$$x = \sqrt{\left(1 - \frac{y^2}{IG^2}\right)IJ^2} \quad (12)$$

タイヤ断面を  $y$  軸に対称とすれば, 図2における曲線  $x=f(y)$  の区間  $ID \leq y \leq IG$  なる部分の断面曲線  $LG$  の接地長さ  $S$  は(13)式となる。

$$S = \int_{ID}^{IG} \sqrt{1 + f(y)^2} dy \quad (13)$$

ただし,

$$ID = IG - DG \quad (14)$$

タイヤ断面のもとの接地長さは,  $S$  に対し角度  $(\alpha_1 - \theta)$  によって投影される曲線  $S'$  となるので,

$$S' = \frac{1}{\cos(\alpha_1 - \theta)} S \quad (15)$$

(13)式を(15)式に代入すると,

$$S' = \frac{1}{\cos(\alpha_1 - \theta)} \int_{ID}^{IG} \sqrt{1 + f(y)^2} dy \quad (16)$$

また, (12)式を  $y$  に関して微分すると,

$$f(y)' = -\left(\frac{IJ \times y}{IG \sqrt{(IG^2 - y^2)}}\right) \quad (17)$$

(16)式に(17)式を代入すると, 次式となる。

$$S' = \frac{1}{\cos(\alpha_1 - \theta)} \int_{ID}^{IG} \sqrt{1 + \left(\frac{IJ \times y}{IG \sqrt{(IG^2 - y^2)}}\right)^2} dy \quad (18)$$

接地面積は接地角  $\theta$  での接地長さ  $n$  によって次式になる。

$$A = 2 \times \int_0^l S' dn \quad (0 \leq n \leq l) \quad (19)$$

### 3. 静荷重時の3次元接地面積の定義

本実験での静荷重時の3次元接地面積は, タイヤを回転させないで垂直荷重をかけた後, 土壌にできるタイヤ跡の表面積である。タイヤ側面と土壌が接触する部分にできる境界線で轍を判定した。

## III 実験装置および実験方法

### 1. タイヤ変形量計測装置の試作および装着

#### (1) タイヤ変形量の測定

動荷重時の3次元接地面積は最終的に, (19)式で求めることができるが, (1)式から(10)式までを算出するためには, タイヤのラジアル方向変形量, タイヤ接地角およびアンダートレッドフェースまでの沈下量の値が必要である。アンダートレッドフェースまでの沈下量はスケールで測定した。また, (17)式および(18)式を算出するためには, タイヤの横方向変形量が必要である。

#### a タイヤのラジアル方向変形量の測定

タイヤのラジアル方向変形量測定のために, 超音波式変位センサ (キーエンス製, 高精度タイプ UD-310) をタイヤホイールに装着した (図3)。センサヘッドは, タイヤホイール面に垂直にかつホイール面中心線にくるようにタイヤホイールに穴をあけ, タイヤの内側へセンサヘッドを向けて装着した。従って, 計測値は, タイヤホイール面に取り付けたセンサの先端から, その延長線上にあるタイヤ内壁までの距離となる。本センサの測定範囲は60~300mm, アナログ電流出力の分解能は0.08mA (距離換算値で1mm), 応答性は20Hz, 応差距離は1mm~240mm, 応答時間は38ms (20Hz) である。

#### b タイヤの横方向変形量の測定

タイヤの横方向変形量は, レーザアナログセンサをタイヤ側方のタイヤ断面中心高さ位置に, タイヤ側面と直角に装着して測定した (図3)。

#### c タイヤ接地角の測定

タイヤの踏面長さ測定には軽微な接触でも高感度で入力できる IC555 を使ったタッチスイッチを

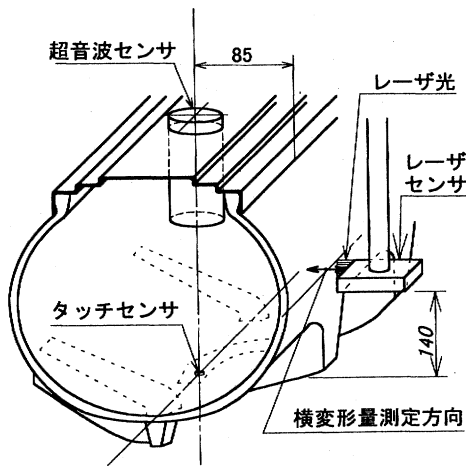


図3 タイヤ変形量測定器

Fig.3 Devices to measure tire deformation during motion

利用した。すなわち、タイヤ外周上の一点が土壌表面と接した時に土壌抵抗によりスイッチはオン状態となり、土壌から離脱するとオフとなる。これを利用して、タイヤが土壌に接してから離れる瞬間までの角度を求めた。

#### (2) 静荷重時土壌変形量計測装置の試作

タイヤの接地面積を3次元的に測定することは、タイヤによる接地圧を計算する上で重要である。静荷重時の接地面積の測定は土壌にタイヤ跡が残るため、比較的簡単にできる。そこで、本研究ではラグの沈下跡も含めた3次元接地面積を求めるために、レーザアナログセンサを用い、土壌面上部定位置からの距離をメッシュ状に測定した。一方、深さ毎の土壌変形量はアルミニウム箔を利用し、深さによる変形量を求めた。

##### a レーザアナログセンサ

レーザアナログセンサ(松下電工製, ANL1200, 以下レーザセンサと記す)は、投光部と受光部を設けたセンサ部とコントロール部で構成されている。測定中心距離は $250\text{mm} \pm 150\text{mm}$ の測定範囲である。分解能は $150\mu\text{m}$ (10Hz),  $500\mu\text{m}$ (100Hz)と $1.5\text{mm}$ (1kHz)の3種類から選択可能である。本実験では、サンプリング時間がデータ1個当たり約0.3秒であるので、最も精度の高い分解能 $150\mu\text{m}$ (10Hz)を選択した。レーザセンサからの出力データはA/D変換ボードを通して、パーソナ

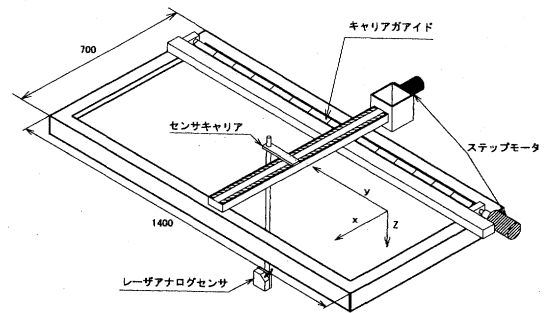


図4 土壌変形量計測装置の概略

Fig.4 Schematic diagram of frame to measure soil deformation

ルコンピュータに入力した。

##### b 静荷重時土壌変形量計測装置の構造

製作した土壌変形量計測装置の構造を図4に示す。計測装置のフレームは長辺(Y軸)が $1400\text{mm}$ 、短辺(X軸)が $700\text{mm}$ である。このフレームにキャリアガイド及びセンサキャリアを取り付けた。キャリアガイドは、X軸に対し平行でY軸方向に移動可能である。センサキャリアは、キャリアガイド上に設置し、X軸方向に移動可能である。このセンサキャリアにレーザセンサを鉛直下向きに設置した。キャリアガイド及びセンサキャリアはフレーム及びキャリアガイドに取り付けた2個のステップモータ(Oriental Motor製PK264A2, 2相0.25/step)でX, Y軸それぞれの方向に移動可能である。レーザセンサの可動範囲を制限するため、X, Y軸それぞれにリミットスイッチを設け、移動範囲を $500\text{mm} \times 1100\text{mm}$ とした。

##### c 計測システムおよびその制御

レーザセンサの移動制御、距離計測及びデータの保存はパーソナルコンピュータを用いて自動計測を行った。レーザセンサの移動はコンピュータからPPIボードを介して、ステップモータを駆動して行なった。リミットスイッチの作動時にはコンピュータからの停止信号が送られ、モータが停止するようにした。

## 2. 実験装置および土壌条件

当大学軌条走行農業機械総合測定装置(ソイルビンおよびダイナモメータカー)ならびにタイヤテスタ<sup>12)</sup>により実験を行った。タイヤテスタはトラクタの1輪のみを取り出した形をしており、ダ

イナモメータカーに接続して使用する。供試タイヤサイズは12.4R28PR8 (Good Year 製) のラジアルタイヤである。供試土壌は恵庭系火山灰土壌(粘土31.0%, シルト12.0%, 砂57.0%) で砂質埴土に分類される。北海道十勝の大規模畑作農業のように、大形機械による耕うんが繰り返されるほ場では硬盤が形成されていると想定し、本大学付近でのほ場を調査して土壌表面から約25cm下に硬盤を設けた。土壌条件は、動荷重時の実験では平均含水率22.1%, 平均乾燥密度0.79g/cm<sup>3</sup>, 静荷重時の実験では平均含水率24.2%, 平均乾燥密度1.03g/cm<sup>3</sup>であった。

### 3. 実験方法

#### (1) 供試タイヤの実験条件

タイヤ空気圧は、まず最大荷重14.2kN(メーカ指定最大値)に対応する推奨値157kPaを選定した。低圧の条件として59kPaを、それらの中間の値として108kPaとした。供試タイヤメーカーが示す空気圧-荷重表には59kPaの空気圧に関するデータは表示されていないが、一部のラジアルタイヤでは更に低い圧力(40kPa)での使用が可能になっている。そこで空気圧59kPa時の適正荷重の選択には、同規格の他社製のラジアルタイヤの空気圧-荷重表を参照した。これらを元に空気圧59kPaに対する荷重は9.3kN, また108kPaに対しては11.8kNとした。

以上の点から3種類の空気圧と荷重の組み合わせとして、①過大荷重(59kPa-14.2kN), ②適正荷重(108kPa-11.8kN), ならびに③過小荷重(157kPa-9.3kN)とした。以下これらの呼称で記述する。

#### (2) 動荷重および静荷重実験

##### a 動荷重時タイヤ変形量の測定

製作したタイヤ変形量計測装置と提案した計算式を適用するため、まず、被けん引車輪での走行実験を行った。走行開始前にはタイヤ変形が発生していない部分に超音波センサが位置するように、超音波センサが車軸直下にある位置からタイヤを後方に60°回転(車軸直下から650mm前方の位置に相当する)させた後にタイヤを定置した。供試タイヤに実験条件の空気圧と荷重をかけ、負の滑りを小さくするために0.05m/sの速度で走行した。変形したタイヤ断面形状は楕円型と仮定

したため、横方向変形量測定用レーザセンサはタイヤ断面高さ30cmに対し、ラグフェースからタイヤ回転中心方向へ14cmの高さに設置した。タイヤが回転を開始すると同時にタイヤ接地角100°にわたってタイヤのラジアル方向および横方向変形量、踏面長さのアナログ値および接地角のパルスをパーソナルコンピュータでA/D変換し、データの入力状態を確認後保存した。

##### b 静荷重時土壌変形量の測定

実験条件の静荷重を与えた後タイヤを持ち上げ、本大学ソイル・ビンのレール上に図5のように一般構造用角形鋼管で作った台車をわたし、その上に土壌変形量計測装置を設置し、計測を行った。接地面積は、タイヤを定置し油圧で負荷をかけることにより発生した土壌変形量をレーザセンサ距離計で測定し、この距離と基準位置とを比較し算出した。レーザセンサの高さは地表面上15cmとした。接地面積、各深さ毎の土壌変形のいずれの測定においても、これを基準の高さとした。

タイヤによる土壌変形量は、アルミニウム箔を深さ5cmから20cmまで5cmごとに敷設して測定した。予備実験から得られたタイヤ幅、接地長さおよびタイヤの沈下による土壌の変形量を考慮し、市販のアルミニウム箔を60cm×100cmの大きさにして使用した。タイヤと土壌との接触表面積の測定後に、各深さのアルミニウム箔上の土壌を取り除き、それぞれの面が締め固められ沈下した深さをレーザセンサ距離計で測定した。測定値と基準高さとを比較して土壌変形量を算出した。

本実験では、z軸方向の距離の測定をx軸方向に1cm間隔で47回行って踏圧面断面形状を測定

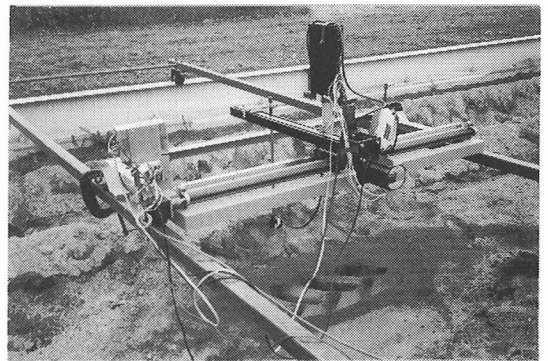


図5 土壌変形量の測定

Fig.5 Measurement of soil deformation

し,これをY軸方向に1 cm 間隔で112回繰り返した。これらの計測点は5264点である。得られたデータは市販のプログラムを利用して3次元グラフィックスで表示し,土壤変形の全体像を把握できるようにした。また,タイヤを持ち上げる時,タイヤに接触した土壤が崩れると正確な接地幅および接地長さを求めるのは困難になるので,ほ場準備時に土壤表面から深さ1 cm までの土壤を2 mm の篩で篩別し,水分調整して可能な限り崩落がおきないようにした。

#### IV 実験結果および考察

##### 1. 動荷重時の3次元接地面積

###### (1) タイヤ変形量の実測例

図6にトラクタタイヤに装着した測定器による適正荷重(108kPa-11.8kN)時の実測データの一例を示す。進行方向は図の左側である。タッチスイッチで測定したタイヤ円周上の一点が接地してから車軸直下に到達するまでの進入角 $\alpha_1$ および車軸直下から土壤表面に到達するまでの脱出角 $\alpha_2$ はそれぞれ45.9°および22.5°であった。(3)式に $\alpha_1, \alpha_2$ を代入し求めた $\alpha$ は36.2°であった。タイヤ変形量の最大値はタイヤのラジアル方向・横方向ともにタイヤ真下の接地角0°のところに現れた。実施した他の2条件でも同じ傾向が見られた。また,タイヤの接地が終わる脱出角 $\alpha_2$ の22.5°以降にもタイヤ変形は続いているのが分かった。ラジアル方向最大変形量および横方向最大変形量はそれぞれ5.2cmと1.3cmであった。タイヤ断面の(高さ/幅)比によるタイヤの変形係数は0.76で,過大荷重(59kPa-14.2kN)時の0.60および過小荷重(157kPa-9.3kN)時の0.83の如く過大荷重では小さく,過小荷重では大きくなった。

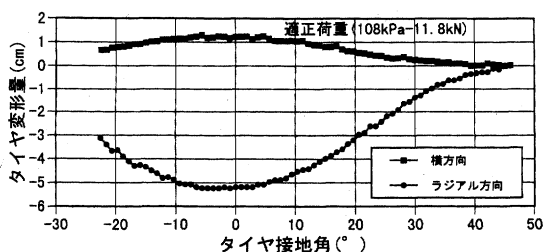


図6 測定したタイヤ変形量の一例

Fig.6 Example of tire deformation measured by the devices

(2) タイヤ変形量から算出した3次元接地面積適正荷重(108kPa-11.8kN)の場合,アンダー tred フェースまでおよびラグフェースまでの沈下量の実測値は,それぞれ7.3cmおよび11.3 cm (ラグの高さ4 cm)であった。また,(10)式によるラグフェースまでの沈下量の計算値の最大値はタイヤ接地角28°のとき12.2cmであった。これらの値は本論文で示した計算式による動荷重時の沈下量  $DN$  の最大値である。タイヤと土壤の両方が変形するため,土壤とタイヤの相互作用は複雑である。実測値はタイヤ通過後に測定した沈下量であるために土壤の弾性回復が発生している場合も考えられ,計測値との差が表れたと推察される。しかし,今回の実験ではその要因を明らかにすることはできなかった。

(12)式で求めた接地幅の最大値は32.5cmでタイヤ接地角はほぼ0°付近で現れた。

適正荷重(108kPa-11.8kN)での算出した3次元接地面積は2364cm<sup>2</sup>であった。過大荷重(59kPa-14.2kN)の場合および過小荷重(157kPa-9.3kN)の場合のそれは,それぞれ2983cm<sup>2</sup>および1973cm<sup>2</sup>であった。過大荷重(59kPa-14.2kN)の場合の3次元接地面積が大きい結果となった。これは当然のことであるが荷重が高く,空気圧が低くなるにつれ,接地面積が大きくなることを実証している。

##### 2. 土壤変形量計測装置による計測結果

###### (1) 静荷重時の接地面積

前節で,提案した計算式と実測したタイヤ変形量から動荷重時の3次元接地面積を求めた。しかし,各実験条件で計算した接地面積がいかに変化するかを検討する必要がある。タイヤを定置した静荷重時には,車軸の前後方向で軸対称に接地する。これに対して走行時には,車軸直下より前方のタイヤ接地長さは静荷重時と極端に違わないが,沈下が発生し土壤を締め固めながらタイヤが前進するため,車軸直下より後方では静荷重時よりも接地長さが短くなる。したがって,動荷重時の接地面積は静荷重時の接地面積をこえることはないはずである。そこで,動荷重時の接地面積と静荷重時の接地面積とを比較するために,各実験条件での静荷重の3次元接地面積を計測することにした。

図7は土壌変形量計測装置による適正荷重(108 kPa-11.8kN)での実測例である。なお、本図は凹凸を反転して判別しやすくした。適正荷重(108 kPa-11.8kN)の接地幅および接地長さはそれぞれ30cmおよび74cmで、3次元接地面積は3069 cm<sup>2</sup>であった。過大荷重(59kPa-14.2kN)の場合は、接地幅および接地長さはそれぞれ33cmおよび87cmで3次元接地面積は3862cm<sup>2</sup>であった。過小荷重(157kPa-9.3kN)における接地幅および接地長さはそれぞれ30cmおよび65cmで3次元接地面積は2567cm<sup>2</sup>であった。以上の結果を図8および表1に示す。

図8に示すように、今回の実験条件では、接地

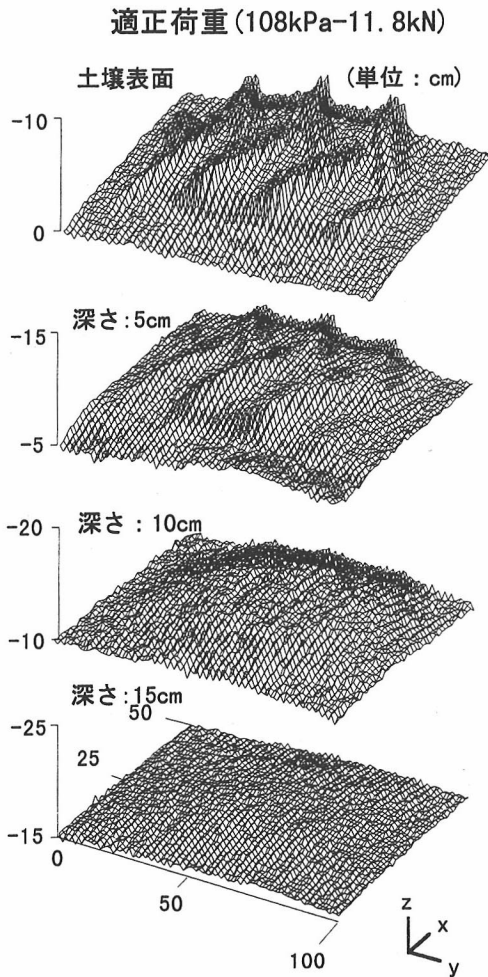


図7 測定した土壌変形量の一例

Fig.7 Example of soil deformation measured by the devices

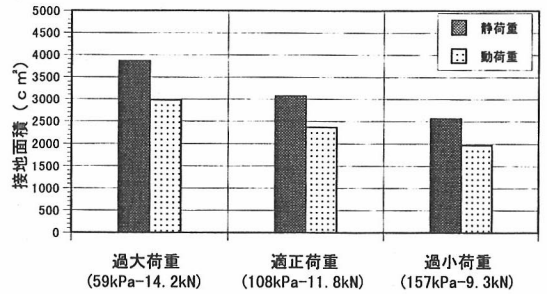


図8 静荷重時および動荷重時の接地面積

Fig.8 Contact areas caused by static and dynamic loads

面積は静荷重時が動荷重時の約1.3倍となった。静荷重時および動荷重時の接地面積はともに過大荷重(59kPa-14.2kN)の場合が他の実験条件の場合より大きくなった。接地面積は、種々の空気圧、荷重によりタイヤが変形することにより変化すると考えられる。すなわち、空気圧と荷重の組み合わせにより、発生したタイヤ変形量は異なるはずである。そこで、各実験条件での静荷重時の接地幅と接地長さについて検討した。表1に示したように、供試タイヤの場合には接地幅がほぼ一定であったが、接地長さは空気圧が低く荷重が大きいほど長くなった。空気圧、荷重あるいは土壌条件により、タイヤ変形や沈下が変化し接地幅が変わることも当然考えられるが、タイヤ変形による接地長さの増大が接地面積が大きくなる一要因となることが分かった。

本実験では断面形状をx、y軸方向にそれぞれ距離1cm毎に測定したため、ラグの形状を完全に把握することはできなかった。しかし、マイク

表1 静荷重時の測定値と動荷重時の計算値  
Table 1 Some parameters obtained from static load and calculated from the mathematical model for dynamic load

	空気圧-荷重 (kPa-kN)	接地幅 (cm)	接地長さ (cm)	3次元接地面積 (cm <sup>2</sup> )
静荷重	過大荷重(59-14.2)	33.0	87.0	3862
	適正荷重(108-11.8)	30.0	74.0	3069
	過小荷重(157-9.3)	30.0	65.0	2567
動荷重 (計算値)	過大荷重(59-14.2)	33.5	64.3	2983
	適正荷重(108-11.8)	32.5	60.5	2364
	過小荷重(157-9.3)	31.0	53.9	1973



ロコンピュータによる位置制御を介して3次的に接地面積を非接触より測定することが可能になった。データ数は増加するが、測定間隔を短くすることにより、さらに正確な面積を測定することも可能である。

## (2) 土壌深さごとの土壌変形

図7に示す踏圧された土壌深さごとの立体形状は、パーソナルコンピュータによる制御とレーザセンサによる距離の計測が高精度になされていることを示している。これにより土壌変形を明確に見ることができる。深さ10cmと15cmの土壌変形にはラグの形状が現れていない。

図9は、測定幅32cm、敷設した深さ20cmまで深さ5cm毎に実測した図7から求めたものである。測定開始点からの距離16cmから24cm付近にラグの影響を顕著に見ることができ、18cmの位置に最大沈下量11.3cmが現われた。深さ約10cm以下には凹凸はあまりなく、比較的滑らかであった。つまり、今回の実験ではタイヤラグは、変形前の土壌での深さ10cmよりも浅い部分に強く影響することが分かった。

以上の如くタイヤによる土壌変形の状態を把握することが可能になった。本実験では静荷重による土壌変形の計測に留まったが、今後さらに動荷重による土壌変形を測定可能な装置を開発する必要がある。

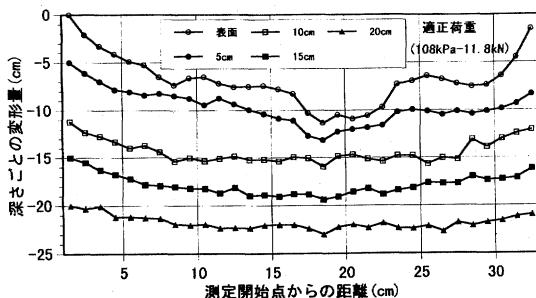


図9 図7から算出した土壌の断面

Fig.9 Calculated cross-section of soil from data shown in Fig.7

## V 要 約

本研究は動荷重時と静荷重時の接地面積を3次的に求めたものである。

1) タイヤ変形を考慮した動荷重時の接地面積を

算出する理論式を提示した。動荷重時のタイヤのラジアル方向および横方向変形量、タイヤ接地角およびアンダートレッドフェースまでの沈下量のデータを用いて、本理論式から動荷重時3次元接地面積を求めた。

2) レーザセンサをコンピュータ制御することによりタイヤ跡の形状を測定し静荷重時接地面積を3次的に算出した。

3) 静荷重時3次元接地面積と動荷重時3次元接地面積の比較を行なった。

4) アルミニウム箔を地表面から5cm毎に深さ20cmまでに敷設して静荷重時の深さ毎の土壌変形量を3次元で測定し、グラフィックスで明示した。

## 謝 辞

土壌変形量計測装置およびタイヤ変形量計測装置の制作にあたっては、本学畜産環境科学科機械実習工場の神田晃文部技官に協力を頂いた。記して謝意を表す。

## 参 考 文 献

- 1) Wulfsohn,D., Upadhyaya,S.K.: Prediction of Trac-tion and Soil Compaction using Three - Dimensional Soil - Tyre Contact Profile, J.Terramech., 29(6), 541-564, 1992
- 2) 全 亨 幸ら: 農用タイヤ下の6方向応力の測定と解析に関する研究, 農機誌, 59(1), 21-28, 1997
- 3) Oida,A., Satoh,A., Itoh,H., Triratanasirichai,K.: Three Dimensional Stress Distributions on Tire - Sand Contact Surface, J.Terramech., 28(4), 319-330, 1991
- 4) Krick,G.: Radial and Shear Stress Distribution under Rigid Wheels and Pneumatic Tires Operating on Yielding Soils with Consideration of Tire Deformation, J. Terramech., 6(3), 73-98, 1969
- 5) Yu,Q.,Xu,G.: A New Method for Measuring Shape and Size of Tire - Soil Contact Zone, Proc. 10th international conference of the ISTVS/Kobe, JAPAN, 171-186, 1990
- 6) Freitag,D.R., Smith,M.E.: Center - Line Deflection of Pneumatic Tires Moving in Dry Sand, J. Terramech., 3, 31-46, 1966
- 7) Abeels,P.F.J.: Tire Deflection and Contact Studies, J. Terramech., 13(3), 183-196, 1976
- 8) Blaszkiewicz,Z.: A Method for the Determination of the Contact Area between a Tyre and the Ground, J. Terramech., 27(4), 263-282, 1990
- 9) Wulfsohn,D., Upadhyaya,S.K.: Determination of Dynamic Three - Dimensional Soil - Tyre Contact Profile, J.Terramech., 29(4), 433-464, 1992

- 10) Komandi, G.: The Determination of the Deflection, Contact Area, Dimensions, and Load Carrying Capacity for Driven Pneumatic Tires Operating on Concrete Pavement, *J. Terramech.*, 13(1), 15-20, 1976
- 11) 柏寿 勝ら: 超音波によるほ場面形状の計測に関する研究 (第1報), *農機誌*, 53(6), 23-31, 1991
- 12) 谷口哲司ら: 大形ソイルビン用タイヤテスターの試作, *農機北支報*, 33, 24-27, 1992 (原稿受理: 1996年9月2日・質問期限: 1997年11月30日)

## コメント

### [読者のコメント]

静荷重時の接地面積の測定において、境界線の決め方で接地面積の値は影響されると考えられます。接地面積を求めるとき、タイヤによる土の変形の境界線をどのような基準で決定したのでしょうか。

### [コメントに対する著者の見解]

土壌条件は、正確な接地幅および接地長さ、すなわち境界線を求めるために、ほ場準備時に土壌表面から深さ1 cmまで、水分を調整した土壌を2 mmの篩で篩別し、土壌表面を可能な限り水平

に保つよう心がけました。図7のように、負荷後タイヤラグの跡は土壌表面に対し明確に見えますが、アングートレッドの跡は、過小荷重の場合、若干滑らかなところも現れました。しかし、接地面積を計算する上では問題なく、タイヤサイドウォールによる崩れた部分の境界線の識別は容易でした。また、測定間隔1 cmで実験を行ったため、境界線の処理が難点でしたが、境界線を中心にして前後1 cmによる誤差は測定間隔をより短くすることにより、解決ができると考えています。