

## 車輪重量が土壌変形に及ぼす影響

誌名	琉球大学農学部学術報告 = The science bulletin of the College of Agriculture, University of the Ryukyus
ISSN	03704246
著者	鹿内, 健志 上野, 正実
巻/号	41号
掲載ページ	p. 185-191
発行年月	1994年12月

## 車輪重量が土壌変形に及ぼす影響

鹿内健志\*・上野正実\*

Takeshi SHIKANAI and Masami UENO : Effects of the weight of a wheel to the soil deformation

キーワード：車輪重量（接地荷重）、土壌変形、走行性

Key words : wheel weight, soil deformation, traveling performance

### Summary

The states of soil deformation under a wheel were analyzed in this study in order to make clear the basic traveling performances. A series of picture of markers attached to the inner side walls of a soil bin apparatus were taken through acrylic resin plate at the traveling test of a wheel. The coordinates of the markers in the pictures were read by using a detecting device for plane position, and displacements of the markers and strains in the soil were calculated. The deformation analyses were carried out under the three levels of wheel weight, i.e., 20kgf, 40kgf and 60kgf with 14% slip. Typical patterns of the strain distribution at the initial sinkage without rotation were made clear, and pictorial paterrens were described. Furthermore, changes of the distribution pattern accompanied with the rotation were discussed to each wheel weight. It was also made clear the characteristics that how to affect the wheel weight to the strain distributions and its changes.

### 緒 言

トラクタなどの走行性は土壌と車輪との相互作用によって決まる<sup>1)</sup>。その中でも、土壌の変形は、接地応力の分布状態に直接関与するので、走行性を左右する主要因と言える。車輪重量すなわち接地荷重が大きいと、硬い路面では一般に車輪のけん引力は増加する。一方、軟弱な地盤では接地荷重によって沈下量が増加するため、走行抵抗が大きくなり、けん引力は逆に減少することもある。沈下は土壌変形の一側面であるので、走行性の基礎研究においては、変形状態すなわちひずみの分布状態を詳細に解析する必要がある<sup>5)</sup>。この観点から、筆者らは車輪の回転やすべりが土壌変形に与える影響の分析を試みている<sup>3)</sup>。

本研究では、接地荷重の違いによる土壌内のひずみの分布状態の特徴を明かにし、車輪の走行性向上の基礎資料を得ることを目的とした。

---

\*琉球大学農学部生物生産学科

琉球大学農学部学術報告、41：185～191（1994）

## 方 法

本研究では、平面ひずみ状態を想定した土槽実験装置を用いて一連の車輪走行実験を行った。実験装置については別報で述べた通りである<sup>2,4)</sup>。すべり率は、けん引効率の高い14%に設定し、接地荷重を20kgf、40kgf、60kgfの3水準を選定した。土槽の深さは60mm、間隙比は平均0.61に調整した。車輪は直径300mm、幅410mmで、周速度は5mm/minと微速に設定した。供試土壌は気乾状態の豊浦標準砂を用いた。実験条件を表1に示す。

土槽の内寸は、長さ1888mm、幅414mm、深さ617mmで平面ひずみの条件を満足する堅固な鋼鉄枠構造である。両側壁中央部は厚さ30mmの透明アクリル板になっており土の変形挙動の観測が可能である。土槽内壁面に土粒子とともに移動するマーカを設置した。車輪走行時に連続的にマーカの写真撮影を行い、その写真を用いて、平面位置検出装置によってマーカの座標を検出した。これより、マーカの変位を算出できる。

マーカは、ポリエステルフィルムに十字線を印刷したもので、土粒子の動きへの追従性を高めるために、裏側に標準砂をのり付けしてある。マーカは砂のまきだし時に一段毎に30~40個、これを5段、計150~200個貼付けた。

平面位置検出装置で読み取った座標データは、座標ファイルとして保管する。この作業を回転角0~10度までの写真すべてについて行った。これより、マーカの変位を求め、有限要素法で用いている方法でひずみを算出する。すなわち、3個のマーカを三角形要素の節点としてそれらの変位増分より要素内のひずみを求めた。ここでは平面ひずみを想定しているため、水平および鉛直方向の垂直ひずみ、せん断ひずみ、ならびに、体積ひずみが得られる。ひずみの分布状態を視覚的にわかりやすくするために

等値線を表示した。一連の手順をフローチャートとして図1に示す。

ひずみの等値線は、0%を中心に0.6%間隔で±2.4%まで表示した。これ以上(絶対値で)のひずみ値の領域は空白となる。また、正のひずみを実線で、負のひずみを破線で表示した。垂直ひずみが正值の場合は伸長、負の値の場合は圧縮を意味する。体積ひずみ $\epsilon_v$ は、水平および鉛直方向のひずみ $\epsilon_h$ 、および $\epsilon_v$ の和に相当し、正の値は膨張、負の値は収縮を意味する。せん断ひずみについては、土壌中に四角形の要素を想定し、上辺が左方へ、下辺が右方へ傾く状態を負とし、その逆を正とした。

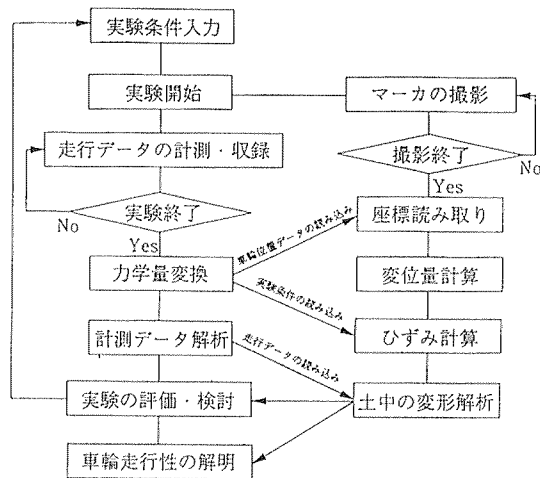


Fig. 1 Flowchart of the soil deformation analysis

## 結果と考察

### 1. 初期沈下における変形

車輪が回転せずに静かに沈下する初期沈下時の土壌の変形状態を、接地荷重20kgf、40kgf、60kgfについて分析した。

鉛直方向の垂直ひずみ  $\epsilon_y$  の等値線図を図2に重量別に示す。20kgf では車輪直下に負の領域はほと

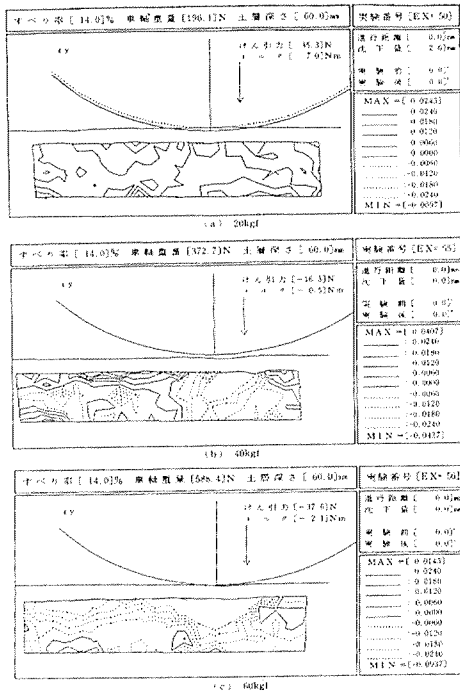


Fig. 2 Distributions of normal strain of vertical direction under three levels of the wheel weight (initial sinkage)

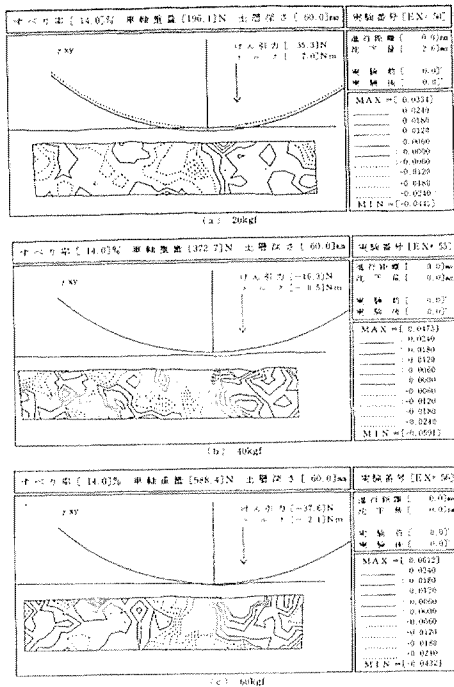


Fig. 3 Distributions of shearing strain under three levels of the wheel weight (initial sinkage)

んどないが、40kgf、60kgf では広い範囲に分布し、車輪によって土壌が下方へ圧縮される状態がわかる。鉛直方向への変形は接地荷重が重くなると、より深く、広い範囲に影響を及ぼすことがわかる。

水平方向の垂直ひずみ  $\epsilon_x$  は、車輪直下に正の領域をとるが、接地荷重が大きいほどその領域は深くまで広がる、すなわち、水平方向に伸長する範囲が拡大する。逆に、その両側には、負の領域が表れている。これは、車輪直下の水平方向への伸びによってその周りが圧縮されて生じたものである。

体積ひずみをみると、20kgf では車輪直下に値の小さな正の領域が広がっている。これは、ここでは鉛直方向の圧縮量より水平方向の伸長量が大きいためわずかながら体積膨張が生じたものである。一方、40kgf、60kgf では、車輪直下に大きな負の領域が広く分布している。

せん断ひずみの分布を図3に示す。いずれの接地荷重においても、車輪鉛直中心線を境に、右側に正の領域、左側（進行方向）に負の領域が生じている。0.6%以上の正の領域を比較すると、接地荷重が大きいほど等値線が深い位置まで達している。2.4%以上の正の領域についても同様の傾向がみられる。このように、接地荷重が大きいほど同一ひずみレベルの分布領域は広く、変形が大きいことがわかる。

以上のように、初期沈下におけるそれぞれのひずみの典型的な分布パターンを明かにした。それらを模式的に図4に示しておく。

## 2. 車輪回転に伴うひずみ分布の変化

車輪回転時の土壌のひずみを20kgf、60kgfについて、回転角0.5度~10.0度まで、0.5度間隔で解析した。

### (1) 接地荷重20kgf

接地荷重20kgfにおける鉛直方向の垂直ひずみ  $\epsilon_y$  は、いずれの回転角でも、車輪直下に弱い正の領域または負の領域があり、それをはさみ両側に、大きな正の領域が分布している。すなわち、回転角1.5度以下では車輪直下に弱い正の領域、2.0度および2.5度で小さく弱い負の領域が発生している。3.0度および3.5度では再び正の領域となり、4.0度および4.5度で小さく弱い負の領域が発生している。5.0度では-0.6%の大きな領域が発生している。5.5度以降もこのよう

な正負の変化がみられるが、回転角の増加に伴って、しだいに負の領域は拡大していく傾向がみられる。車輪直下の両側には、つねに正の領域が発生している。この領域は浅い部分で発生し、横に広がっている。車輪の回転に伴い、車輪前方側では正の領域が縮小し、車輪後方では正の領域が拡大している。しかるに、0.6%の領域は変化がほとんどみられず、狭い範囲で大きく変形していることがわかる。

水平方向の垂直ひずみ  $\epsilon_v$  の0.6%の正の領域に注目すると、0.5度では土層の約1/3の深さまで達しており、1.0度では土層の半分程度まで達している。1.5度および2.0度では土槽の底面付近まで達している。ところが、2.5度および3.0度では、その範囲は土層の1/2程度まで縮小している。3.5度以降は再び土槽の底まで達し、車輪の回転に伴って前方にずれ、その領域の幅も広がっている。車輪直下の2.4%以上の正の領域に注目すると、この領域は拡大・縮小を繰り返しながら大きくなる傾向がみられる。このような領域の変化は水平方向の変化が著しく表れている。車輪直下の正の領域をはさむように両側に負の領域が発生している。これらの負の領域は、前方側ではあまり変化がみられないが、車輪後方側ではひずみが残留するために、その領域が拡大している。

接地荷重 20kgf における体積ひずみをみると、車輪下の広い範囲に小さな正の領域が広がっている。回転角 1.5度、2.0度などでは、車輪下に負の領域があるが、いずれも狭い範囲にとどまっている。正の領域は、鉛直方向の圧縮量がわずかで、水平方向の伸長量が相対的に大きいことを意味している。この正の領域は回転が進んでも、他のひずみのような大きな変化は生じなかった。

せん断ひずみの分布を図5に示す。車輪軸直下を中心に、後方側(右側)に正の領域、前方側(左側)に負の領域が発生している。このパターンは、基本的には、初期沈下時のものが車輪前方に偏移した形状で、零せん断ひずみ線は車軸鉛直中心線のやや前方から発生している。車輪直下の0.6%の領域は、回転角1.0度までは、土層の深さ5/6程度まで達している。1.5度では、土層の約1/2まで縮小し、2.0度および2.5度では5/6程度まで再度広がり、3.0度以降、この領域は、鉛直方向には拡大・縮小を繰り返しながらも小さくなっていき、逆に水平方向には広がっている。ひずみ量2.4%の領域に注目すると、回転角3.5度までは拡大・縮小の変化はわずかであるが、4.0度で急激に広がり、それ以降は徐々に拡大している。車輪後方の土壌は回転に伴って、狭い範囲において大きくせん断変形するこ

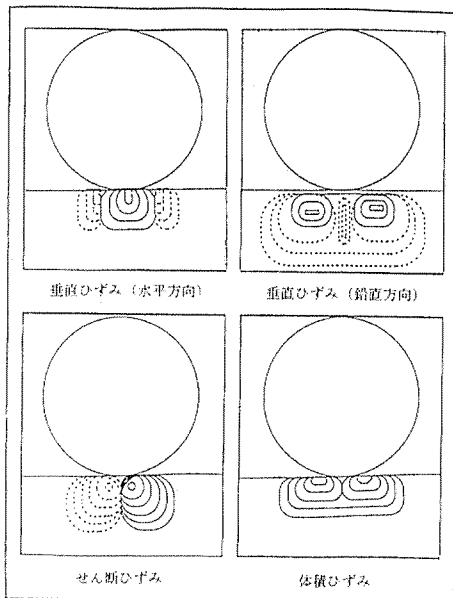


Fig. 4 Typical patterns of strain distributions in the initial sinkage

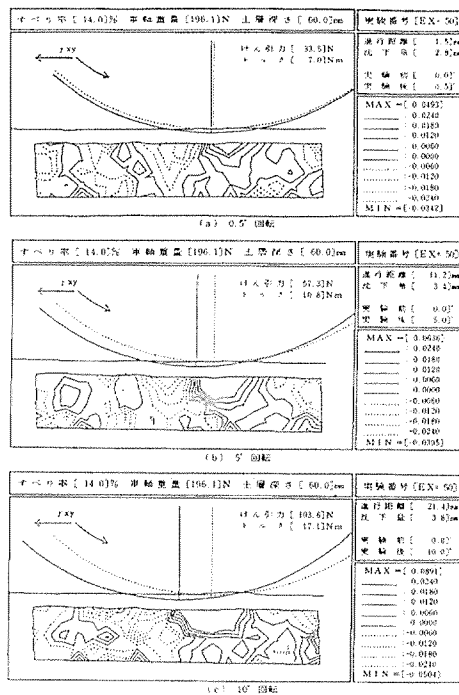


Fig. 5 Changes of the distribution pattern of shearing strain with rotation of the wheel (20kgf of wheel weight)

とがわかる。車輪前方の負の領域は、0.5度および1.0度では正の領域とほぼ対称に分布している。

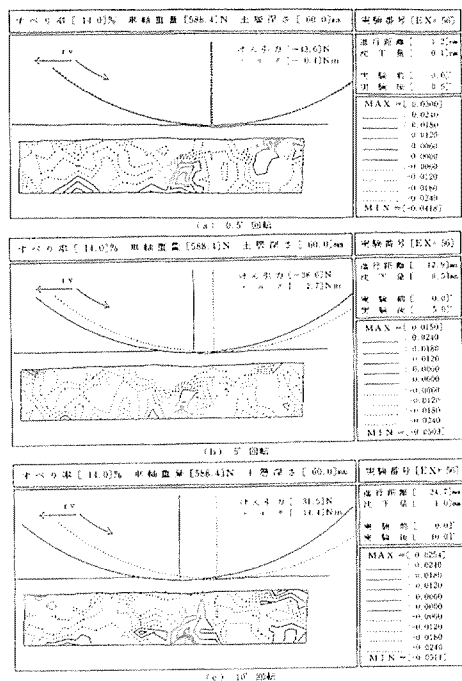


Fig. 6 Changes of the distribution pattern of volumetric strain with rotation of the wheel (60kgf of wheel weight)

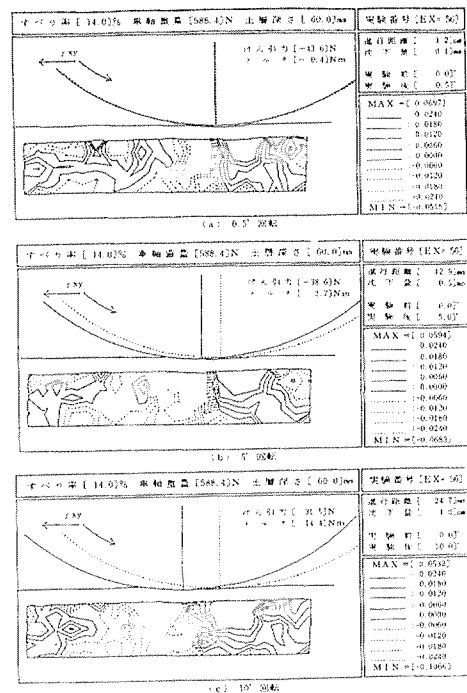


Fig. 7 Changes of the distribution pattern of shearing strain with rotation of the wheel (60kgf of wheel weight)

−0.6%の領域は、1.5度以降、拡大しているが、正の領域とは異なり、水平方向ではなく鉛直方向へ拡大している。

(2) 接地荷重60kgfの場合

接地荷重60kgfでは、鉛直方向の垂直ひずみ $\epsilon_v$ は車輪直下に大きな負の領域が表れており、鉛直方向に強く圧縮されている。回転角0.5度~2.0度においては、車輪後方に小さい正の領域がみられ、前方には負の領域が広がっている。2.5度以降では車輪前方にも正の領域が表れている。4.5度~8.0度においては、車輪直下の負の領域は強さ、大きさともに明瞭な差はみられない。車輪前方と後方の正の領域は拡大・縮小を繰り返しながらも、回転に伴って大きくなる傾向がある。これは、土壌が車輪直下では縮み、その両側では伸びていることを示す。車輪直下の負の領域は、回転開始時以外はあまり差がないようである。これは、沈下量はある値以上には大きくならないことに対応していると思われる。車輪直下の両側の正の領域は、8.0度を境に拡大している。これらの位置では水平方向に強い圧縮を受け、鉛直方向に伸長するためと考えられる。

水平方向の垂直ひずみ $\epsilon_x$ をみると、車輪直下の正の領域が土層の底部まで達している。この正の領域は、拡大・縮小を繰り返しながらも、車輪の回転に伴って大きくなっている。車輪直下の2.4%の領域は、回転角4.0度まではパターンが変化するものの、領域の大きさはほとんど変わらない。5.5度以降は、この領域は土層のおよそ2/3の深さでとどまり、横方向にのみ広がっている。車輪直下の両側の負の領域は、全般的に前方が後方よりも大きい。これは、車輪が進むため、前方に強く圧縮されることによるものである。

体積ひずみの分布を図6に示す。20kgfの場合とは異なり、車輪下には負の領域が広がっている。この領域は車輪直下を境に、前方と後方に分かれて発生している。すなわち、車輪直下の深い下層には、体積膨張を示す領域がみられる。ほとんどの回転角度において、後方よりも前方に大きなひずみが発生している。これは、車輪が前方下に土壌を強く圧縮し、この部分で車輪を支える状態になっているものと思われる。前方の圧縮領域は、回転に伴ってやや拡大するが、後方ではほとんど変化しない。

せん断ひずみ分布を図7に示す。20kgfの場合と同

様に、車軸鉛直中心線付近を境に、前方に負の領域、後方に正の領域が発生している。2.4%の正の領域に注目すると、回転角1.5度までは土層の約2/5の深さまで広がり、2.0度では1/2の深さまで達している。2.5度~3.5度においては、2/5の深さまでその広がりは縮小して、4.0度では1/2まで回復している。4.5度以降は、およそ2/5の深さを保つが、その領域は横方向に拡大している。このように土壌は狭い範囲で大きな変形をしていることがわかる。また車輪前方の負の領域に注目すると、車輪回転初期からかなり強いひずみが広がっている。車輪の進行に伴って、負の領域は車輪とともに前方へ移動し、正の領域は後方に残留しながら拡大する。

### 3. 接地荷重の影響

接地荷重が土壌の変形に及ぼす影響を検討し、また、沈下量およびけん引力との関係について検討した。すべり率14%について、接地荷重を20kgf、40kgf、60kgf、車輪回転角度を1度、5度、10度の状態について分析を行った。

#### (1) 鉛直方向の垂直ひずみ

回転角1度の場合、20kgfでは車輪直下に正の領域、40kgf、60kgfでは負の領域が発生している。20kgfにおいて正の領域が生じたのは、接地荷重が小さいために圧縮領域が狭い範囲に局限され、観測にかからなかったものと思われる。回転角が5度あるいは10度になると、20kgfにおいても車輪直下に負の領域が発生している。接地荷重20kgf、回転角1度では、沈下量はきわめて小さいが、5度、10度と回転が進むと沈下量が増加している。40kgf、60kgfを比較すると、車輪直下の圧縮領域の大きさは異なるが、回転に伴って車輪直下の負の領域はいずれも拡大している。60kgfでは、5度までの圧縮領域の拡大速度が、それ以降、10度までより大きくなっている。

#### (2) 水平方向の垂直ひずみ

水平方向の垂直ひずみは、いずれの場合も車輪直下に正の領域（伸長領域）が発生している。20kgfの正の領域は、前述のように、回転に伴って土層の深い位置まで広がっていく。しかし、60kgfの場合は領域の拡大の様子が20kgfのそれとは若干異なっている。車輪直下の正の領域は、沈下量の増加にあいまって拡大するが、沈下量がある限度を越えると変化は小さくなる傾向がみられる。

#### (3) 体積ひずみ

車輪直下の体積ひずみの分布を接地荷重別に比較してみると、20kgf、40kgfでは正の領域、60kgfでは負の領域が発生している。また、20kgfも40kgfも回転角の増加に伴って、負の領域は拡大している。なお、60kgfで回転に伴って下層の正の領域が増加するのは、この部分のせん断によるダイレイタンスーの効果であろうと思われる。

#### (4) せん断ひずみ

車輪直下から後方に広がる正の領域は、当然ながら、接地荷重が大きいほど顕著である。この領域は、鉛直方向より水平方向に拡大する傾向がある。すなわち、正の領域は沈下量に比例してある程度拡大するが、それには限度があるものと思われる。一方、この領域は車輪の回転に伴ってほとんど残留するので水平方向に拡大する。車輪直下前方の負の領域は、20kgfでは回転が進行してもあまり大きくならないが、60kgfでは著しく拡大した。

一般に、けん引力は接地荷重の増加に伴って大きくなることが知られている。しかるに、別報で述べたように、平均けん引力は、接地荷重がある程度以上大きくなると、差がなくなることがわかった。接地荷重が増加するとその直下の正の領域は大きくなり、車輪の推進力は増加するものと思われる。一方、車輪直下前方の負の領域も大きくなるため、走行抵抗も増加する。このため、2つの力の合力であるけん引力は、ある値以上には増えないものと考えられる。

## 摘 要

本研究では、車輪の基本的な走行性を解明するために、車輪下の土壌の変形特性を解析した。車輪走行実験中に土槽側壁に設置したマーカを撮影し、平面位置検出装置を用いて座標値を読み取り、土粒子の変位ならびに土壌のひずみを求めた。すべり率14%について、車輪重量を20kgf、40kgf および60kgf の3水準に設定して解析を行った。車輪が回転せずに沈下する状態の典型的なひずみ分布パターンを見だし、それらを模式的に表示した。次に、回転に伴ってこれらの分布パターンがどのように変化するかを、接地荷重別に示した。最後に、ひずみの分布およびその変化に対する接地荷重の影響について、その特徴を述べた。本研究では、すべり率を14%に限定したので、今後、すべり率、土槽の深さなどを変えて解析することを予定している。

## 参考文献

1. Bekker, M.G. 1960 Off-the-road locomotion, 130~166, Michigan (USA), Univ. Michigan Press
2. Nohse, Y., Hashiguchi, K., Ueno, M., Shikanai, T. and Koyama, F. 1991, A measurement of basic mechanical quantities, *J. Terramechanics*, **28** (4) : 358~370
3. 上野正実, 橋口公一, 泉裕巳, 能勢行則, 鹿内健志 1993 走行車輪下の土の変形解析システムの開発, *九大農学芸誌*, **48** (1・2) : 103~110
4. 上野正実, 鹿内健志 1994 車輪重量がけん引性能に及ぼす影響, *琉大農学術報告*, No.41, 印刷中
5. Windisch, E.J. and Yong, R.N. 1970 The determination of soil strain-rate behaviour beneath a moving wheel, *J. Terramechanics*, **7** (1) : 57~67
6. Wong, J. 1967 Behaviour of soil beneath rigid wheels, *J. Agri. Engng. Res.*, **12** (4) : 257-269