

## 学 位 論 文 要 旨

氏 名

クワントリー サンパチャタナラグ

題 目

土 - 車輪相互作用および土壌踏圧に関する研究  
(Studies on the soil - wheel interaction and soil compaction)

車輪の走行性および土壌踏圧現象を解明するために、接地面を含む土壌の変形のような土壌と車輪の相互作用を測定し解析を行った。

本研究で開発した簡易可視化システムを用いて、車輪接地面における土壌変位を数水準のすべり率条件下において計測した。接地面における車輪と土粒子との間の相対すべりに関する分析を行い、相対すべりの分布は車輪に作用する走行抵抗と線形関係を示すことを明らかにした。これにより、車輪のけん引力とトルクを測定することによって接地面における相対すべりの程度を予測することが可能となった。

車輪の接地面を含む任意の深さにおける土壌の変位を予測するために、新しい数学モデルの開発を行った。このモデルによって得られた予測値は、接地面の変位も含めて先行モデルより測定値とよく一致した。このモデルから算出した土壌ひずみ分布も同様であった。

車輪を同一方向へ4回走行させた時の土壌変位をそれぞれのすべり率において計測し、その軌跡を図示した。その結果、軌跡の大きさや形状の変化、および体積ひずみはすべり率と関係することが明らかとなった。高すべり率の繰り返し走行では相対的に深い層においてより大きな変形と土壌踏圧を引き起こした。

繰り返し走行の回数がけん引力、駆動トルク、車輪沈下のような走行性能の変化に与える影響について検討した。走行回数に伴って、けん引力は低すべり率では増加するが、高すべり率では反対の傾向を示した。一方、低すべり率のトルクはけん引力と同様の傾向を示した。けん引力とトルクの測定値から算出した走行抵抗は、繰り返し走行回数に伴って線形に増加し、その増分はすべり率の関数になることを明らかにした。

繰り返し走行条件下において車輪下の土壌応力を測定した。垂直応力はいずれのすべり率や走行回数でも深くなるに伴って減少することを示した。また、すべり率の違いによる最大応力への影響は、表層付近において顕著であることが明らかとなった。高すべり率の走行は深層までかき乱すことが明らかになった。

表面被覆が車輪走行時の土壌変形に与える影響を分析するために、土壌表面に軟質ゴムシートを設置して実験を行った。厚いシートを用いた場合にはシートがない場合よりも土壌の変位軌跡は小さくなることを明らかにした。これは、これらの結果を土壌踏圧のコントロールに利用できる可能性を示唆している。

## 学 位 論 文 要 旨

氏 名	Khwantri Saengprachatanarug
題 目	Studies on the soil - wheel interaction and soil compaction (土 - 車輪相互作用および土壌踏圧に関する研究)

To clarify the traveling performance of a wheel and the phenomena of soil compaction, the soil-wheel interaction such as the soil deformation including the ground contact surface was measured and analyzed under the various traveling conditions.

The soil displacements at the ground contact surface of the wheel were measured by the simple visualizing system developed in this research in the several levels of traveling slip. The relative slip between soil particle and wheel surface along the contact surface was examined, and found that the relative slip distribution is linearly related with the rolling resistance acting on the wheel. This finding enables us to predict the relative slip at the contact surface by measuring drawbar pull and torque acting to the wheel. The new mathematical model was developed to predict soil displacement at arbitrary depth including the ground contact surface of the wheel. The predicted value including the ground contact surface fitted well to the measured value more than those by the former model. Soil strain distribution predicted by the new model also fitted well to the measured value.

Soil displacement during the four times of travel repetition in the same direction in several slip ratios was measured and the trajectory was traced. The change in size and shape of trajectories, and volumetric strain were related with traveling slip. The repetitions at a high traveling slip caused more deformation and compaction in deeper layer of soil. Change in the traveling performances, such as draw bar pull, driving torque and sinkage of the wheel, were discussed relating to the number of repetition travel. Drawbar pull increased with the number of repetition in low slip, but it showed the opposite trend in high slip. The torque had the similar tendency with drawbar pull's in low traveling slip. The rolling resistances calculated by measured drawbar pull and torque linearly increased with the repetition number, and the increasing rate of those was a function of the traveling slip. The soil stress beneath a wheel was measured during the repetition travel. The normal stress decreased with depth for all traveling slip and all repetitions. The large change of maximum stress showed at the shallow layer of soil. It is shown that the higher slip travel largely disturbed soil at deeper level.

A flexible rubber sheet was placed on the soil surface to investigate the effect of the coverage of soil surface to the soil deformation by the traveling wheel. Sizes of soil deformation trajectories under thick coverage became smaller than the case of no coverage. The results showed that it would be applicable to the control of the soil compaction.

学位論文審査結果の要旨	
学位申請者 氏 名	Khwantri Saengprachatanarug
審査委員	主査 琉球大学 教授 上野正実
	副査 琉球大学 准教授 鹿内健志
	副査 鹿児島大学 教授 岩崎浩一
	副査 鹿児島大学 教授 石黒悦爾
	副査 琉球大学 教授 川満芳信
審査協力者	九州大学大学院 准教授 岡安崇史
題 目	<b>Studies on the soil-wheel interaction and soil compaction</b> (土-車輪相互作用および土壌踏圧に関する研究)
<p>本研究は、世界的に需要が増大しつつある農業機械の高性能化および土壌踏圧の軽減に不可欠な車輪の走行現象を解明するために、精密土槽実験において接地面を含む土壌変位を計測し、踏圧現象や車輪との相互作用を解析して次の知見を得たものである。</p> <p>1) 車輪下の土壌変位の計測、解析および数学モデル化</p> <p>まず、簡易な変位可視化システムを開発し、従来の方法では測定できなかった車輪接地面における土粒子の変位を測定可能にした。本システムを用いて、接地面からその下層における土壌変位を数水準のすべり率のもとで計測し、変位軌跡の形状やサイズ、深さ方向の変化などを解明した。接地面における車輪と土粒子との間のずれ、すなわち、相対すべりに関する分析を行い、けん引力の発生に最も寄与する相対すべりは接地面上に放物線を描いて分布することを示した。この分布より接地面上のまさつ力を推定する可能性がでてきた。併せて、車輪に作用する走行抵抗と相対すべりの線形関係を見出し、けん引力とトルクを測定すれば相対すべりの大きさを予測できることを示した。</p> <p>実測値の解析結果に基づいて、接地面から任意深さまでの土壌変位を統一的に記述可能な数学モデルを開発した。このモデルは、水平成分および鉛直成分に分解した変位増</p>	

分をバースにガウス関数を用いて記述し、車輪の運動に強く拘束される接地面の変位増分式と相対的に自由な下層の変位増分式を誤差関数などで滑らかに接続したものである。このモデルで算出した変位軌跡の予測値は、接地面下層で発生するせん断帯の変位も含めて測定値とよく一致することを示した。予測した変位より求めた土中のひずみ分布は、実測土壌変位から求めたひずみ分布ともよく一致しており、土壌の変形解析および土壌踏圧研究に新たに強力な方法を提供できることを示唆している。

## 2) 繰返し走行における土壌変位と走行性の変化

圃場の同一地点を複数回走行する農業機械の実態に合わせて、数水準のすべり率において、車輪を同一方向へ4回走行させて土壌変位を計測し、土粒子はラセン状の軌跡を描いて変位することを明らかにした。土層の深さ方向に沿って、この軌跡のサイズは指数関数的に縮小するが、類似の形状を維持することを示した。走行性に大きな影響を与えるすべり率と変位軌跡の変化との関係を解析し、高すべり率の繰返し走行では、比較的深い層において大きな変形と土壌踏圧を引き起こすことを明らかにした。

繰返し走行がけん引力、駆動トルク、沈下量、土中応力などに与える影響を解析し、走行回数に伴ってけん引力は、低すべり率では増加、高すべり率では低下することを示した。走行抵抗は、繰返し走行回数に伴って直線的に増加し、その増分はすべり率の関数として記述できることを示した。繰返し走行下の土中応力は、表層付近ではすべり率の影響を強く受け、また、高すべり率の走行では変位やひずみ分布から深層まで影響が及ぶことを明らかにした。

## 3) 表面被覆物が走行性および土壌踏圧に与える影響

植物の残渣などで表面が被覆されている実際の圃場面を想定し、土壌表面に厚さ1mmおよび3mmの軟質ゴムシートを敷設し、表面被覆が土壌変位および走行性に与える影響を分析した。3mm厚シートで被覆した場合には被覆なしに比べて変位軌跡のサイズと水平成分が小さくなるなど、被覆の影響は顕著であることを明らかにした。被覆によって水平方向の変位が大きく抑制されるので、これらの結果は、土壌踏圧の抑制だけでなく、建設現場などにおいて土の効率的な締め固めに利用できる可能性を示唆した。

本研究で得た土壌変位測定システム、土壌変位モデルは、車輪の走行性や土壌踏圧現象の解明と予測に必要な土中の応力—ひずみ関係の解析を大きく前進させるポテンシャルをもっており、次の展開が期待される。さらに、農業機械の実際の走行状態に近づけるために実施した繰返し走行および表面被覆の影響に関する解析結果は、この分野の今後の発展と実用的な問題の解決に貢献するものと評価できる。

最終試験結果の要旨	
学位申請者 氏 名	Khwantri Saengprachatanarug
審査委員	主査 琉球 大学 教授 上野 正 実
	副査 琉球 大学 准教授 鹿内 健 志
	副査 鹿児島大学 教授 岩崎 浩 一
	副査 鹿児島大学 教授 石黒 悦 爾
	副査 琉球 大学 教授 川満 芳 信
審査協力者	九州大学大学院 准教授 岡 安 嵩 史
実施年月日	平成23年 1月22日
試験方法 (該当のものを○で囲むこと。) <span style="float: right;">(口答)・筆答</span>	
<p>主査及び副査は、平成23年1月22日の公開審査会において学位申請者に対して、学位申請論文の内容について説明を求め、関連事項について試問を行った。具体的には別紙のような質疑応答がなされ、いずれも満足できる回答を得ることができた。</p> <p>以上の結果から、審査委員会は申請者が博士（農学）の学位を受けるに必要な十分の学力ならびに識見を有すると認めた。</p>	

学位申請者  
氏 名

Khwantri Saengprachatanarug

[質問1] 車輪の走行実験において、スリップ（すべり率）を5, 10, 15%・・・と変えて実験を行っているが、スリップの定義は何か？なぜそれを変えて実験を行ったのか？

[回答1] スリップ（すべり率）は、無負荷時の車体の走行距離に対してけん引など負荷作業時の走行距離の減少分をパーセント表示した指標である。これは車体の走行速度と駆動車輪の周速度の差としても記述できる。スリップ100%は車体がまったく進まない状態を意味する。車輪のけん引力は、車輪と土壌面とのまさつによる相対的なすべりによって発生する。この相対すべりが車体のスリップの原因であり、スリップの大きさによってけん引力にちがいがでてくる。代表的な農業機械であるトラクタはけん引力が主要な性能指数であり、スリップとけん引力やけん引動力との関係の解明が重要な課題である。けん引力に関与する要因は他にもあるが、スリップは最も大きな要因の一つである。このため、車輪の走行実験ではスリップを変化させて実験を行うのが一般的である。このようなことよりスリップを変えて実験を行った。

[質問2] スリップのコントロールはどのようにして行うのか？

[回答2] 今回使用した精密土槽実験装置では、車輪を駆動するモーターと車輪を装着した移動台車を駆動するモーターから構成されている。これらのふたつのモーターに速度差がでるように、それぞれの速度を設定することによって、任意のスリップを作り出すことができる。スリップを大きくしすぎると土壌変位の測定が難しいことと、実用上の重要性が低いので、このようなスリップに設定した。

[質問3] 1回の走行実験によって得られた土壌変位の実測値を解析して土壌変位モデルを作成しているが、このモデルは繰返し走行においても適用できるのか？

[回答3] 実験結果でわかるように、一回目の走行と二回目以降の走行でも土壌の変位軌跡は極めて類似した形状を示し、スパイラルを描くことを明らかにした。したがって、本研究で提案した土壌変位モデルは基本的に繰返し走行にも適用できる。走行回数によって変位軌跡のサイズや形状がやや異なるので、走行回数ごとにパラメータを同定すれば適用できる。モデル中のパラメータに走行回数を入れればよいと思われるが、今回の研究ではそこまでは解析できていない。

[質問4] 土壌変位の測定結果をみると、接地面から少し下の部分に大きさ変位帯すなわちシェアバンドが形成されているが、提案モデルはこのシェアバンドを説明できるのか？

[回答4] 接地面の変位は車輪の運動に拘束されているが、その下部は周辺土壌による弱い拘束しかないのでこの部分で大きなシェアバンドが発生するものと考えている。すなわち、車輪に土壌がくっついて半径のより大きな仮想的な車輪が形成されていると想定すれば説明できる。スリップが大きいほどこのようなシェアバンドは大きくなる。

今回提案したモデルは、深さと車輪中心からの水平距離をパラメータとしており、任意深さの変位を予測できる。土中の変位モデルと接地面の変位モデルを指数関数と誤差関数で結合して滑らかにつながるようにしたもので、土中の変位モデルだけで予測すると接地面付近では過大な変位を示すが、接地面の変位でこれを抑える形となり、シェアバンドを表現できる。シェアバンドの大きさはスリップによって異なり、スリップが大きいほど顕著になる。

[質問5] 土の表面にカバーレッジ（被覆）を設けた実験，特に，1mm厚のゴムシートを敷いた場合には，深い層において大きな変位が発生しているようであるが，この現象はどう説明できるのか？

[回答5] 質問されたように，1mm厚のゴムシートの場合は，他の条件に比べて深い層の変位が大きくなっている。1mmのゴムシートは剛性が弱く曲がりやすく，また車輪とのまさつ係数も大きいため，車輪にまとわりつく形で変形・移動した。このため大きな変形が発生し，それに応じて土の変形も大きくなった。車輪後方で斜め上向きに大きく変形する特徴があり，これが深い層の変形につながったと考えている。先の質問のシェアバンドが深い所で発生したと考えることができる。3mm厚のゴムシートは曲がりにくいために車輪に追従した変形は小さく，水平方向の変形はほとんど発生しない。このため相対的に鉛直方向の変形が大きくなるので，建設用の締め固め機械に利用できるのではないかと考えている。

[質問6] 実験では車輪の重量というか車軸荷重を217Nに設定しているが，なぜこの値にしたのか？

[回答6] 本研究で使用した精密土槽実験装置では，車輪の重量はカウンターウエイトで調節できる。今回の実験では先行研究で設定された車輪重量を踏襲しただけで，それを変化させることは考えなかった。

[質問7] 実験に用いた車輪は表面が滑らかなローラーであるが，ここで得られた結果はラグなどがついてい実際的車輪にも当てはまるのか？

[回答7] 本研究では，実機を利用した圃場試験などでは得られない基本的な土壌変位を高精度に計測し，それをモデル化することによって，数値解析などの理論研究に展開することを目的としている。このため，基本的な形状のローラーを用いたが，当然ながら，表面の滑らかなローラーと車輪ではラグの部分などにおいて局部的に土の動きは異なる。このような変形については今回の研究では確かめることはできなかった。ただ，全体的な変形特性は類似しているものとする。

[質問8] 土壌の変位増分を水平方向と鉛直方向の成分に分解し，それぞれをガウス関数でモデル化しているが，実験結果をみると車輪前方と後方では対称になっていない。これをガウス関数で表して大丈夫か？

[回答8] ご指摘のように，前方と後方では対称にはなっていない。これを表すために水平成分には一次関数を，鉛直成分には二次関数をガウス関数に乗じている。これによって非対称な実験結果にうまくフィッティングさせることができる。ただし，接地面およびその付近では車輪が通過した後の盛り上り部の誤差が大きくなっており，この部分についてはスリップが大きい場合には改良が必要になるかも知れない。

[質問9] 前の車輪荷重217Nの質問と関連するが，車輪荷重というかトラクタの重量はソイルコンパクションや走行性に大きな影響を与えるのではないか？

[回答9] 機体重量はそれらに大きな影響を与える。これは多くの研究で知られている現象であるが，今回の研究では重量を変化させるところまではできなかった。今後の研究課題としたい。前の質問に十分に答えきっていなかったようであるが，この研究では，土層深さが比較的浅いことと，車輪荷重を大きくしすぎると走行に伴って次第に沈下量が増えていくので，定常的な走行が可能な荷重を経験から割り出して設定した。

[質問10] 標準砂の内部まさつ角が一般に言われているより大きいように思うが，測定はどうしたのか？また，土壌水分の影響がでると思われるがどうか？

[回答10] 内部まさつ角は一面せん断試験で求めた。土壌の水分は変えていない。湿度によって異なるかもしれないが，使用した乾燥砂は絶乾に近い状態である。