九州大学学術情報リポジトリ
Kyushu University Institutional Repository

剛性車輪による地盤の繰返し転圧特性に関する基礎的研究

岡安, 崇史
九州大学ベンチャービジネスラボラトリー

橋口, 公一
九州大学大学院農学研究院生物資源環境科学府生産環境科学専攻生物生産工学研究室

尾崎, 伸吾
九州大学大学院農学研究院生物資源環境科学府生産環境科学専攻生物生産工学研究室

牧瀬, 大二郎
九州大学大学院農学研究院生物資源環境科学府生産環境科学専攻生物生産工学研究室

他

https://doi.org/10.15017/21083

出版情報：九州大学大学院農学研究院学芸雑誌. 55 (2), pp.205-214, 2001-02. 九州大学大学院農学研究院
バージョン：
権利関係：

九大農学芸誌（Sci. Bull. Fac. Agr., Kyushu Univ.）
第55巻　第2号　205-214（2001）

剛性車輪による地盤の繰返し転圧特性に関する基礎的研究

岡安崇史*・橋口公一・尾崎伸吾
牧瀬大二郎・上野正実**・深見公一郎**
九州大学大学院生物資源環境科学府生産環境科学専攻生物生産工学研究室
（2000年10月31日受付，2000年11月10日受理）

Fundamental Study on Soil Compaction due to Repeated Traveling of a Rigid Wheel

Takashi OKAYASU*, Koichi HASHIGUCHI, Shingo OZAKI, Daijiro MAKISE, Masami UENO** and Koichiro FUKAMI**
Laboratory of Bioproduction Engineering,
Department of Bioproduction Environmental Science,
Kyushu University, Fukuoka, 812-8581

緒　　言

トラクタや収穫機等の圃場機械は，水田や畑地等の軟弱な土壌条件下での作業を強いられる．特に，畑地においては，機械の走行により土壌が著しく固結して，土壌の通気性や保水性等を低下させる．これは作物の生長を阻害する要因となり得る．このため，圃場機械には優れた走行性に加えて，転圧等による作物生育環境への負荷を低減し得る走行部の開発が求められている．他方，盛土や道路基盤等の施工に際しては，十分に地盤を締固める必要がある．そのようなことから，従前より転圧現象に関する種々の研究がなされてきた．河原・星加（1993）は，剛性車輪による転圧試験において，転圧回数の増加とともに車輪の沈下増分が減少することを示した．横田他（1998）は，ロードローラによる繰返し転圧試験を実施し，同様の結果を報告している．上野他（2000），Fukami *et al.*（2000）は，土の変位量が転圧回数の増加にともない指数関数的に減少するとともに，転圧領域が地盤表層付近に集中し，下層領域はほとんど転圧されないことを指摘している．近江谷・佐野（1992）は，地盤内の硬度をリアルタイムに3次元計測し得る装置を開発し，農用機械走行後の地盤内硬度分布を明らかにした（Ohmiya，1999参照）．

一般に，圃場管理作業においては，機械が同一地盤上を複数回走行することが予想されることから，繰返し走行時の地盤の変形メカニズムを解明する必要があるが，既往の研究の多くは地盤の表面変位の特性を論じたものであり，地盤の変形を定量的に解析するまでには至ってない．

本研究では，精密車輪実験装置を用いて剛性車輪を砂地盤上で複数回走行させるとともに，走行車輪下の土の変位を高精度に計測した．さらに，すべり率を数水準に変えた走行実験を実施して，繰返し転圧時の地盤の圧縮特性について解析を行った．

実　験　方　法

(1) 車輪走行実験

図1に精密車輪実験装置（Nohse *et al.*，1992）および土のオンライン変位計測システム（橋口他，1998）の構成を示す．精密車輪実験装置は土槽，車輪走行部，土充填装置，解析用コンピュータより，また，土のオンライン変位計測システムはラインシフトカメラ，画像処理装置より構成される．車輪走行部には，

* 九州大学ベンチャービジネスラボラトリー
** 琉球大学農学部生物生産学科

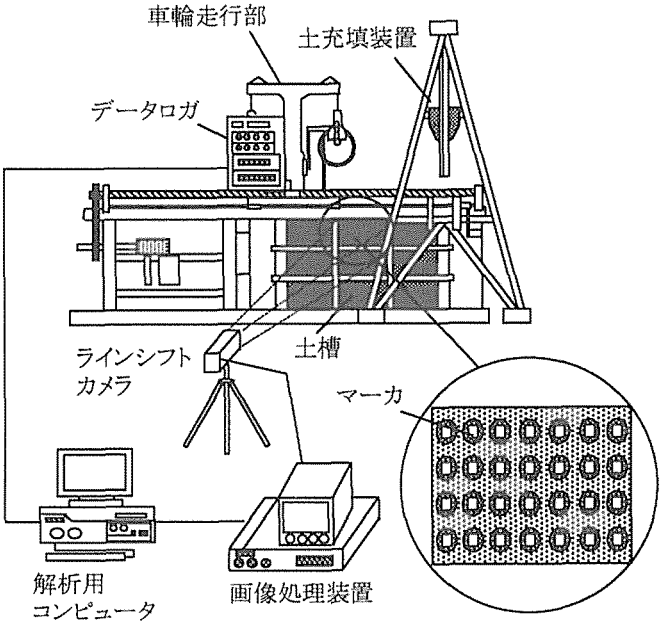


図1　精密車輪走行実験装置と土の変位オンライン計測システムの構成

表1　実験条件

設定項目	設定条件
すべり率（%）	3.9, 9.9 21.9, 32.7
走行回数（回）	5（同一方向走行）
車輪の種類	鉄製剛性車輪
車輪荷重	217
供試土	気乾豊浦標準砂
土層深さ（mm）	190
間隙比	0.72, 0.70, 0.71, 0.72

けん引力，トルク，沈下量および接地応力等の力学量を高精度に測定し得る種々のセンサが取り付けられており，実験中に計測される力学量はデータロガを介して解析用コンピュータに転送，保存される．実験土層は，気乾状態の豊浦砂を土充填装置より空中落下させ，間隙比がほぼ一定になるように作製した．土の変位は，土層とアクリル板の間に配置したマーカの動きを，ラインシフトカメラで撮影し，画像処理装置を用いてその位置を算出することにより得られる．表1に実験条件を示している．

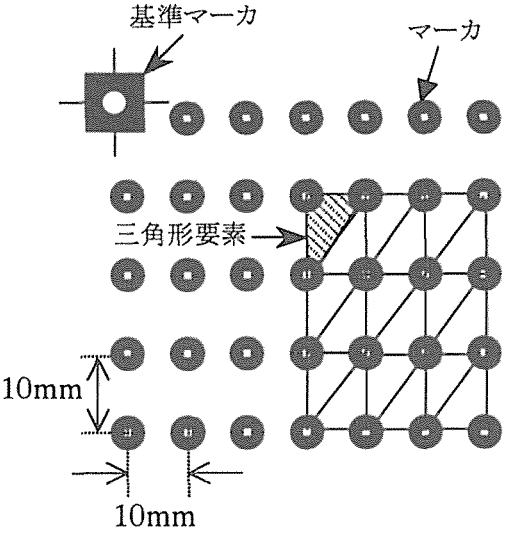


図2　マーカの配置状況

(2) 地盤の変形解析

地盤の変形（ひずみ）は，前述の土の変位計測システムで得られたマーカの変位と図2に示される3個の

マーカを節点とする三角形要素より，次式のように有限要素法で使われる手法を用いて算出される．

$$\begin{cases} \varepsilon_x = \dfrac{\partial u}{\partial x} \\ \varepsilon_y = \dfrac{\partial v}{\partial y} \\ \gamma_{xy} = \dfrac{\partial u}{\partial y} + \dfrac{\partial v}{\partial x} \\ \varepsilon_v = \varepsilon_x + \varepsilon_y \end{cases}$$

ここに，ε_x：水平方向垂直ひずみ

ε_y：鉛直方向垂直ひずみ

ε_v：体積ひずみ

γ_{xy}：せん断ひずみ

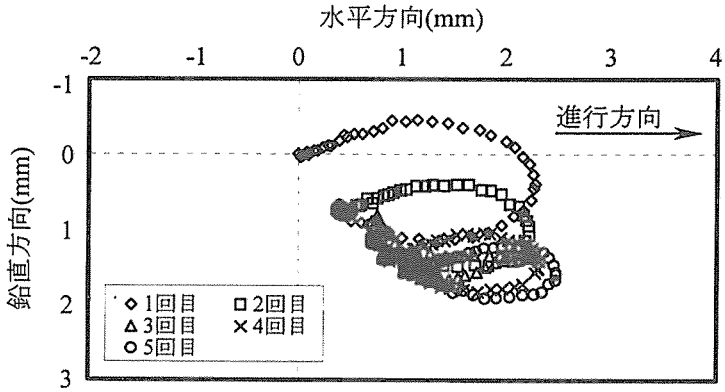
u：マーカの水平方向変位（mm）

v：マーカの鉛直方向変位（mm）

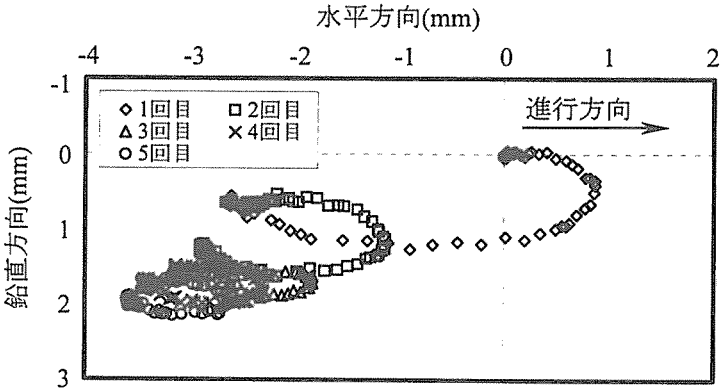
結果および考察

(1) マーカの変位軌跡

図3はすべり率3.9および21.9%における車輪下の土粒子（マーカ）の変位軌跡を示している．すべり率3.9%の場合，1回目走行時に土粒子は，車輪の接近に伴い車輪の進行方向上向きへ移動し，その後，円弧を描くように下方へ向きを変える．さらに，土粒子は，車輪後方下向きへ変位し，車輪がマーカのほぼ真上に位置する際に最深部に達するが，車輪通過後，後方上向きに変位し停止する．一方，すべり率21.9%では，土粒子は3.9%と同様に車輪の接近に伴い進行方向へ円弧を描くように変位するが，上方への変位はほとんど見られず，また，進行方向への変位量も3.9%の半



(a) すべり率 3.9%



(b) すべり率 21.9%

図3　土粒子の変位軌跡の比較

分以下に留まっている．その後，土粒子は下方へ向きを変えつつ後方へ変位し，最深部に達する位置は初期位置よりさらに後方になる．このような一連のマーカの動きから描かれる軌跡は，すべり率によらず横長の楕円形状となる．しかし，残留する変位軌跡の性状はすべり率により著しく異なる．すべり率3.9%では，2回目走行以降，走行回数の増加に伴い変位軌跡の大きさは減少するが，その残留性状はいずれの走行回数においても相似形となる．一方，すべり率21.9%の変位軌跡も3.9%と同様に走行回数の増加に伴ってその大きさが減少するが，高すべり率走行においては後方への土の蹴り出し，いわゆる，排土作用の程度が大きくなるので，その残留性状は後方へ変移する．

土粒子の変位軌跡の形状変化を解析するために，それぞれの走行回数における変位軌跡の水平および鉛直方向の最大変位量を算出し，走行回数毎にそれらの変化を調べた．図4および5に変位軌跡の水平および鉛直方向の最大変位量を示す．いずれの変位量も走行回数の増加に伴い指数関数的に減少しているが，特に，水平方向の変位量はすべり率が大きくなると増大する傾向が見られる．それに対して，鉛直方向の変位量はすべり率による差異がほとんど見られない．このこと

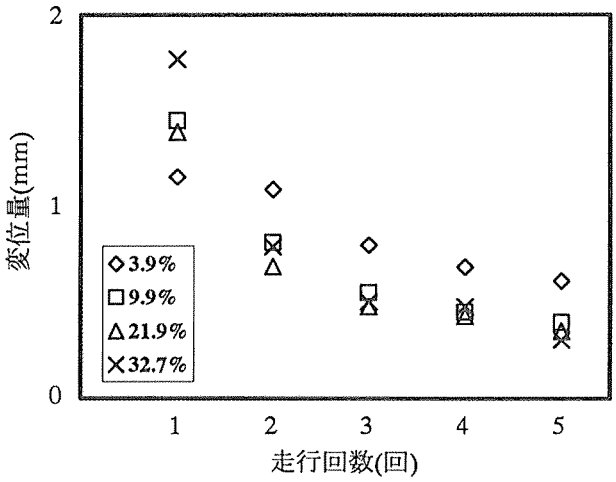


図4　土粒子の水平方向最大変位量の変化（深度20mm）

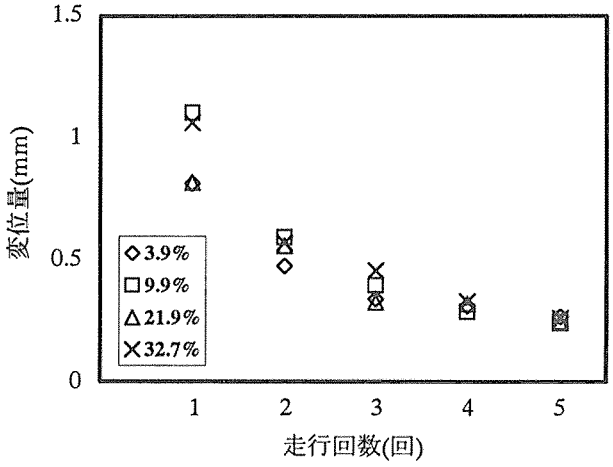
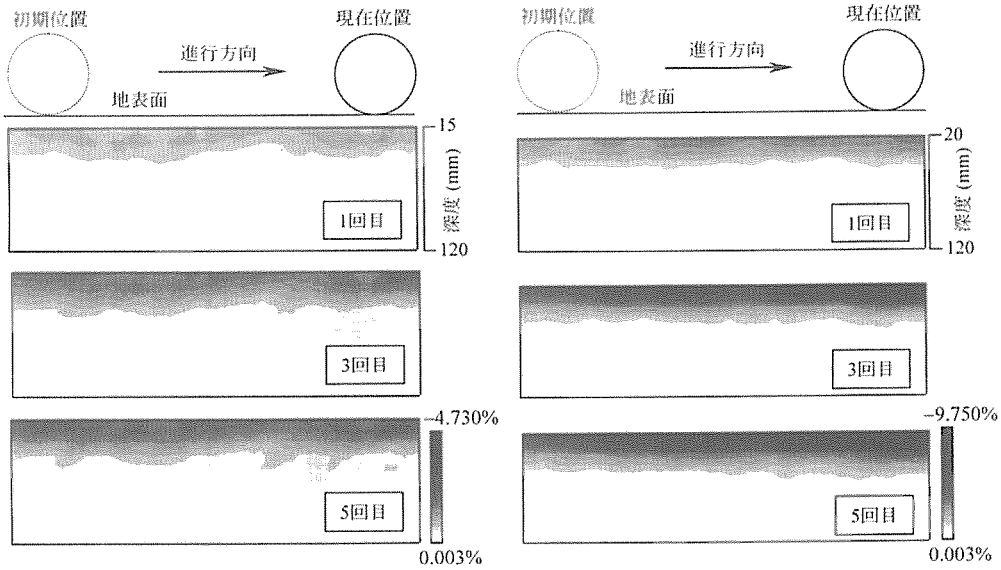


図5　土粒子の鉛直方向最大変位量の変化（深度20mm）



(a) すべり率 3.9%　　(b) すべり率 21.9%

図6　体積ひずみ分布の比較

から，土粒子の鉛直方向変位の主要因は車輪荷重であると判断される．以下では，土粒子の変位量から地盤内のひずみを算出し，地盤の圧縮特性を体積ひずみの経時的変化から考察する．

(2) 体積ひずみ

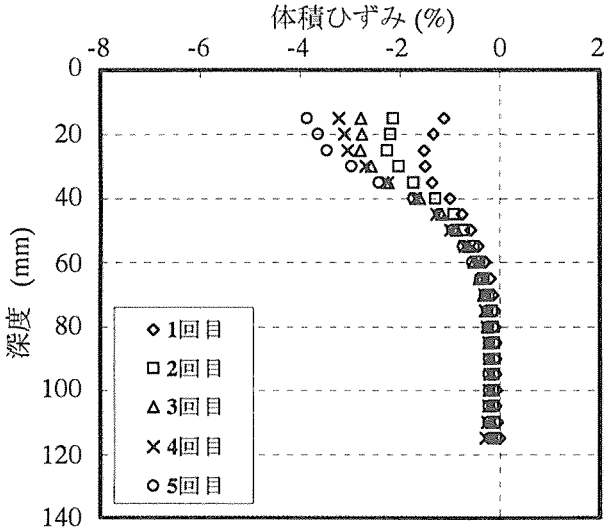
図6にすべり率3.9および21.9%における体積ひずみ分布を示している．体積ひずみの大きさはそれぞれ図示した範囲内を20階調の濃淡色で表し，その符号は正値が膨張，負値が圧縮を示す．すべり率21.9%は3.9%に比して，負値で大きな体積ひずみが分布していることから，すべり率が大きくなるほど地盤の圧縮効果が高くなると判断される．また，いずれのすべり率においても，地盤は走行回数とともに徐々に圧縮される傾向が見られる．この特性を詳細に検討するために，定常状態（すべり沈下量が一定値で推移する状態）における体積ひずみを深度別に平均化し，走行回数およびすべり率との関係を調べた．

図7にすべり率3.9および21.9%における体積ひずみの深度別分布を示す．地盤の圧縮特性にはすべり率3.9%において表層付近に分布ムラが見られるが，両すべり率とも表層付近ほど地盤が著しく圧縮される．また，いずれのすべり率においても，体積ひずみは深度70mm まで線形的に減少していることがわかる．

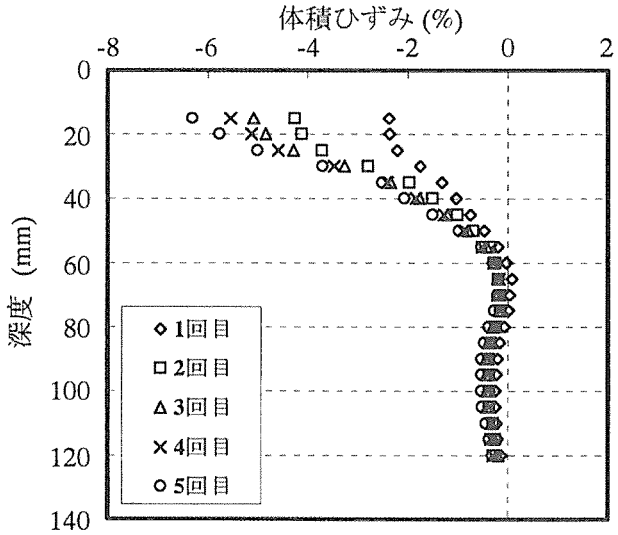
図8に深度20および40mm における転圧回数と体積ひずみの関係を示している．いずれの深度でも地盤はすべり率に関係なく，転圧回数に対して指数関数的に圧縮されるが，その程度は深度によって顕著な差異が見られる．特に，深度20mm の場合，地盤の圧縮量はすべり率3.9%が最も小さく，すべり率が大きくなるにつれてその程度も増大する傾向を示す．また，深度40mm ではすべり率によらず結果が一致していることから，深度が増すとすべり率の影響が小さくなることがわかる．

(3) せん断ひずみ

本節では，地盤のせん断変形が地盤の圧縮特性に与える影響を調べるために，せん断ひずみについて考察する．図9にせん断ひずみの深度別分布を示している．せん断ひずみは，車輪の進行方向を正，逆方向を負と定義し，体積ひずみと同様に定常状態において深度別に平均化したものをプロットしている．すべり率3.9%の場合には，車輪－地盤間のすべり摩擦による後方への排土作用が小さく，車輪は土を前方に押し出しながら走行するため，せん断ひずみは正値を示している．それに対して，すべり率21.9%では後方への排土作用が大きくなるため，負のせん断ひずみが残留する．なお，地盤の圧縮特性はせん断ひずみの符号ではなく，

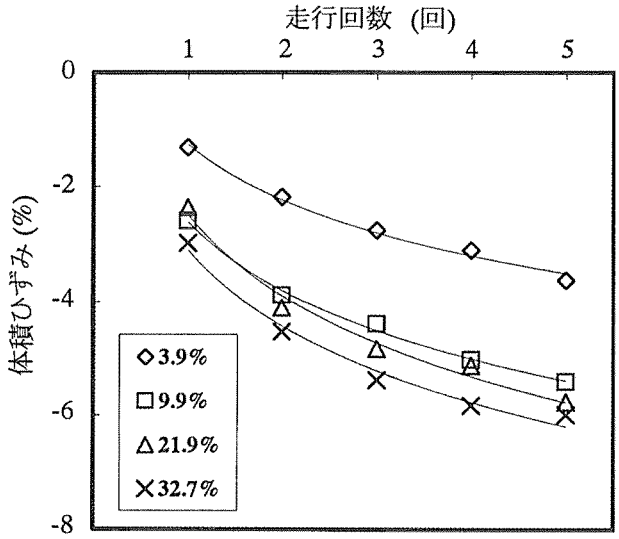


(a) すべり率 3.9%

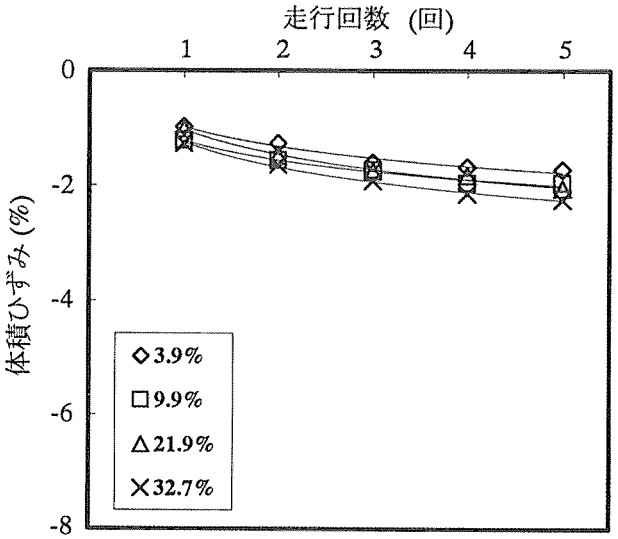


(b) すべり率 21.9%

図7 体積ひずみの深度別分布の比較

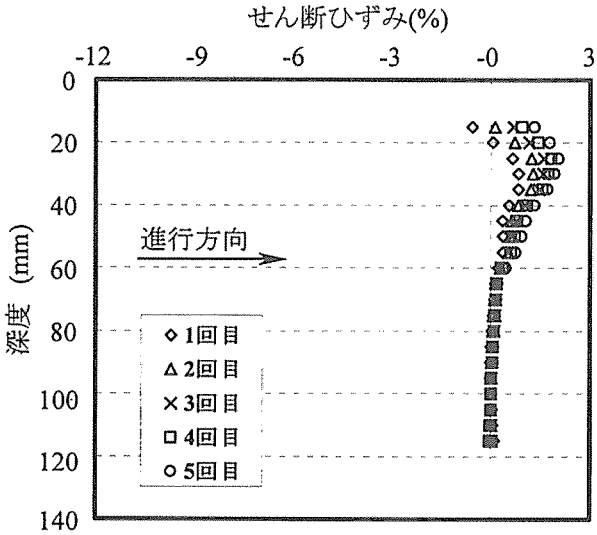


(a) 深度 20mm

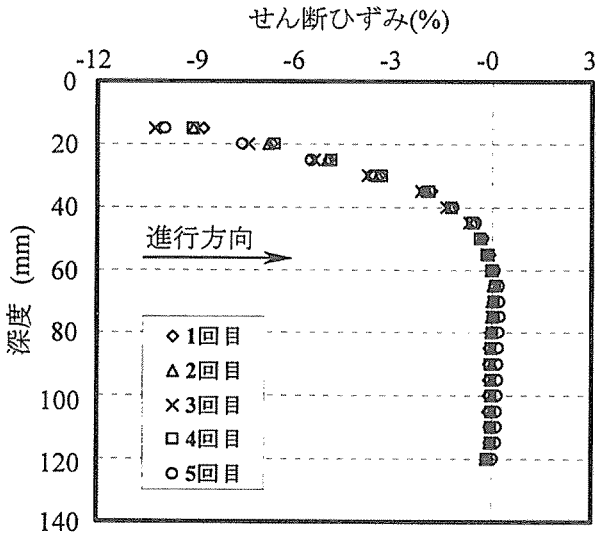


(b) 深度 40mm

図 8　転圧回数と体積ひずみの関係

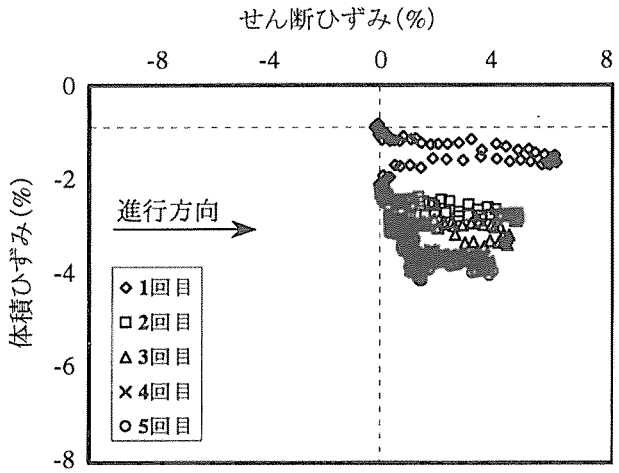


(a) すべり率 3.9%

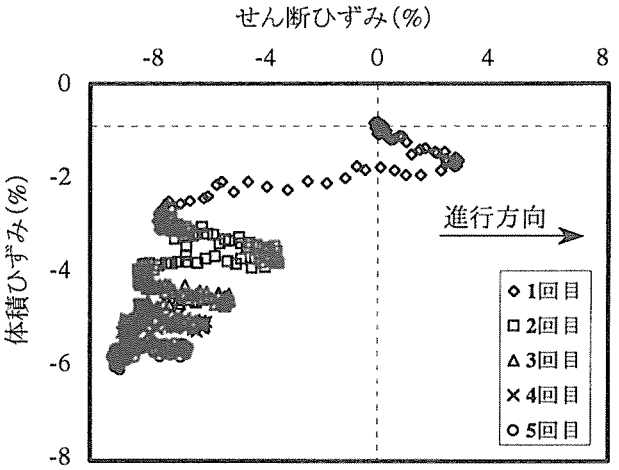


(b) すべり率 21.9%

図 9　せん断ひずみの深度別分布の比較



(a) すべり率 3.9%



(b) すべり率 21.9%

図10　体積ひずみとせん断ひずみの関係

その大きさに影響されると考えられることから，図10では地盤内の任意点における体積ひずみとせん断ひずみの関係を調べた．本図に示されるように，地盤は車輪の接近，通過に伴うせん断変形の繰返しによって，徐々に圧縮されていく様子が把握される．また，すべり率が大きくなるほどせん断変形の振幅量が増大するため，地盤の圧縮量もそれに応じて増大することがわかる．以上のことから，地盤のせん断変形は圧縮特性を支配する一因であると示唆される．

要　　約

車輪の繰返し走行時の地盤転圧挙動を解明するために，走行車輪下の土の変位を高精度に計測し，地盤の変形挙動を詳細に解析した．その結果，以下の知見を得た．

1）車輪の接近，通過に伴い土粒子は楕円状の変位軌跡を示した．また，変位軌跡の残留性状は，すべり率が大きくなるほど車輪後方へ変移することがわかった．

2）変位軌跡の大きさはすべり率によらず走行回数と

ともに指数関数的に減少する傾向が見られるが，その変化率はすべり率が大なほど顕著となることを示した．

3）地盤の圧縮量は，すべり率に関係なく表層付近が最も大きく，深度約70mmまで線形的に減少した．

4）地盤は繰返し走行回数に対して指数関数的な圧縮特性を示した．

5）すべり率が大きい場合には，せん断ひずみの振幅量が大きくなるため，地盤が著しく圧縮される．地盤の圧縮には，地盤のせん断変形によって引起されるダイレイタンシーが深く関係している事実を明らかにした．

文　　献

上野正実・深見公一郎・橋口公一・岡安崇史・鹿内健志　2000　車輪の繰返し走行による土壌変形プロセス．テラメカニックス，**20**：107-112

Ohmiya, K. 1999 Impacts of soil compaction. Proc. 3rd Int. Seminar Farm Mechanization for Developing Countries: 135-146

近江谷和彦・佐野　泰　1994　圃場おける土壌硬化度の三次元分布．テラメカニックス，**14**：79-83

河原総一郎・星加泰央　1993　転圧ローラによる砂質土の締固めと走行性との関連性．テラメカニックス，**13**：39-45

Nohse, Y., Shikanai, T., Hashiguchi, K., Ueno, M., Izumi, H. and Koyama, F. 1992 A measurement of basic mechanical quantities of Off-The-Road traveling performance. *J. Terramech.* **28**(4)：359-370

橋口公一・岡安崇史・上野正実・鹿内健志　1998　画像処理による土の変位のオンライン計測に関する研究．農業機械学会誌，**60**(6)：11-18

Fukami K., Ueno M., Hashiguchi K. and Okayasu T. 2000 Analysis of soil deformation beneath a wheel in the repetition travel. *Proc. CIGR2000*, (in printing)

横田聖哉・川井洋二・益村公人・加藤陽一　1998　道路盛土における軟岩（砂岩）を用いた現場転圧試験．地盤工学研究発表講演集，**33**：2065-2066

Summary

Compaction behavior of ground subjected to repeated loading by a traveling wheel was analyzed for shallow sand layer. Displacement of soil particles was measured as the movement of markers, arranged between the sand layer and the transparent sidewall of soil bin. Soil particles represented elliptical trajectory in the processes with approach and passage of the wheel. The displacement of the soil particles reduced exponentially with the number of repetition of the wheel traveling. The volumetric strain, which was calculated from the displacements, was gradually increased with respect to the repetition number. The magnitude of the volumetric strain at high slippage was grater than that at low one. Likewise, the changes of the shear strain also showed the same tendency as that of the volumetric one. Therefore, it was clarified that the soil compaction due to the wheel traveling is closely related to the shear deformation of ground, i.e. the dilatancy effect.