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

車輪走行による半無限地盤の変形

上野,正実 琉球大学農学部生物生産学科・生産システム工学講座

橋口, 公一 九州大学農学部生物生産数理学講座

鹿内, 健志 琉球大学農学部生物生産学科・生産システム工学講座

能勢, 行則 酒井重工業株式会社·技術研究所

他

https://doi.org/10.15017/23550

出版情報:九州大學農學部學藝雜誌. 49 (3/4), pp.207-214, 1995-03. 九州大學農學部 バージョン: 権利関係:

車輪走行による半無限地盤の変形

.E. 野 Æ 実* • 橋 公 **一** ●** 鹿 内 志* 健 能 埶 行 **則*****• 岡 安 崇 安* • 後 樹*** 藤 春 九州大学農学部生物生産数理学講座 (1994年12月19日受理)

Soil Deformation in a Semi-infinite Ground by a Traveling Wheel

Masami UENO, Kouichi HASHIGUCHI, Takeshi SHIKANAI, Yukinori NOHSE, Takashi OKAYASU and Haruki GOTOU Laboratory of Mechanics for Bio-production, Faculty of Agriculture, Kyushu University, Fukuoka 812-81

緒 言

車輪の走行性と土(地盤)の変形との関係を明確に する研究の一環として,著者らは精密土槽実験装置 (Hashiguchi et al., 1993, Nohse et al., 1991)と組 み合わせた車輪下の土の変形解析システムを開発し報 告した(上野ほか, 1993).さらに,浅い密詰めの砂地 盤において,すべり率41%でゴム皮膜車輪の走行実験 を行い,このシステムを用いて変形解析を実施した(上 野ほか,1994-2).そこでは車輪回転に伴う地盤の変形 とその経時変化を詳細に解析し,それらの特徴を把握 した.さらに,初期沈下状態と回転状態におけるひず みの分布パターンを模式的に表した.

しかしながら、これは車輪半径と土層厚の比が2/5 (60mm/150mm)と相対的に浅い地盤における変形 挙動を対象としたものであった。土層の底面は硬い耕 盤状であったので、土の変形にもこの影響が表れるこ とが考えられる。これは農業機械などの走行性を議論 する場合には意味を持つが、一般には半無限地盤にお ける基本的変形挙動の解明がまず重要である。そこで、 本研究では土槽底面の影響を無視し得る深い土層 (580mm/150mm)を半無限地盤と見なして、車輪の 走行実験を行った。すべり率16%と90%を対象に変形

- * 琉球大学農学部生物生産学科・生産システム工 学講座
- ** 生物生産数理学講座
- *** 酒井重工業株式会社·技術研究所

解析を実施し、ひずみ分布および分布パターンを明ら かにした。すべり率によるこれらの違い、および、車 輪回転に伴う変化を検討し、けん引力や沈下量との関 係を示した。さらに、半無限地盤と浅い地盤における ひずみの分布パターンは、車輪直下近傍に限れば定性 的にほぼ同じであることを示した。

法

方 1. 車輪走行実験装置

車輪走行実験装置は,前報(上野ほか,1993,1994-1) で述べたものと基本的には同一構造であり,土槽,車 輪装置,移動台車とその駆動装置,データ集録・処理 装置,付帯装置より構成されている.表1にその主要 諸元を示す.前報ではゴム車輪を用いたが,本研究で は鋼鉄製(SS400)で外径300mm,幅412mmの車輪 を使用した.車輪表面材鋼鉄と豊浦標準砂の摩擦特性 は,静止摩擦係数0.385、動摩擦係数0.381であった. ゴム車輪では静止摩擦係数0.759,動摩擦係数0.557で 鉄車輪より大きい値であった.各センサで検出された 力学量(けん引力,接地荷重,トルク,沈下量,接地 面法線応力,接地面接線応力,回転角度等)は,多チャ ンネルデータロガで増幅・A/D変換され,GPIBを通 して,パーソナルコンピュータに転送・集録される.

2. 実験方法

供試土には気乾状態の豊浦標準砂を用い,ホッパよ り空中落下・メッシュ法によって土槽に充填した.充 塡中,供試土の落下高さを 800mm に維持し,さらに5 段のメッシュによって拡散させ、初期間隙比(平均 0.67)が一定になるように調整した。土層厚さは 580mmとし、半無限地盤の条件を満たすようにした。

車輪の接地荷重は 216N,回転周速度は 5mm/min とし、すべり率は台車の移動速度を選択して一定の値 を与えた.この走行実験は、車輪両端面と土槽側壁と の隙間がほとんどない平面ひずみ(2 次元)状態で行っ た.

実験では、土槽の所定の位置に車輪を非回転状態で 静かに沈下させ、その後に、車輪と台車を同時に駆動 させた。初期沈下状態に入る前に路面間際まで車輪を 下ろし、沈下計などの計測機器の初期設定を行った後 に回転させた。本研究における実験条件を表2に示す。

3. 変形解析

車輪下の土の変形を検出するために、ポリエステル 製の可動マーカを土槽内壁に一定間隔に貼りつけた後 に土を充填した.車輪の走行中にこれらのマーカを、 土槽側面のアクリル板を通して写真撮影した.無変形 の基準状態,初期沈下状態,および,車輪回転角5°間 隔に一連の写真撮影を行った.

写真よりマーカの座標値を平面位置検出装置で読み 取り、これと基準状態の座標値との差から変位を求め た.これらの変位データに有限要素法の手法を用いて ひずみを算出した.これを全ての要素について実行し、

土槽	長さ(内寸) 幅(内寸)	1840mm 414mm
	深さ	620mm
車輪	幅	412mm
	半径	150mm
	接地荷重	150-980N
	材質(表面)	SS400
	駆動装置	ステッピングモータ
		歯車列
	周速度	0-80mm/min
台車	駆動装置	ステッピングモータ
		ボールネジ
	走行速度	0-80mm/min

表1 車輪走行実験装置の主要諸元

表2 実験条件

曹浦標進砂
0.67 (平均)
580mm
216N
5mm/min
16%, 90%

地盤のひずみの分布状態を求めた.変形状態は、変位 ベクトル図の他に、水平方向および鉛直方向の垂直ひ ずみ、せん断ひずみおよび体積ひずみの等値線図で表 した.

結果と考察

1. 車輪回転に伴うけん引力の変化

図1にすべり率16%および90%におけるけん引力と 回転角の関係を示す。けん引力は車輪の回転に伴って 急激に増大し最大値を示し、その後、次第に低下して ある変動幅内に落ちつく。けん引力の最大値を最大け ん引力,落ちついた状態を定常状態と呼び,そこでの けん引力の平均値を平均けん引力とする。同図より, すべり率が大きいほど最大値は高く,その発生角度は 小さいことがわかる。

最大けん引力はすべり率15%付近までは急激に増加 し、それ以上では緩やかに増加する傾向が見られた。 平均けん引力はすべり率15%までは最大けん引力とほ ぼ一致し、15%付近で極大値を示した後、60%ぐらい まで緩やかに減少し、その後再び増加する結果を得た (鹿内,1994).これらの傾向は前報(上野ほか,1994-1) に述べたゴム車輪の場合でもほぼ同様であった。

2. 変位ベクトルの分布

(1) すべり率16%

図2にすべり率16%,回転角20°における変位ベク トルの分布図を示す。同図における破線の円弧は初期 沈下時の車輪を表し、実線のそれは回転角20°のもの に対応する。車軸直下では変位ベクトルは斜め後方を 向き、車輪近傍の浅い位置ほど変位量が大きい。これ より後方では、変位ベクトルは次第に回転し、水平か ら斜め上向きへと向きが変化している。変位ベクトル は、鉛直車軸中心線やや前方より後方にかけた半円に 沿う分布状態を示している。この半円領域の前方には、 値の小さな斜め上向きの変位ベクトルがみられ、小さ



な半円に沿って向きが変化することがわかる.

このような分布パターンは、回転角 5°ではわずかに 認められ、回転角 10°~15°になると明瞭になっている. この付近から変位量は急増する傾向が見られる.車輪 が進行すると、後方の変位はほぼそのまま残留して分 布パターンは変化するが、車輪近傍に限ればほとんど 同じである.車輪後方の変位ベクトルは水平よりわず かに上向きのものが多くなり、回転開始直後ほどには 上向きの成分は大きくない.

(2) すべり率90%

図3に示すすべり率90%,回転角20°の結果をみる と、車輪近傍の変位ベクトルはすべり率16%のそれに 比べてかなり大きく、鉛直車軸中心線やや前方を境界 とする2個の円弧状領域はより明瞭で広い範囲に及ん でいる。すべり率90%では回転角5°ですでに同じよう な状態に達している。その後は車輪近傍の変位ベクト ルは増加するが分布パターンの変化はそれほど大きく ない。これはすべりが大きいために回転に対して車輪 の移動量が小さいためである。すべり率16%の場合に 比べると、車輪前方の斜め上向きのベクトルも大きい ことがわかる。

3. ひずみの分布

(1) 水平方向の垂直ひずみ

図4にすべり率16%,回転角5°および25°における 水平方向の垂直ひずみの分布を等値線図で示す。車輪



図2 すべり率 16%における変位ベクトルの分布



図3 すべり率 90%における変位ベクトルの分布

直下は正の領域となり、その両側に負の領域が分布す ることがわかる.これは車輪の重さによって車輪直下 では鉛直方向に圧縮されて水平方向に伸張することに よるものと思われる.このためその両側では水平方向 に圧縮を受けて鉛直方向に伸張する.負の領域は車輪 前方より後方が広く値も大きい.このような傾向は回 転が進むとより明瞭になる.車輪直下の正の領域はほ とんど同じ広さを維持して車輪に随伴する形で進行し ている.車輪後方の負の領域では局部的なくびれが生 じており、変形発生の状態が一様ではないことがわか る.回転角50°付近より車輪直下の正の領域が切れて 車輪後方に残留する現象が見られた.負の領域のくび れが発達するのと、車輪がこの部分より離れて力が及 ばなくなるために、正の領域がそのままの状態で残留 したものと思われる.

すべり率90%におけるこのひずみの基本的な分布パ ターンは、すべり率16%のそれとほぼ同様であった。 負の領域のくびれは回転角5°ですでに発生している ことがわかった。

(2) 鉛直方向の垂直ひずみ

図5にすべり率90%,回転角5°および25°における 鉛直方向の垂直ひずみの等値線図を示す。上述の水平 方向の垂直ひずみとは逆に,車輪直下に負の領域があ



(a) 回転角5度



(D) 凹転用20度

図4 すべり率16%における水平方向の垂直ひずみ の分布

り,その両側に正の領域が存在している.すなわち, 車輪前方側と後方側では鉛直方向に伸張することがわ かる.車輪後方の正の領域は回転に伴って次第に拡大 した.

すべり率16%においても同様の分布パターンが見ら れるが、車輪直下の負の領域はすべり率90%ほどには 明瞭でなく、また、圧縮ひずみの値も小さい.この場 合には車輪直下近傍の負の領域は狭く、下向き、もし くは斜め下向きに広がるような形で分布している.車 輪後方ではひずみが残留するために、正の領域は車輪 の進行に伴って次第に拡大している.

(3)せん断ひずみ

図6に、すべり率16%ならびに90%における回転角 10°のせん断ひずみの分布を示す.いずれのすべり率で も、車軸鉛直中心線やや前方位置を境界として、その 後方側には正の領域、前方側には負の領域が分布して いる.せん断ひずみの符号は車輪の進行方向と見る位 置によって決まり、この状態で土槽の裏側から見ると 符号は逆になる.車輪後方側の正の領域はすべり率 16%より90%の方が広く、また、ひずみの値も大きい。 車輪が進行すると後方側の正のひずみは残留するため に、その領域は次第に拡大している.前方側の負の領 域はその形状とひずみの大きさを幾分変えながら車輪



(a) 回転角5度



(b) 回転角25度

図5 すべり率 90%における水平方向の垂直ひずみ の分布

とともに移動している. この負の領域の前方には値は 小さいが正の領域があり、その境界すなわちせん断ひ ずみゼロの位置において盛り上がりが発生している. これは車輪が前方に地盤を圧縮するために発生するも のと解釈できる. なお、車輪後方側にも同様の盛り上 がりが発生している. これらの盛り上がりは地表面の 「シワ」に相当している.

(4) 体積ひずみ

図7に回転角10°、すべり率16%ならびに90%にお ける体積ひずみの分布を示す。いずれのすべり率にお いても、車輪直下から後方にかけて正の体積ひずみが 発生している。すなわちこの領域は膨張していること を示している。この領域は車輪重量によって負の体積 ひずみになりそうであるが、実際には逆の結果となっ た。これは水平および鉛直方向の垂直ひずみの和が正 の値になることを意味している。土層が密詰めの状態 であるために、この領域におけるせん断ひずみにより 体積膨張(ダイレイタンシー)が発生することも一因 と思われる。この膨張領域の前方およびその下層部に は、わずかながら圧縮領域が見られる。すべり率16% と90%を比較すると後者の方が体積ひずみの値は大き い、車輪後方の正の体積ひずみは残留するので、車輪 の進行に伴ってこの領域も拡大している。この場合に もくびれ部が発生しており、体積ひずみは水平方向の



(a) すべり率 16%



(b)すべり率 90%

図6 せん断ひずみの分布(回転角10度)

垂直ひずみに大きな影響を受けることを示している。 (5)ひずみの分布パターン

以上よりわかるように、半無限地盤を想定した土層 におけるすべり率16%および90%のひずみ分布には共 通のパターンが存在するようである.これを模式的に 表示したのが図8である.前述のすべり率とけん引力 の関係をみると、すべり率16%以上ではけん引力の値 に大きな差は見られない.このため、このすべり率の 範囲内では他の条件が変わらない限り、ここに示す基 本的な分布パターンは同じであると考えられる.ただ し、細部に相違点があるのは当然であり、またひずみ の大きさには著しい差がある.すべり率10%以内では けん引力は大きく変化しているので、ここで述べた分 布パターンと同じか否かは検討を要する.

(6) 浅い地盤におけるひずみ分布との比較

前報(上野ほか,1994-2)において,土層厚60mm, すべり率41%の条件で行った変形解析の結果について 述べた.すべり率,および,車輪表面のまさつ特性(鉄 車輪とゴム皮膜車輪)などが異なるので直接的ではな いが,本研究の解析結果とひずみの分布パターンを定 性的に比較してみた.

水平方向の垂直ひずみは,車輪直下に正の領域が見 られ,その両側に負の領域が表れるパターンはいずれ の条件下でも同じであった.鉛直方向の垂直ひずみは



(a) すべり率16%



(b) すべり率 90%

図7 体積ひずみの分布(回転角10度)

土層の厚さに関係なく、車輪直下両側に正の領域が広 がり、その間に負の領域が発生するパターンが見られ る.せん断ひずみについても車軸鉛直中心線やや前方 より後方にかけて正の領域、その前方には負の領域が 分布している(図9参照).土層厚の影響は土槽底面付 近に表れるようであるが、車輪直下近傍のせん断ひず みの分布パターンは基本的には同じであった。体積ひ ずみの分布についても同様の結果を得た.

これらをまとめると、車輪直下近傍のひずみの分布 パターンは土層厚によらずほぼ同じであると言える。 ただし、ここで比較したものより土層厚と車輪半径の 比がさらに小さくなれば、分布パターンは異なること も予想される。さらに、ひずみの大きさについては今 後類同の条件下で実験を行って比較する必要がある。

(7)回転に伴うひずみの変化

車輪回転に伴うひずみの分布パターンの変化につい ては前述の通りである.回転開始直後は大きく変化す



るが、回転が進むと車輪後方部の残留部は拡大するも のの、車輪近傍ではほぼ同じ分布パターンになった。 当然ながら、ひずみの大きさや分布領域の広さは異な り、それがけん引力や沈下量に反映するものと考える。 そこで、回転に伴うひずみの最大値(正のひずみ)と 最小値(負のひずみ)の変化を調べ、土の変形と走行 性との関係を解析する糸口とした。

図10にすべり率90%における車輪回転角とひずみの 最大・最小値の関係を示す.最大・最小値とも回転角 0~5°において急増することがわかる.回転角5~10° ではひずみの値は変化せず,その後,回転角20°付近ま では再び増加し,変化は次第に小さくなる傾向が見ら れる.ひずみ値が急増している0~5°の間は,けん引力 は急激に増加してピークを示してから減少するまでの 過程に対応している(図1参照).ひずみ値の変化が小 さい5°~10°の範囲では,けん引力は極小値を示してほ とんど変化していない.ひずみが再び増加する10° ~20°の範囲ではけん引力はわずかに増え,その後は減 少している.このように,けん引力とひずみの変化の







間には密接な関係がありそうである。詳細な検討は今 後の課題である。車輪の沈下量とひずみの最大・最小 値の間にはほぼ直線的な関係が見られた(図11参照)。

すべり率16%ではひずみの種類によって傾向がやや 異なるが、最大ひずみについて見ると、回転角 20 付近 までは急激に増大し、その後は一定もしくはわずかに 減少している(図12参照)。最小ひずみについては水平 方向の垂直ひずみとせん断ひずみには同様な傾向が見 られた。鉛直方向の垂直ひずみおよび体積ひずみの最 小値は全般に値が小さく変化の傾向は明瞭でなかった。 供試地盤の間隙比が小さく接地荷重も相対的に小さい ので、圧縮されにくいことに対応しているものと考え







る.図13に示すように、車輪の沈下量が増えると最大 ひずみはほぼ直線的に増加する傾向が見られる。最小 ひずみでは、水平方向の垂直ひずみに同様の傾向が見 られ、また、せん断ひずみもこれにやや近い傾向があっ た。鉛直方向の垂直ひずみの最小値と沈下量の間には このような関係は認められなかった。けん引力と水平 方向の垂直ひずみの最大値の間には負の相関が見られ、 車輪直下近傍の土が水平方向に伸張する割合が大きい ほどけん引力は減少することが明らかになった。

要

摘

本研究では半無限地盤を想定した深い土層において 車輪の走行実験を行い,すべり率16%と90%について 土の変形挙動を解析し,次の結果を得た.

(a)変位ベクトルは,鉛直車軸中心線やや前方を境 界とする2個の円弧状領域を形成するように分布し, 車輪直下より後方では斜め下向きから水平,斜め上向 きへと向きを変え,前方の円弧領域ではこれと逆向き の分布形態となることを示した.

(b) 車輪が進行すると,後方の変位はほぼそのまま 残留するので変位ベクトルの全体的な分布パターンは 変化するが,車輪近傍ではほぼ同じであった.

(c)水平方向の垂直ひずみは,車輪直下では正の領 域,その両側に負の領域が広がるパターンとなった. これは車輪の重さによって車輪直下では鉛直方向に, その両側では水平方向に圧縮されることによる.車輪 の進行に伴い直下の正の領域はほぼ同じ広さを維持し て車輪に随伴・移動した.車輪後方の負の領域には局 部的にくびれが生じ,車輪の進行に伴う変形の発生が 一様でないことを示した.

(d) 鉛直方向の垂直ひずみは、車輪直下に負の領域 が、その両側に正の領域が発生することを示した。

(e) せん断ひずみは、車軸鉛直中心線やや前方を境 界として、その後方に正の領域、前方に負の領域が存 在し、前方の負の領域はその形状とひずみの値を幾分 変えながら車輪とともに移動することを示した.これ らの領域の外側にはそれぞれ逆向きの符号の領域があ り、その境界に盛り上がりが発生していることを明ら かにした.

(f)車輪直下から後方にかけて正の体積ひずみが発 生し,この領域の前方およびその下層部にわずかなが ら負の領域が見られた。

(8)車輪直下近傍のひずみの分布パターンは、半無限地盤でも浅い地盤でも土層厚によらずほぼ同じであることを示した。ただし、土層厚と車輪半径の比が本研究の設定値0.4より小さい場合については今後の検討を要する。

(h) すべり率16%と90%におけるひずみの分布パ ターンおよびひずみの大きさの比較を行い,その特徴 を示した.

(i)車輪の回転に伴うひずみの最大・最小値の変化 を調べ,これらと車輪の沈下量の間にはほぼ直線的な 関係が見られることを明らかにした.

文

献

- Hashiguchi, K., Y. Nohse, M. Ueno, K. Sumiyoshi, K. Uchiyama, and T. Yoshimaru 1994 Traveling Performance of a Wheel on a Finite Thickness Ground. J. Terramech., 31(4), 257– 263
- Nohse, Y., K. Hashiguchi, M. Ueno, T. Shikanai, and F. Koyama 1991 A Measurement of Basic Mechanical Quentities. J. Terramech., 28 (4): 358-370
- 鹿内健志・上野正実・橋口公一・能勢行則 1994 走 行車輪に作用する土壌反力の変動に関する研究, 農業機械学会九州支部誌,43:13-18
- 上野正実・橋口公一・泉 裕巳・後藤春樹・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
- 上野正実・橋口公一・泉 裕巳・後藤春樹・能勢行則・ 鹿内健志 1994 ゴム皮膜車輪の走行性に関する 研究,九大農学芸誌,48(3・4):263-272
- 上野正実・橋口公一・鹿内健志・後藤春樹・能勢行則・ 岡安崇史 1994 走行車輪下の土の変形,九大農 学芸誌,49(1・2):109-118

Summary

We have reported the characteristics of soil deformation beneath a traveling rigid wheel in a shallow sand ground (60mm depth). A variation of deformation with a rotation have been analyzed in 41% slip condition. On the other hand, it would be also important to analyze a deformation of a semi-infinite ground. In this study, we carried out traveling tests of a rigid wheel by using the soil bin with 580mm depth, which could be regarded as a semi-infinite ground, and analyzed soil deformations with 16% and 90% slip conditions. There were two semi-circular zones where large displacement vectors concentrated, which joined at the slightly front of wheel surface to the vertical center line of wheel axle. Normal strains of horizontal direction in a zone directly contacted to the wheel had positive values and zones of both side to it had negative values. In contrast, normal strains of vertical direction in a rear zone and a front zone to the wheel were positive, and a negative zone laid between these zones. Positive shear strains distributed at a rear zone to the wheel, and negative ones at a front zone to the wheel. The boundary line separating both zones located in the slightly front of wheel surface to the vertical center line of the wheel axle. Typical distribution patterns of strains were almost similar in deep and shallow grounds at the neighbor of the wheel.