

農用タイヤ下の6方向応力の測定と 解析に関する研究*

全 亨奎**・谷口哲司**・大友功一**・
岸本 正**・玉利達人**

要 旨

6個の圧力センサを利用して耕盤での土中応力状態を測定可能な土中応力測定器(以下測定器)を開発した。測定器をタイヤ進行方向のタイヤ中心部およびタイヤ側端のラグ直下ならびにタイヤ側端のアンダートレッド直下の3ヶ所に土壌表面から深さ25cmの耕盤上に埋設し、タイヤを走行させて土中応力を測定した。得られたデータから応力状態を算出し、主応力を求めた。次に、測定器の埋設位置の違いによる最大主応力を検討した。その結果、タイヤ中心部ラグ直下における最大主応力が、タイヤ側端部でのその2倍以上になっていることが分かった。

[キーワード] 土壌踏圧, 動荷重, 空気圧, 土中応力, 応力テンソル, 農用タイヤ, ラジアルタイヤ

Measurement and Analysis of Six Direction Stresses under Tractor Tire

Hyung-gyu JUN, Tetsuji TANIGUCHI, Ko-ichi OHTOMO,

Tadashi KISHIMOTO, Tatsuto TAMARI

Abstract

A transducer was developed to determine the stress state in the soil on a hard pan. Principal stresses, octahedral normal and shearing stresses can be calculated from the data measured with six pressure cells on the transducer in the six predetermined directions. The transducer was buried in three locations in the soil at 25cm depth: under the lug at the centerline and the edge of the tire and under the undertread at the edge of the tire. The effect of changes in the locations of buried transducer on soil stresses indicated that the maximum major principal stress under the lug at the centerline of the tire in was more than twice as those in other locations.

[Keywords] soil compaction, dynamic load, inflation pressure, soil stress, stress tensor, agricultural tractor tire, radial tire

I 結 言

近年トラクタをはじめほ場で作業する車輪形農業機械は大形化し、従って重量を増し、土壌踏圧のレベルが上がっている。過度の土壌踏圧は作物生産量の減少¹⁾、土壌浸食増大²⁾などの一因になっ

* 1995年4月 第54回農業機械学会年次大会(東京大学)にて一部講演
** 帯広畜産大学畜産学部(〒080 帯広市稲田町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

ている。

土壌踏圧現象を解明し、土壌踏圧発生を最小限に止めるためには、トラクタがほ場を走行した場合などにその作用が実際に土中でどのような応力状態を引き起こしているのかを明らかにすることが必要である。そのため種々の応力測定装置が開発され、報告されている。Vermaら³⁾は密閉された液体中に圧力センサを入れ外部からの圧力を等方圧力として測定する装置を開発した。米川ら⁴⁾は、土壌内応力を検出する小形圧力センサを開発し、土壌圧縮時の応力や変位を測定した。Nicholsら⁵⁾は土中で6方向の圧力を測定し、応力状態を算出できるSST (soil stress state transducer)を開発した。このSSTはタイヤ走行によりSSTの位置が変化した場合でも応力状態は正確に算出可能である。

NicholsらのSSTは土中応力状態を得るためには非常に有用であるが、球形の本体の一部を加工し圧力センサを貼付するようになっていたために、製作工程が複雑である。これらのことを考慮して、筆者らは、ヘッド部への圧力センサの貼付位置はNicholsらのSSTと同じであるが、加工が容易である棒鋼から測定器を製作できるように設計した。測定器はヘッド部と台座部に分けて加工と組み立てを容易にした。この方式を採用することで同じヘッド部を利用し、台座部を取り外せば種々の土中深さで幅広く使うことができる。

本研究では耕盤が存在するほ場で使用できる土中応力測定器の開発方針の一つとして、まず、傾斜や移動が少ない土中応力測定器の台座部を設計開発した。北海道の大形機械利用の畑作ほ場のように、膨軟な作土と硬い耕盤が存在する2層構造のほ場で車輪形トラクタを運行すると、タイヤはまず膨軟な作土に作用し土壌は移動、圧密、破壊等により大変形を生じ、さらに土中応力が伝播し耕盤上に達すると考えられる。一方、耕盤は膨軟な作土よりはるかに硬いため作土が大変形するのと比較すると耕盤表面そのものの移動や破壊は極めて小さいと考えられる。このような状況を考えると本測定器のように傾斜や移動が少ない台座部の設置は耕盤を有するほ場において適切と考えられる。

本報は、開発した測定器を土中に埋設した後に

タイヤを通過させ、測定データによる応力状態を算出したものである。さらに、測定器埋設位置の違いによる応力発生状況を最大主応力を中心に検討した。

II 土中応力測定器の原理

1. せん断応力の求め方

x y z 座標系の1点に作用する応力で垂直応力 σ_x , σ_y および σ_z と x y z 座標系の微小正8面体の平面 N_1 , N_2 および N_3 (ただし, $N_1 \neq N_2 \neq N_3$) の垂直応力 σ_{n1} , σ_{n2} および σ_{n3} が分かれば、せん断応力 τ_{xy} , τ_{yz} および τ_{zx} を求めることができる。図1より、平面 N_1 , N_2 および N_3 のそれぞれの垂直応力 σ_{ni} ($i=1, 2, 3$) は、次式で表わされる⁶⁾。

$$\begin{aligned} \sigma_{ni} = & \sigma_x \cos^2 \alpha_i + \sigma_y \cos^2 \beta_i + \sigma_z \cos^2 \gamma_i \\ & + 2\tau_{xy} \cos \alpha_i \cos \beta_i + 2\tau_{yz} \cos \beta_i \cos \gamma_i \\ & + 2\tau_{zx} \cos \gamma_i \cos \alpha_i \end{aligned} \quad (1)$$

応力の方向と x , y , z 座標軸とのなす角をそれぞれ α_i , β_i , γ_i としたときに, $\alpha_i = \beta_i = \gamma_i$ (ただし, $\cos^2 \alpha_i + \cos^2 \beta_i + \cos^2 \gamma_i = 1$) とすれば, $\cos^2 \alpha_i = 1/3$, $\alpha_i = 54.7^\circ$ (β_i , γ_i についても同じ) となる。このとき、表1のような方向余弦を平面 N_1 , N_2 および N_3 に与えれば、以下の式が得られる⁵⁾⁷⁾。

$$\tau_{xy} = -0.75(\sigma_{n2} + \sigma_{n3}) + 0.5(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) \quad (2)$$

$$\tau_{yz} = 0.75(\sigma_{n1} + \sigma_{n2}) - 0.5(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) \quad (3)$$

$$\tau_{zx} = 0.75(\sigma_{n1} + \sigma_{n3}) - 0.5(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) \quad (4)$$

以上の式(2)から(4)より、せん断応力を求めることができる。

2. 応力テンソル

土壌中の1点の応力状態を表現するためには応力テンソルを解析することが有効である⁸⁾。応力テンソルの性質をみると、 xyz 座標系の各軸に垂

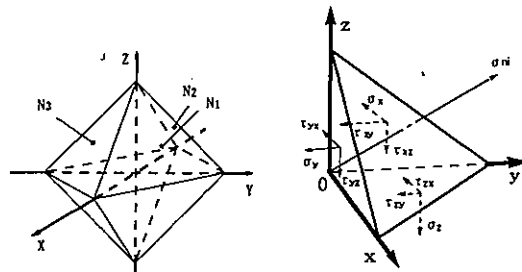


図1 3軸の応力成分

Fig. 1 Triaxial stress components

表1 平面 N_1, N_2, N_3 の方向余弦
Table 1 Direction cosines of three planes N_1, N_2 and N_3

	$\cos\alpha$	$\cos\beta$	$\cos\gamma$
N_1	0.5774	0.5774	0.5774
N_2	-0.5774	0.5774	0.5774
N_3	0.5774	-0.5774	0.5774

直な面からなる微小直方体の面に作用する垂直応力成分 (σ_x, σ_y および σ_z) と、せん断応力成分 ($\tau_{xy}, \tau_{yx}, \tau_{yz}, \tau_{zy}, \tau_{zx}$ および τ_{xz}) とに分解できる。この9成分は次に示す1つの行列にまとめられる。

$$\begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix} \quad (5)$$

これは応力テンソルの行列表示であり、対称行列の関係にある ($\tau_{xy} = \tau_{yx}, \tau_{yz} = \tau_{zy}$ および $\tau_{xz} = \tau_{zx}$)。これを垂直応力成分 σ に関して表すと次式(6)のようになる。

$$\begin{aligned} &\sigma^3 - (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) \sigma^2 + (\sigma_x \sigma_y + \sigma_y \sigma_z \\ &+ \sigma_z \sigma_x - \tau_{xy}^2 - \tau_{yz}^2 - \tau_{zx}^2) \sigma \\ &- \sigma_x \sigma_y \sigma_z + \sigma_x \tau_{yz}^2 + \sigma_y \tau_{zx}^2 + \sigma_z \tau_{xy}^2 \\ &- 2\tau_{xy} \tau_{yz} \tau_{zx} = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

また、いかなる場合でもすべてのせん断応力 (τ) を同時に零にするような座標系を選定することができる。

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{bmatrix} \quad (7)$$

σ_1, σ_2 および σ_3 は主応力と呼ばれ、 $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ とするとそれぞれ最大、中間、最小主応力である。これは1点に作用する応力を記述する最も一般的な方法で、それらの方向を知る必要がある。主応力の3個の実根は式(6)を満足し、次式(8)のように表現される。

$$(\sigma - \sigma_1)(\sigma - \sigma_2)(\sigma - \sigma_3) = 0 \quad (8)$$

(ただし、 $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$)

8面体垂直応力 (σ_{oct} , あるいは平均垂直応力) および8面体せん断応力 (τ_{oct}) は、次式で表わすことができる⁹⁾。

$$\sigma_{oct} = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad (9)$$

$$\tau_{oct} = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2} \quad (10)$$

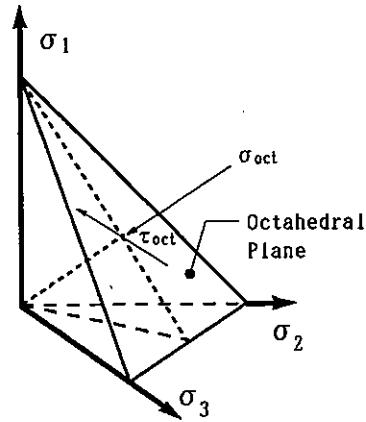


図2 主応力軸の応力成分

Fig. 2 Stress components defined on principal stress axis

主応力 (σ_1, σ_2 および σ_3) 軸と、8面体垂直応力 σ_{oct} および8面体せん断応力 τ_{oct} の関係を図2に示す。

III 実験装置および実験方法

1. 実験装置

(1) 土中応力測定器の試作

本研究で試作した測定器は、6個の圧力センサ(共和電業製, PS-10KB)を貼付したヘッド部とそれを支える台座部で構成されており、ともに材質は炭素鋼である。図3-aには測定器のヘッド部に貼付された圧力センサ位置とセンサ形状を、図3-bには測定器の模式図を示す。ヘッド部は直径60mm、高さ55mmである。

圧力センサのx, y およびz方向は、図3におけるヘッド部上面の垂直方向をz、タイヤの進行方向をy、およびyの水平直角方向をxとした。x y z座標系の垂直応力を測定するための圧力センサ貼付位置は図3-aの通りである。また、平面 N_1, N_2 および N_3 の垂直応力を測定する圧力センサ n_1, n_2 および n_3 は、x y座標軸上の水平平面に対して下方へ54.7度傾いた面に設置してある。 n_1 と n_2 はそれぞれタイヤの進行方向の左135度および右135度にあり、 n_3 は進行方向左45度にある。

地表面をタイヤが走行した時にヘッド部の傾斜

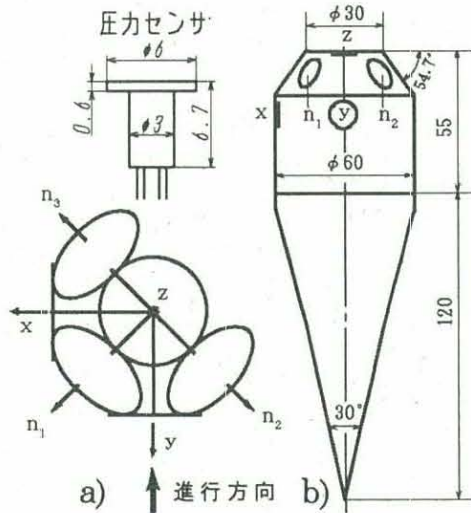


図3 土中応力測定器 a) 6圧力センサ貼付位置
b) 模式図

Fig. 3 Soil stress transducer a) The location of six pressure cells on the transducer
b) Schematic diagram of the transducer

や移動を極力少なくするために、本測定器は、頂角 30° 、高さ120mmの円錐形を台座部として、ヘッド部下部に取り付ける構造にした。また、測定器に土の付着をなくすため、エナメル塗装を施した¹⁰⁾(図4)。

キャリブレーションは、密閉容器に測定器を入れエアコンプレッサーの圧力を変えて行った。結果の一例として、 σ_x 用圧力センサでは係数0.539(kPa/strain)、相関係数0.999となった。

(2) 供試タイヤテスト

図5に示す軌条走行農業機械総合測定装置ならびにタイヤテスト¹¹⁾により実験を行った。軌条走行農業機械総合測定装置は大形土壌槽とダイナモメータカーからなる。土壌槽は全長100m、幅4.2m、深さ1.0mのコンクリート製ピットで供試土壌が充填されている。両サイドにはダイナモメータカー走行用の軌条が敷設されており、全幅は4.5mである。ダイナモメータカーには104kWのディーゼルエンジンが搭載されており、タイヤの駆動、荷重の制御には十分な出力を持っている。

タイヤテストはトラクタの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。タイヤの駆動ならびにタイヤ荷重の調

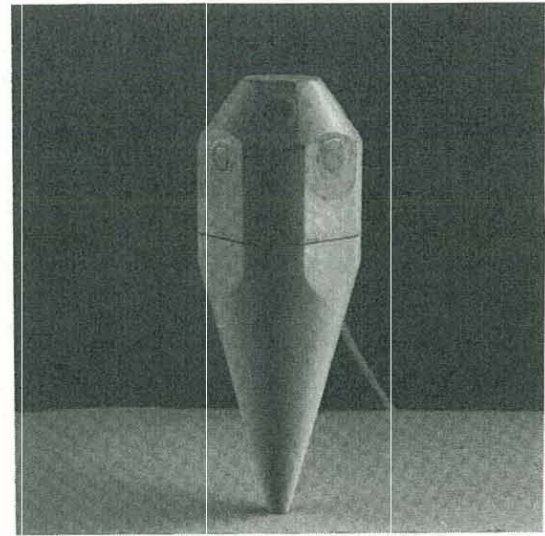


図4 土中応力測定器
Fig. 4 Soil stress transducer



図5 タイヤテストならびに軌条走行農業機械総合測定装置

Fig. 5 Tire tester and dynamometer car

整はダイナモメータカーの油圧により制御する。タイヤ荷重の最大許容荷重は24.5kNである。

供試タイヤサイズは12.4R28 PR8(Good Year製)のラジアルタイヤである。

2. 土壌条件および実験方法

(1) 土壌条件

北海道十勝地方の畑作地帯に広く分布する恵庭系火山灰土壌(粘土31.0%、シルト12.0%、砂57.0%)を供試した。国際土壌学会法による区分では砂質埴土である。実験中には土壌水分を一定に保つよう心がけた。

溝引き法により耕うんが繰り返されるほ場では耕盤が形成されていると想定し、供試土壌に土壌表面から約25cm下に耕盤を設けた。土壌条件を

表2 土壌条件
Table 2 Soil conditions

埋設位置	空気圧(kPa)-荷重(kN)	含水率(%)	湿潤密度(Mg/m ³)
CL	157-9.3	24.8	1.22
	108-11.8	25.1	1.14
	59-14.2	23.5	1.16
EL	157-9.3	24.0	1.14
	108-11.8	24.3	1.03
	59-14.2	25.0	1.19
EU	157-9.3	24.8	1.19
	108-11.8	24.2	1.08
	59-14.2	24.0	1.07

表2に示す。

(2) 実験方法

a 土中応力測定器の設置

測定器は、図3における測定器のY面をタイヤが接近する方向に上面zが耕盤から5cm上(土壌表面から20cm下)になるように設置した。測定器を設置した後、2mmのふるいをかけた土を埋め戻した。測定器の埋設位置は図6に示すタイヤ下CL、ELおよびEUの3地点である。ただし、CLはタイヤの進行方向のタイヤ接地面中心部でラグ直下、ELはタイヤ側端のラグ直下、ならびにEUはタイヤ側端のアンダートレッド直下である。これらは、タイヤラグとアンダートレッド部のそれぞれにおけるタイヤ中心部と側端での応力発生状況を比較するために選定した。

b 供試タイヤの実験条件

タイヤ空気圧の選定は、最大荷重14.2kN(メーカー推奨値)に対応する適正圧力157kPa、低圧の条件として59kPaおよび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低圧使用(40kPa)が可能になってきている。本来、メーカーが指定していない空気圧でタイヤを使用することは避けるべきであるが、敢えて59kPaを選定した。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。

以上の点から3種類の空気圧と荷重より、(1)タイヤに過大荷重を付した場合作して59kPa-14.2kN、(2)適正荷重の場合として108kPa-11.8

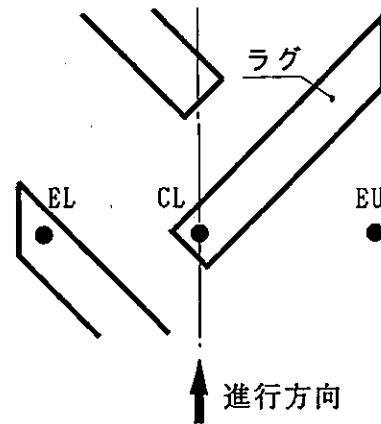


図6 測定器の埋設位置

Fig. 6 Location of transducer buried under moving tire

kN、ならびに(3)過小荷重の場合として157kPa-9.3kNの組み合わせとした。

c 被けん引車輪による実験

測定器の基礎データを得るため、被けん引車輪での走行実験を行った。まず、実験開始時に測定器の埋設地点から進行方向の後方にタイヤ回転角60度分の位置(約650mm)にタイヤを定置する。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。タイヤが回転を開始すると同時にタイヤ回転角100度にわたって6方向応力と回転角のパルスデータをデータレコーダに記録した。また、データ収録時にマイクロコンピュータを利用し、データの精度を確認した。

IV 実験結果および考察

1. 測定器の6方向応力の実測例

図7に6個の圧力センサによる空気圧108kPa、荷重11.8kNの場合での実測データの一例を示す。同図においてタイヤは左側から測定器に接近し、 σ_x と σ_{n3} を除く他の圧力センサが回転角 -50° 付近から応力を感知しはじめる。 σ_x と σ_{n3} に関しては、この2応力を感知するための圧力センサそれぞれが測定器のX方向ならびに進行方向Y軸から 45° の位置に貼付されているため、他のセンサよりも遅れて応力を感知した。応力はタイヤ回転角 15° 付近でほぼ零に戻ったが、 σ_y 、 σ_{m1} ならび

に σ_{n2} は、零に戻らなかった。これはタイヤ走行により土壌が固まり、それによって残留応力が発生したためと考えられる。 σ_z は測定器上面の圧力センサで測定したものであるが、測定値の中で最も大きくなった。その最大値はタイヤ回転角 0° 、すなわち、測定器のほぼ直上をタイヤが通過した点で測定された。 σ_y はタイヤの進行方向に垂直な面上の圧力センサで測定した値である。 σ_y の最大値は 0 度前に現れた。他のタイヤ空気圧と荷重を組み合わせて実験を行った場合でも、実測データの波形は同様の傾向を示した。

x-y座標軸の水平平面に対して 54.7 度傾いた面に設置されている平面 N_1 、 N_2 および N_3 の垂直応力 σ_{n1} 、 σ_{n2} および σ_{n3} の最大値は、それぞれ回転角 0 度の位置に現れた。 σ_{n1} と σ_{n2} は進行方向に対して測定器の左右対称の位置の圧力センサであるが σ_{n1} の方が大きい値となった。これらの値は同程度の応力が測定されると考えられるが、ラグが斜めに土に作用する影響であると考えられる。また、タイヤ中心線が測定器中心上を通過しているかという問題もあり、測定器埋設には充分注意を払うべきことを示唆している。

2. 実測値から算出した主応力値

図8は図7に示した測定データから算出した主応力 σ_1 、 σ_2 および σ_3 、ならびに式(9)、(10)で算出した8面体垂直応力 σ_{oct} 、8面体せん断応力 τ_{oct} である。かさ密度が最大主応力 σ_1 で決められ、 σ_1 とかさ密度の関係がわかっているれば、締め固め分布は既知の σ_1 より求められる⁷⁾。つまり、 σ_1 は土壌踏圧に影響される値である。実測データより算出した応力より、 σ_{oct} と τ_{oct} の比を解析すればタイヤ下

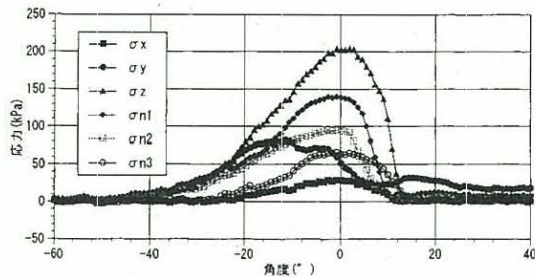


図7 タイヤ中心部のラグ直下での測定データの一例
Fig. 7 Example of stress components measured by the transducer directly under the lug at the centerline of tire

の土壌破壊を表現する手段となる⁸⁾。

3. 実測値から算出したせん断応力

図9は図7の測定データから式(2)~(4)で算出したせん断応力 τ_{xy} 、 τ_{yz} ならびに τ_{zx} を示したものである。土壌に降伏が生じているとすれば、それはせん断応力が最大値に達したときに生じたと考えられる。土壌の降伏点における応力が最大踏圧を発生させる応力と考えられており¹²⁾、降伏点における応力を解析する必要がある。今後さらに、タイヤ空気圧および荷重を変えて実験を行い、条件の違いによるせん断応力および主応力を測定し検討する必要がある。

4. 踏圧面下の最大主応力

図10は埋設位置(CL, EL および EU, 図6参照) および供試タイヤの実験条件による最大主応力 σ_1 の最大値である。最大主応力 σ_1 をその最大値と比較すると、CL, EL では3種類の荷重では顕著な差は現われなかった。これは荷重が大きくなった時には、空気圧が小さいので、タイヤ接地面積が大きくなったためと考えられる¹³⁾。EL に対し

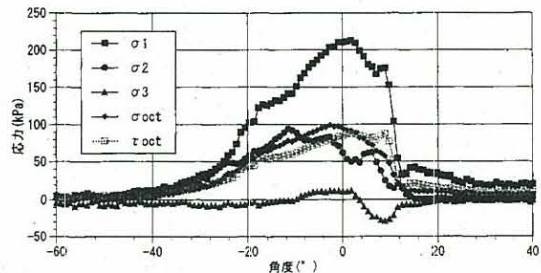


図8 図7から算出した各応力
Fig. 8 Calculated stresses from data shown in Fig. 7

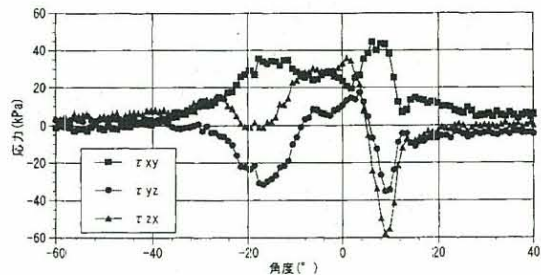


図9 図7から算出したせん断応力
Fig. 9 Calculated shearing stresses from data shown in Fig. 7

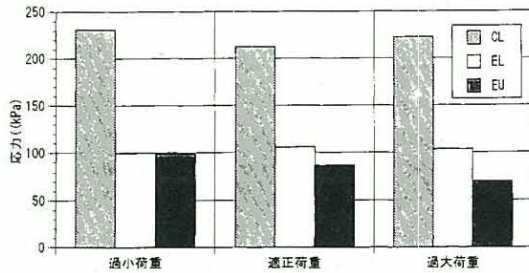


図10 埋設位置の違いによる最大主応力の最大値
Fig. 10 The maximum major principal stress caused by the difference between the locations of buried transducer

てCLは、過小荷重時には231%、適正荷重時201%、過大荷重時217%、また、EUに対してCLは、それぞれ233%、248%および332%となり、タイヤの中心部と側端部では大きな違いとなった。タイヤの中心部での最大主応力 σ_1 を減少させ、タイヤ側端部で分担することにより、タイヤ走行が土壤踏圧に与える影響を小さくできると考えられる。この点についてはさらに実験解析が必要である。

5. 実験後の測定器の状態

タイヤ走行実験後測定器本体の傾斜や移動を測定したが、実験前の姿勢および位置とほとんど変わらず、当初の設計方針を満たしていることが確認された。本測定器で6方向応力を測定した結果、諸応力算出が可能であり、土壤踏圧の解析に有用であるといえる。

V 要 約

6個の圧力センサを利用して6方向の応力を測定することで、土中応力状態を知ることができる土中応力測定器を開発した。この測定器による応力の測定状況を把握するために、測定器をタイヤ進行方向のタイヤ中心部ラグ直下、タイヤ側端部ラグ直下ならびにアンダートレッド直下の3ヶ所に土壤表面から深さ25cmの位置(耕盤上)に埋設し、タイヤ下土中応力を測定した。

得られた主な結果は次のとおりである。

1) 本測定器は、頂角 30° 、高さ120mmの円錐形の台座部をヘッド部下部に取り付け、地表面をタイヤが走行した時にヘッド部の傾斜や移動を極力

少なくする構造にした。

2) 6方向応力の実測値から応力テンソル、主応力、8面体垂直応力、8面体せん断応力、最大せん断応力および主応力値およびそれらの方角を算出することが可能になった。

3) タイヤ中心部ラグ直下とタイヤ側端部ラグ直下の最大主応力 σ_1 の最大値は3種類の荷重では顕著な差は表われなかった。しかし、それぞれの荷重においてタイヤの中心部と側端部では2倍以上の差となった。

謝 辞

土中応力測定器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。記して謝意を表わします。

記 号

$\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$: x, y, zの各座標軸と法線応力とのなす角 [°]

$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$: 圧力センサ x, y, zでの垂直応力 [kPa]

$\sigma_{n1}, \sigma_{n2}, \sigma_{n3}$: 圧力センサ n_1, n_2, n_3 での垂直応力 [kPa]

$\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$: x, y, z座標系のせん断応力 [kPa]

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$: 最大, 中間, 最小主応力 [kPa]

σ_{oct} : 8面体垂直応力 [kPa]

τ_{oct} : 8面体せん断応力 [kPa]

参 考 文 献

- 1) Arvidsson, J., Hakansson, I.: A model for estimating crop yield losses caused by soil compaction, Soil & Tillage Research, 20, 319-332, 1991
- 2) Young, R.A., Voorhees, W.B.: Soil erosion and runoff from planting to canopy development as influenced by tractor wheel-traffic, Trans. ASAE, 25(3), 708-712, 1982
- 3) Verma, B.P., Bailey, A.C., Schafer, R.L., Futral, J. G.: A pressure transducer in soil compaction study, Trans. ASAE, 19(3), 442-447, 1976
- 4) 米川智司, 木谷 取, 岡本嗣男, 坂井直樹: 耕うん時の土壤-機械系の力学的挙動計測法に関する研究(第1報), 農機誌, 50(6), 19-26, 1988
- 5) Nichols, T. A., Bailey, A. C., Johnson, C. E., Grisso, R. D.: A stress state transducer for soil, Trans. ASAE 30(5), 1237-1241, 1987
- 6) 黒木剛司郎: 材料力学, 森北出版株式会社, 93-97, 1985
- 7) Harris, H.D., Bakker, D.M.: A soil stress transducer

- for measuring in situ soil stresses, *Soil & Tillage Research*, 29, 35-48, 1994
- 8) Bailey, A.C., Burt, E.C.: Soil stress states under various tire loadings, *Trans. ASAE*, 31(3), 672-676, 682, 1988
- 9) Koolen, A.J., Kuipers, H.: 農業土壌力学 (木谷収監訳), 養賢堂, 12-17, 39-45, 1986
- 10) Salokhe, V.M., Gee-Clough, D.: Technology showcase applications of enamel coating in agriculture, *J. Terramechanics*, 26(3/4), 275-286, 1989
- 11) 谷口哲司ら: 大形ソイルビン用タイヤテストの試作, *農機北支報*, 33, 24-27, 1992
- 12) Kumar, L., Weber, J.A.: Compaction of unsaturated soil by different stress paths, *Trans. ASAE*, 17(6), 1064-1069, 1072, 1974
- 13) Raper, R.L., Bailey, A.C., Burt, E.C., Way, T.R., Liberati, P.: The effects of reduced inflation pressure on soil-tire interface stresses and soil strength, *J. Terramechanics*, 32(1), 43-51, 1995

(原稿受理: 1996年2月2日・質問期限: 1997年3月31日)