

## 砂地盤における剛性車輪の走行性高精度予測モデル

上野正実\*<sup>1</sup>・大嶺政朗\*<sup>1</sup>・鹿内健志\*<sup>1</sup>・橋口公一\*<sup>2</sup>・岡安崇史\*<sup>2</sup>

## 要 旨

車輪走行性の解析において重要な接地応力分布の予測には、平板の接地圧と沈下量の関係を記述したM.G.Bekkerの経験式に基づくいくつかのモデルが広く利用されている。これらは簡便で実用上有用ではあるが、すべり率や沈下量による法線応力分布の変化を表現できないなどいくつかの欠点があり、走行性を高い精度で予測するには改善を要する。本研究では剛性車輪を対象とし、法線応力には放物線分布モデルにすべり率の効果を考慮した修正放物線モデルを、さらに、接線応力にはJanosiモデルにピークを有する接線応力-すべり変位関係式などを導入した拡張モデルを提示した。これらに基づいて沈下量から接地応力分布、けん引力、トルクおよびこれらの経時変化を予測する一連のシステムを開発し、砂地盤におけるモデル剛性車輪の走行実験結果と予測結果とを比較し、適用性が高いことを示した。

[キーワード] 走行性, 高精度予測, 接地応力, 法線応力, 接線応力, 剛性車輪, 砂地盤

## A Precise Prediction Model of Traveling Performance for a Rigid Wheel on Sandy Ground

Masami UENO\*<sup>1</sup>, Masaaki OOMINE\*<sup>1</sup>, Takeshi SHIKANAI\*<sup>1</sup>,  
Koichi HASHIGUCHI\*<sup>2</sup>, Takashi OKAYASU\*<sup>2</sup>

## Abstract

Some models based on the M.G. Bekker's empirical equation describing the relationship between pressure and sinkage of a footing are widely used for the prediction of distribution of ground contact stress to analyze the traveling performances of a wheel. Although these models are simple and useful in a practical sense, improvements are necessary for precise prediction because of the some faults. For example, the deviation of normal stress distribution with slippage cannot be expressed. In this study, the parabolic distribution model for normal stress was modified by taking into consideration the effect of slippage. Furthermore, the Janosi's model for tangential stress was extended to represent a peak within the tangential stress - slip displacement relation. A prediction system for ground contact stresses, drawbar pull, torque and time series of these quantities of a wheel was developed by using these models. Predicted results were confirmed good applicability by the comparison with experimental results of traveling tests by a model rigid wheel on the sandy ground.

[Keywords] traveling performance, precise prediction, ground contact stress, normal stress, tangential stress, rigid wheel, sandy ground

\* 第57回農業機械学会年次大会(山形大学)にて講演

\*<sup>1</sup> 琉球大学農学部(〒903-0213 沖縄県西原町千原1番地) College of Agriculture, University of the Ryukyus, 1 Senbaru, Nishihara, Okinawa, 903-0213 JAPAN

\*<sup>2</sup> 九州大学農学部(〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1) Faculty of Agriculture, Kyushu University, 6-10-1 Hakozaki, Higashi-ku, Fukuoka, 812-8581 JAPAN

## I 緒 言

走行中の車輪の接地応力分布を精度よく予測できれば、けん引力、トルク、走行抵抗などを詳細に解析できるだけでなく、設計など実用面においても有用な情報を得ることができる。従来、平板の接地圧と沈下量との関係を記述したM.G. Bekkerの経験式<sup>1)</sup>(以下、Bekker式と呼ぶ)とそれに類似したモデルが力学的解析に広く利用され、車輪の走行性予測における理論的基礎を与えてきた。J.Y. Wong<sup>2)</sup>, O. Onaffeko<sup>3)</sup>, 吉田<sup>4)</sup>など多くの研究者が、接地面に作用する法線応力をこのような方法で求め、これに基づいて接地面におけるせん断抵抗—すべり変位特性より接線応力を計算し、推進力、けん引力などを解析している。

しかしながら、Bekker式に基づくモデルは、車輪直下で応力値が最大となること、平板の幅とその貫入方向が力学的に不明確であるなど問題も多い。実測応力分布との不一致を解消する一つの方法として、広間ら<sup>5)</sup>や笈田ら<sup>6)</sup>は土を粘弾性体と仮定して変形速度の効果を考慮している。さらに、入射位置(接地開始点)と離脱位置(接地終了点)を通る放物線分布モデルでは、沈下量が一定であれば法線応力の分布形状は固定され、すべり率による分布の偏りを表現できない欠点がある。

また、走行中に沈下量が変わる過渡状態では、接地応力の分布幅が変わりけん引力などは経時的に変化する<sup>7)</sup>。さらに、すべり率に応じて沈下挙動が異なり<sup>8)</sup>、接地応力分布は変化する。

本研究では、これらを考慮して法線応力を予測する放物線モデルにすべり率あるいは沈下量の効果を加えたモデルを提示した。接線応力についてはJanosiモデル<sup>9)</sup>における接線応力—すべり変位関係にピークを表現できる拡張モデルを提案した。これらを用いて、車輪回転角から沈下量を算出して接地応力分布、けん引力、トルクなどを予測する一連のシステムを開発した。砂地盤においてモデル剛性車輪を用いた走行実験を実施し、接地応力の分布特性および沈下特性を明らかにして予測に必要な基礎資料を得た。さらに、この実測結果と実験に準じた予測結果とを比較して予測モデルの評価を行った。

## II 車輪走行実験

### 1. 実験方法

まず、予測に必要な基礎資料と予測結果の検証データを得るために実施した車輪走行実験について述べる。走行実験には再現性の高い走行条件を設定可能な精密車輪土槽実験装置<sup>9)</sup>を用いた。これについては別報<sup>10)</sup>に述べてあるのでここでは概要のみを述べる。供試土には気乾状態の豊浦標準砂を用い、空中落下法によって土槽に均一に充填し、間隙比約0.62の均質な土層を作製した。モデル車輪は、直径300mm、幅410mmのゴム皮膜剛性車輪で走行台車に上下方向に移動できるようにリニアベアリングを介して装着されている。走行台車と車輪を2個のステッピングモータでそれぞれ独立に駆動することによって、任意のすべり率が設定可能である。計測項目は、車輪の回転角度、進行距離、沈下量、接地荷重、車軸トルク、けん引力、接地応力、土の変位などである。

実験条件を表1に示す。車輪は外周速度0.0833 mm/s、重量217Nに設定し、一連のすべり率を与えて走行実験を行った。外周速度を非常に小さくしたのは、動的な挙動による走行性への影響を除いて車輪と土との基本的な相互作用を調べるためである。実験では、まず車輪を非回転状態で静かに沈下させ、その後、台車と車輪のモータを同時に駆動させて設定すべり率で走行させた。車輪近傍の土粒子の変位の計測には別報<sup>11)</sup>で報告したシステムを使用した。

表1 実験条件  
Table 1 Test conditions

車輪種類	ゴム皮膜剛性車輪
車輪周速度	0.083mm/s(一定)
車輪重量	217N
すべり率	1.9~98.8%
供試土	気乾豊浦標準砂
間隙比	約0.62

### 2. 接地応力分布

接地応力分布のモデル化においては、分布形状の特徴とその分布領域などを明確にする必要がある。そこで、すべり率3.9%、42.3%および90.0%における接地応力の実測値を図1に示す。

角度は車軸に対してその直下を $0^\circ$ として反時計回りを正にとる。ここでは、進行方向を左向きとしたので、負の値は車軸直下から進行方向に測った角度である。車軸直下から入射位置までの角度を入射角、同じく離脱位置までを離脱角とする。

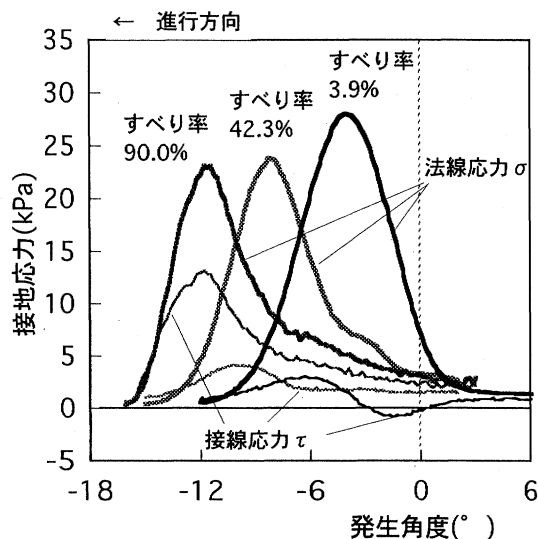


図1 接地応力の実測例

Fig. 1 Measured ground contact stresses

法線応力 $\sigma$ は、入射位置から増加して最大値を示した後に離脱位置に向けて減少する。この減少は最初は急であるが次第に緩やかになり、すべり率が高いほど長く尾を引く分布形状となる。最大応力発生位置は低すべり率では接地領域の中央付近にあり、すべり率あるいは沈下量の増加に伴って前方に移動して最大値は低くなる傾向が見られる。このような分布は他にも報告例があるので(例えば、笈田ら<sup>12)</sup>)、かなり普遍的な分布パターンと見なすことができる。これは、沈下によって形成される傾斜した接触面を車輪が乗り上げるような形で前進するために応力分布が前方へ偏るものと考えられる。この図から法線応力分布に放物線モデルを適用できるのはごく限定された範囲であり、改善が必要なことがわかる。

すべり率あるいは沈下量の増加に伴って最大接線応力発生角は前方に偏移し、さらに、その値は高くなる。最大接線応力は法線応力のそれよりもやや前方に位置する傾向が見られる<sup>7)</sup>。これは、入射位置付近の土粒子は車輪の回転方向とは逆に

接地面に沿って上昇するため、その相対的な運動が大きくなり、離脱位置付近では土粒子の移動方向と回転方向が一致するため相対運動は次第に小さくなるためと考えられる。本研究で対象とした砂地盤に関しては接線応力の分布パターンについても類似の結果が報告されている<sup>12)</sup>。

なお、すべり率3.9%では法線応力の最大値付近を境として正負が逆転する分布形状を示した。これは負のすべり率すなわちスキッド状態および低すべり率において見られる分布<sup>13)</sup>で、接地面における土粒子の相対的な運動が、車軸直下付近では入射位置付近とは逆に、車輪の回転方向の運動となるためと考えられる<sup>7)</sup>。すべり率の増加に伴って次第に回転とは逆方向の相対運動に変わる。

### 3. 沈下量と入射角、離脱角の関係

接地応力の予測においてはまずその分布範囲を把握する必要がある。入射角および離脱角で表される分布範囲は沈下量によって異なる。Bekkerの荷重-沈下式ではすべり沈下現象を扱えないので、ここでは実験結果より沈下特性を求めた。

実験結果より、沈下量の増加は車輪の回転開始時には急であるが、その後次第に緩やかになり最終的な沈下量に近づく傾向が見られる。最終沈下量はすべり率が高いほど大きく、すべり率とけん引力の関係に類似している。一方、低すべり率では車輪は一旦沈下した後やや浮上し、沈下量は小さくなる。本研究で行った走行実験では、沈下量 $h$  (mm)の経時変化は、車輪回転角 $\Psi$  ( $^\circ$ )およびすべり率 $s$  (%)に対して次式で与えられる。

$$h = (-0.11s - 0.15)(1 - e^{-0.08\Psi}) \quad (1)$$

類似のすべり沈下特性は伊藤<sup>14)</sup>の研究においても報告されている。車輪回転角が大きくなれば沈下量の変化は小さくなり、最終的な沈下量はすべり率によって決まる。

入射角 $\theta_1$ 、離脱角 $\theta_2$ および最大法線応力発生角 $\theta_{\max}$ と沈下量との関係を図2に示す。入射位置は沈下量の増加に伴ってやや前方に移動するが、離脱位置はほとんど変化せず車輪直下よりやや後方に位置する。また、入射角の実測値は沈下量から幾何学的に算出した値と高い相関(相関係数 $r=0.897$ )を示し、入射角は車輪半径 $r$ および沈下量 $h$ から幾何学的に決定できることを確認し

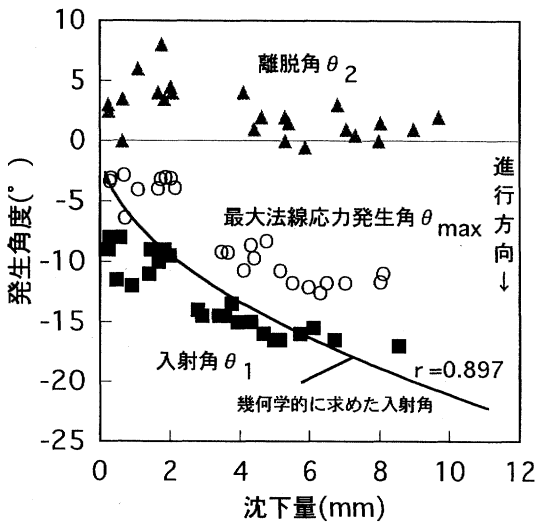


図2 沈下量と特性角との関係

Fig. 2 Relationships between sinkage and its characteristic angles

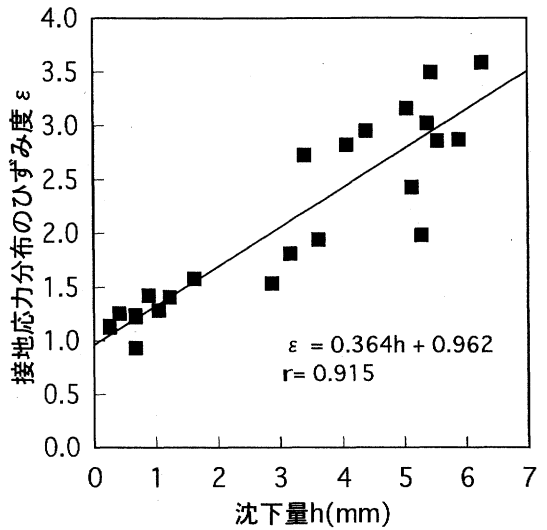


図3 ひずみ度と沈下量の関係

Fig. 3 Relationship between sinkage and deviation of stress distribution

た。

$$\theta_1 = \tan^{-1} \left\{ \sqrt{r^2 - (r-h)^2} / (r-h) \right\} \quad (2)$$

沈下量が増加すると、最大接地応力の発生位置は入射位置と同様に前方に移動する。これに伴って接地応力分布の対称性は崩れる。応力分布のゆがみの程度を最大接地応力発生位置から入射位置および離脱位置までの角度の比  $(\theta_2 - \theta_{max}) / (\theta_{max} - \theta_1)$  として定義する。これをひずみ度と呼び、実験で得た沈下量との関係を図3に示す。同図より、沈下量  $h$  が増えると応力分布のひずみ度  $\epsilon$  は1 (対称) 付近から高い相関で直線的に増加することがわかる。

$$\epsilon = 0.364 h + 0.962 \quad (r=0.915) \quad (3)$$

すなわち、法線応力分布は沈下量の増加に伴って前方へ偏移するだけでなく、その形状も大きく変化する。沈下量(1)式を(3)式に代入すればひずみ度とすべり率の関係式を得る。これとひずみ度の定義  $(\theta_2 - \theta_{max}) / (\theta_{max} - \theta_1)$  より離脱角  $\theta_2$  を求めることができる。このように、接地応力の分布形状の算定に必要な入射角  $\theta_1$ 、離脱角  $\theta_2$  および最大法線応力発生角  $\theta_{max}$  は、いずれも沈下量から求めうるということが明らかになった<sup>8)</sup>。なお、これらの沈下特性は実験的に求めたものであり、より一般的な沈下モデルを確立することが今後の課題である。

### III 予測方法

#### 1. 応力分布モデル

##### (1) 法線応力

法線応力  $\sigma$  の予測には、入射位置と離脱位置を通りこれらを通る線分に垂直な主軸をもつ放物線分布モデルをベースとした。このモデルでは入射位置と離脱位置に対して分布形状が固定されて上述のような実測値と合わなくなる。そこで、放物線分布にすべり率  $s$  もしくは沈下量  $h$  の増加に伴って分布を前方に偏位させる項を追加した次式を用いる。

$$\left. \begin{aligned} \sigma(\theta) &= a(\theta - \theta_1)(\theta - \theta_2)e^{(siM\theta^2)} \\ M_\theta &= (\theta - \theta_1) / (\theta_2 - \theta_1) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

ここに、 $\theta$  は任意の接地角で  $M$  はこれを規格化した変数、 $a$  は応力の大きさを制御する係数で接地応力の垂直成分の積分値 (接地荷重) が車輪重量に一致するように調整する。すべり率が正の場合に指数項を単調に減少するように設定すれば、放物線分布から図4に示す分布のように変形する。すなわち、係数  $i$  とすべり率  $s$  で応力分布のゆがみの程度を制御でき、これらは前述のひずみ度に関連する。本研究で得た沈下特性を用いると、(3)式の沈下量  $h$  に(1)式を代入して変形すればすべり率  $s$  の係数として  $i$  を求めることができる。一般

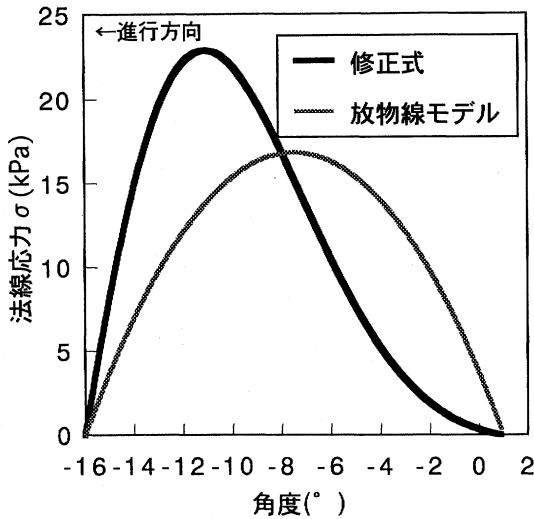


図4 法線応力分布  
Fig. 4 Distributions of normal stress

的にはひずみ度とすべり率の関係より得られる。実測値では近似的に  $i = (\epsilon - 1)/s$  の関係が見られた。 $i = 0$ においてこのモデルは放物線モデルに一致する。

(2) 接線応力

接線応力については、まず、接地面における土と車輪との接線方向の相対的なすべり量、すなわち、すべり変位量  $j$  と法線応力  $\sigma$  から接線応力  $\tau$  を求める次のJanosiモデルを用いた。

$$\tau(\theta) = \{c + \sigma(\theta) \tan \phi\} \{1 - e^{-j(\theta)/k}\} \quad (5)$$

ここに、 $c$  は土の付着力、 $\phi$  は外部まさつ角で、本式の右辺の最初の  $\{ \}$  内はすべりまさつに関するCoulomb式である。これらの係数は土と車輪材料とのまさつ実験によって求める。 $k$  は応力-変位係数で、応力-すべり変位曲線の形状を決める。すべり変位量  $j$  は、土に対する車輪上の1点の相対的な接線方向の変位量であり、次式で算出できる。

$$j(\theta) = r\{(\theta_1 - \theta) - (1-s)(\sin \theta_1 - \sin \theta)\} \quad (6)$$

Janosiモデルで求めた接線応力の分布形状は実測値とはかなり異なる。式(6)によるすべり変位量  $j$  は、入射位置付近では小さく、離脱位置に向けてほぼ直線的に大きくなるため、Janosiモデルの特性から接線応力分布は必然的に後方にずれる。この形状は実測値とは大きく異なっているため、これを改善するために、接線応力-すべり変位関

係にピークを表現できる次式を提案する(図5参照)。

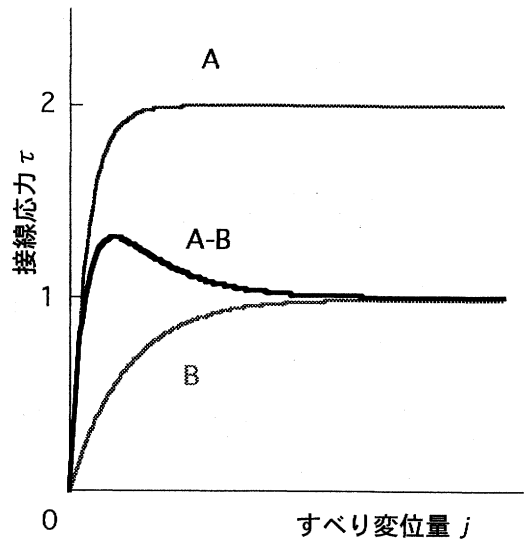


図5 ピークを有する接線応力-すべり変位関係  
Fig. 5 Tangential stress-slip displacement curve with a peak

$$\tau = (c + \sigma \tan \phi) \{2(1 - e^{-j(\theta)/k_a}) - (1 - e^{-j(\theta)/k_b})\} Sc \quad (7)$$

ここに、 $k_a$  および  $k_b$  は応力-変位係数で、これらの係数は供試土のまさつ試験結果から求める。 $Sc$  はすべり変位量  $j$  に関連する補正係数で、後述のように、式(6)で算出されるすべり変位量と実測値との差による影響を補正するために用いる。本研究における実験条件に対して、補正係数はすべり率  $s$  の関数として次式で与えた。

$$Sc = T_a(1 + s^3 T_b)(1 - e^{-s T_c}) \quad (8)$$

ここに、 $T_a$ 、 $T_b$  および  $T_c$  は係数である。図6に式(7)と式(8)による接線応力とすべり変位量の関係を示す。

4. 予測システム

(1) けん引力などの算出

予測した接地応力よりけん引力  $P$ 、接地荷重  $W$ 、トルク  $T$  はそれぞれ次式で求まる。

$$\left. \begin{aligned} P &= rb \int_{\theta_2}^{\theta_1} \{ \tau(\theta) \cos \theta - \sigma(\theta) \sin \theta \} d\theta \\ W &= rb \int_{\theta_2}^{\theta_1} \{ \sigma(\theta) \cos \theta - \tau(\theta) \sin \theta \} d\theta \\ T &= r^2 b \int_{\theta_2}^{\theta_1} \tau(\theta) d\theta \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

ここに、 $r$  および  $b$  はそれぞれ車輪半径および車輪幅である。

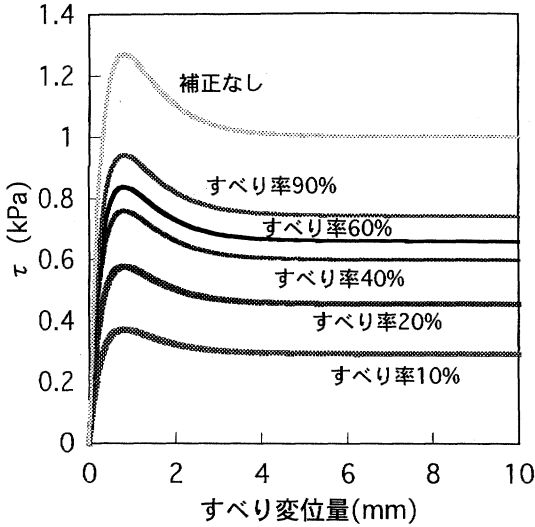


図6 すべり変位量の補正を考慮した接線応力  
Fig. 6 Tangential stresses by corrected slip displacement

(2) 予測の手順

予測の手順は、まず最初に計算条件としてすべり率  $s$ 、車輪の回転角  $\Psi$ 、車輪重量  $W$  を与えて沈下量を算出する。次に、この沈下量から入射角を幾何学的に算出し、離脱角  $\theta_2$  を沈下量とひずみ度の関係式から求める。接地応力  $\sigma$  および  $\tau$  を算出し、さらに積分を行ってけん引力、トルク、垂直荷重を算出する。接地荷重の算定値と設定値とを比較し、一致していない場合には修正計算を行う。終了後、応力分布図やけん引力の値などを出力する。この一連の流れを、回転角度に応じて沈下量を変化させて繰り返し実行し、走行状態における経時変化を計算する。計算条件を表2に示す。

表2 予測における計算条件

Table 1 Calculating conditions in the prediction

車輪重量	217N
車輪回転角度	0°~100°(計算範囲)
回転角の増分	0.5°間隔(計算増分)
すべり率	3.9~90.4%
供試土	気乾豊浦標準砂
土壌定数c	0
土壌定数φ	29°(ゴム-砂)
土壌定数Ka	3.67(ゴム-砂)
土壌定数Kb	1.11(ゴム-砂)
補正係数Ta	0.7
補正係数Tb	0.2
補正係数Tc	0.5

IV 結果および考察

1. 接地応力

(1) 法線応力

すべり率3.9%および42.3%における接地応力分布を図7に示す。同図のように、最大法線応力の発生位置については予測値と実測値はほぼ等しく、分布形状もかなり類似している。すべり率が高くなると最大応力発生位置は進行方向に移動し、最大値が低くなる傾向も表現されている。放物線分布ではこれらの傾向を適切に表現することはできない。このように、法線応力分布はここで提案した簡便なモデルによって精度よく予測できることがわかった。

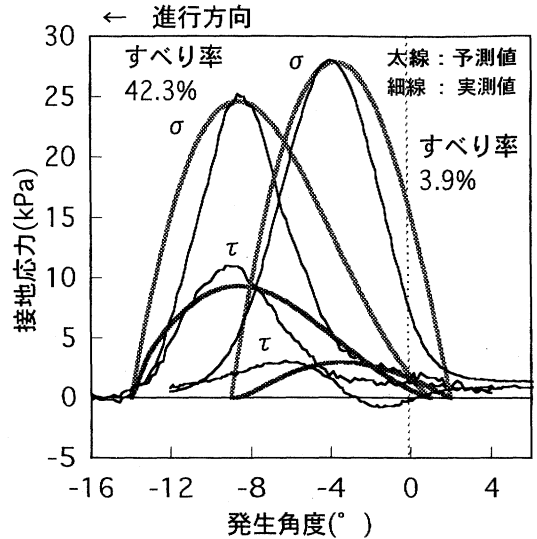


図7 接地応力分布の予測値  
Fig. 7 Predicted distributions of ground contact stresses

(2) 接線応力

前述のように、Janosiモデルによる接線応力は、最大応力発生位置が法線応力のそれよりも後方に位置し、実測分布形状とは大きく異なる。これに対して、拡張モデルによる予測結果は分布形状および大きさいずれも実測値と良く合っている。なお、低すべり率において実測値にみられる負の接線応力は本モデルではすべり変位量が正の値をとるため予測できない。低すべり率や負の

すべり率に対する接線応力の算出方法についてはさらに検討を要する。

(3) 応力分布の経時変化

応力分布の経時変化の例として、図8に車輪回転角0.05°刻みで計算したすべり率42.3%における分布を示す。応力分布は、0°から0.5°までは0.05°刻みに、1°から10°までは1°刻みに表示してある。回転初期では、沈下量が小さいので法線応力は相対的に狭い範囲に分布し、最大値は高い。この状態ではすべり変位量が小さいため接線応力は全般に低い値を示す。沈下量の増加に伴って接地面が拡大して、法線応力の分布幅は広くなり、最大応力値は減少する。この過程で、接線応力はまず急激に増加し、その後すべり沈下の増加に伴って分布が広がり、ピークは前方に移動する。このように、これらの変化状態は提案モデルによって適切に表現できることがわかった。

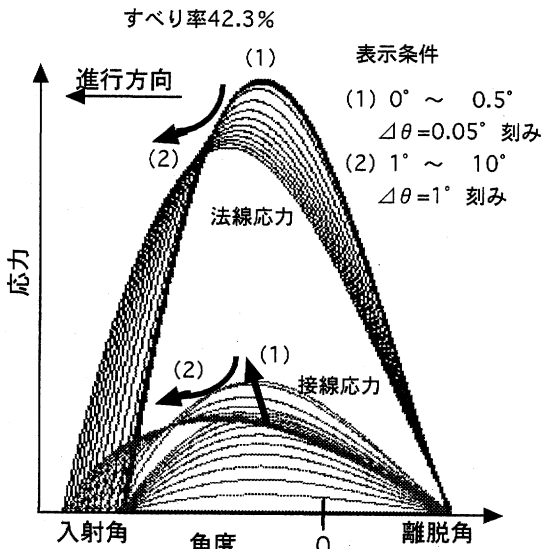


図8 接地応力分布の経時変化

Fig. 8 Time series of ground contact stress with wheel rotation

2. けん引力とトルクの経時変化

すべり率3.9%および42.3%における車輪回転角0°~50°までのけん引力およびトルクの経時変化をそれぞれ図9および図10に示す。計算は図8の場合と同じく0.05°刻みで行った。

すべり率42.3%では、実測けん引力は回転初期から急激に増加してピークが表れた後に、やや減

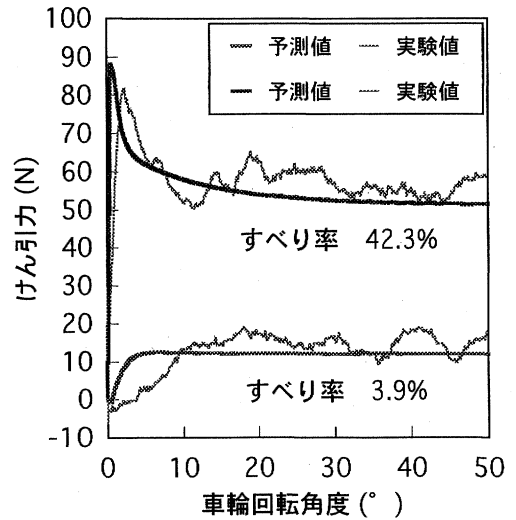


図9 けん引力の経時変化

Fig. 9 Changes of drawbar pull with wheel rotation

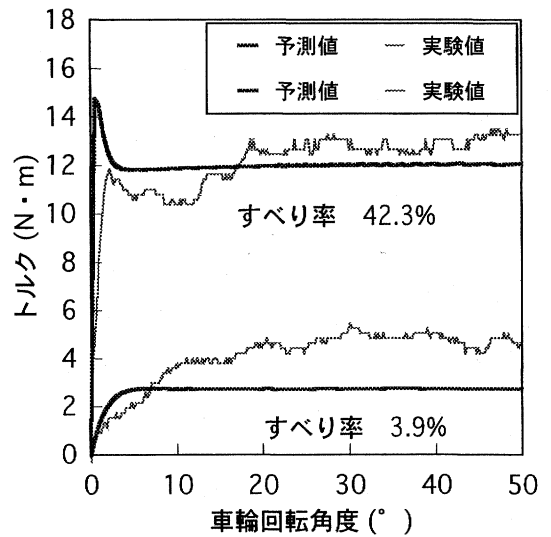


図10 トルクの経時変化

Fig. 10 Changes of torque with wheel rotation

少して定常状態に落ちつく。予測値でも同様にピークが表れ、実測値と非常に近い変化状態を示している。これに対して、Janosiモデルではけん引力は回転初期から緩やかに増加して定常状態に達し、ピークは表現できない。すべり率3.9%では、予測値は実測値と同様に単調に増加して一定値に収束し、ピークは表れない。定常値は実測値とほぼ同じであるが、初期勾配は実測値よりやや

大きい。

けん引力と同様にトルクの実測値と予測値はかなり近い傾向を示している。すべり率3.9%では実測値の方が全般に高い。また、トルクの実測値は沈下量よりも早く定常状態に到達し、沈下量が引き続き増加してもトルクは一定状態を保つ傾向がある<sup>8)</sup>。これは予測値においても確認できた。

### 3. すべり率とけん引力およびトルクの関係

すべり率と平均けん引力および平均トルクとの関係を図11に示す。これらの量として定常状態における平均値を用いた。

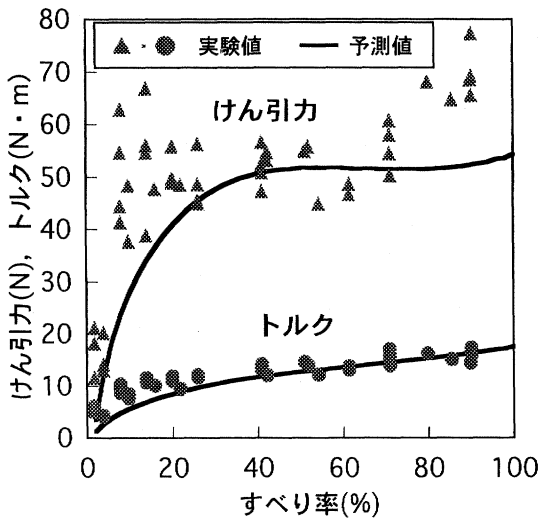


図11 すべり率と平均けん引力および平均トルクの関係

Fig. 11 Relationships between slippage and mean drawbar pull and mean torque

図11よりわかるように、実測平均けん引力は低すべり率で急激に増加し、その後、平坦もしくはやや減少するが、すべり率80%以上では再び増加する。予測値の傾向はすべり率20%以内では実測値よりやや低いもののほぼ同じであり、精度よく予測できることがわかる。Janosiモデルは低すべり率における平均けん引力をかなり低く見積もるのに対して、提案モデルでは改善の効果が顕著に表れている。すべり率100%付近において実測値は平坦な状態から増加しているが、やや低い値ながら予測値も類似の傾向を示している。

一方、平均トルクの予測値はすべり率30%以上ではほぼ実測値と等しい値となったが、低すべり

率では実測値よりもやや低い。全般に平均けん引力より平均トルクの予測値がよく適合している。

接線応力にJanosiモデルを用いるとけん引力およびトルクは法線応力にいずれの分布を用いても実測値の2倍近く高く算定する結果を得た。接線応力に提案式を用いた場合には、トルクはほぼ同じであるが、けん引力は放物線分布の方が高く、すべり率が高いほど差は増大する。接線応力にJanosiモデルを用いた場合にも同じ傾向がみられる。放物線分布では、ピークが提案モデルより後方に位置するので、接線応力のピーク位置もそれに伴って後方へずれる。したがって、接線応力の積分値の水平成分は大きくなり、法線応力の積分値の水平成分(走行抵抗)は小さくなるためにけん引力は大きくなる。ここでの計算例では提案モデルに対して放物線モデルのけん引力は最大で20%ほど高くなった。

### 4. 土の変形とすべり変位量

接線応力の算定では接地面におけるすべり変位量が重要な役割を果たす。しかし、その評価には大きな問題点があることがわかったので、今後の課題を明確にする意味でもここで述べる。

Janosiモデルにおけるすべり変位量 $j$ は、接地面上の土粒子はすべり率0%における車輪の一点と同じ軌跡を描くものと仮定して求められる。すなわち、すべり率0%におけるサイクロイド曲線と任意のすべり率におけるそれとの差に相当する。しかしながら、接地面近傍の土粒子は車輪の接近に伴って最初は前方斜め上へ移動し、次第に下方へ向きを変え、車輪通過後は後方へと円弧を描くように移動する<sup>11)</sup>。したがって、実際のすべり変位量は土の変形の影響を受け、式(6)で算定される値とは異なるものと予想される。すべり変位量の計測は行っていないので、ここでは車輪近傍の土粒子の変位よりこれを間接的に推定し、分析を行った。

図12に、土粒子の変位を分割して求めた増分を車軸中心に対する法線成分と接線成分に分解し、その接線成分と土粒子の角度との関係を示す。上述のすべり変位量の仮定では土粒子の変位増分の接線成分は常にゼロになる。式(6)に基づいて求めた車輪軌跡の接線変位増分は同図の実線で示してある。しかしながら、同図のように車輪前方から



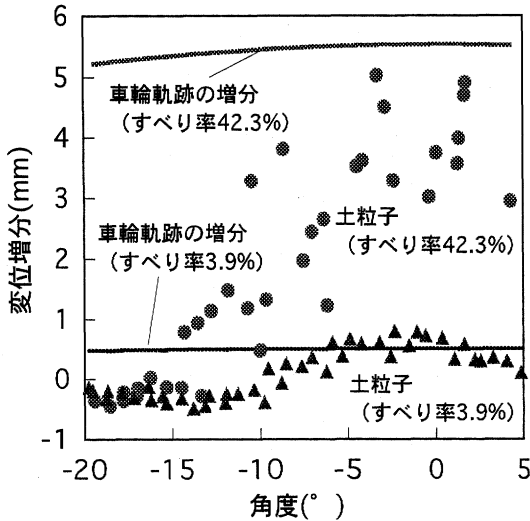


図12 車輪近傍の土粒子の変位とすべり変位量  
Fig. 12 Displacement of soil particle neighborhood of the wheel and slip displacement

後方に向けて、土粒子の接線変位増分は増加する傾向が見られ、仮定とは大きく異なることがわかる。実際のすべり変位量は、車輪軌跡の接線変位増分と土粒子の接線変位増分の差すなわち相対変位増分を積分した値となる。この相対変位増分の大きさとその方向（正負）によってⅡ-2で述べた応力の分布特性も決まるものとする。

このように、Janosiモデルにおけるすべり変位量は実際のすべり変位量よりかなり大きく見積もられているので、接線応力の算定にはこの差を考慮する必要がある。さらに、土粒子の変位状態によっては除荷状態となり、接線応力-すべり変位曲線による応力値より低い値となることも予想される。このため前述のように補正係数を用いて補正を行った。なお、ここで計測した土の接線変位増分はあくまで車輪近傍の値であり接地面における値とは異なる。今後、接地面における土粒子の変位の計測、すべり変位量の合理的な算定法、さらには、除荷に関連する応力値の評価法などの検討が必要である。

## V 摘 要

車輪の走行性を精度よく予測するために、従来の接地応力の予測モデルにすべり率の影響などを加えたモデルを提案した。さらに、剛性車輪による砂地盤での走行実験結果と比較して提示した予

測モデルの評価を行った。主な結果は次の通りである。

- 1) 車輪走行実験によって接地応力の分布特性と沈下量の経時変化を把握し、接地応力の予測に必要な接地面の幾何学特性と沈下量の関係を示した。
- 2) 提案したモデルによる接地応力分布は実測値に近く、高い精度で予測できることを示した。ただし、低すべり率における負の接線応力は予測できなかった。
- 3) 回転初期における法線応力は狭い範囲に分布して最大値は高く、接線応力の値は全般に低い。回転に伴って法線応力の分布は次第に広がって最大値は減少し、接線応力は急激に増加してピークが前方に移動する傾向を表現できた。
- 4) すべり率に対するけん引力やトルクの予測値の傾向は実測値とほぼ同じであり精度よく予測できた。全般に、けん引力よりトルクの予測値がよく適合している。
- 5) 走行に伴うけん引力やトルクの経時変化もある程度予測できた。高すべり率ではけん引力が実測値と同様にピークを示す変化を表現できた。
- 6) すべり変位量に対する考察を行い、Janosiモデルにおける値は実際よりかなり大きく見積もることを示した。

今後、走行車輪下の土の変形状態を詳細に解析し、接地応力に大きな影響を及ぼす沈下挙動の検討を行う予定である。

## 参 考 文 献

- 1) M.G.Bekker: Theory of Land Locomotion, The university of Michigan Press, 1955
- 2) J.Y.Wong: Behavior of Soil Beneath Rigid Wheels, J. Agricultural Engineering Research, 12(4), 257-269, 1967
- 3) O.Onaffeko, R.Reece: Soil stresses and deformations beneath rigid wheel, J.Terramechanics, 4, 59-80, 1967
- 4) 吉田勲: 車輪走行に関する実験的研究(第2報) - 鋼車輪の接地圧一, 農機誌, 34(2), 124-130, 1972
- 5) 広間達夫, 太田義信, 須山啓介: 車輪下の土壌変形の有限要素法による解析(第1報) - 車輪と土壌との摩擦力を考慮した場合一, 農機誌, 46(2), 163-170, 1984
- 6) 笈田昭, 吉村和彦: FEMによる土の粘弾性挙動解析(第1報), 農機誌, 41(3), 369-373, 1979
- 7) 上野正実, 鹿内健志, 橋口公一, 岡安崇史, 能勢行則: 走行車輪の接地応力分布とけん引性能に関する研究, 農業機械学会九州支部誌, 43, 1-8, 1994
- 8) 上野正実, 鹿内健志, 大嶺政朗, 橋口公一, 山中捷一郎, 岡安崇史: 走行車輪の沈下挙動に関する基礎研究, テラメ

- カニックス, 17, 1-6, 1997
- 9) Z.Janosi : Theoretical analysis of the performance of tracks and wheels operating on deformable soils, Trans. ASAE, 5(2), 136-146, 1962
- 10) Y.Nohse, K.Hashiguchi, M.Ueno, T.Shikanai, H.Izumi and, F.Koyama : A measurement of basic mechanical quantities of off-the-road traveling performance, J.Terramechanics, 28, 358-370, 1991
- 11) 鹿内健志, 上野正実, 橋口公一, 能勢行則, 岡安崇史 : 走行車輪下の土の変形の精密計測, 農機誌, 59(2), 3-11, 1997
- 12) 笈田昭, 佐藤昭彦 : 小型三方向センサによる車輪接地面各応力の測定, テラメカニックス, 8, 21-27, 1988
- 13) G.Krick : Radial and shear stress distribution under rigid wheels and pneumatic tires operating on yielding soils with consideration of tire deformation, J.Terramechanics, 6(3), 73-98, 1969
- 14) 伊藤信孝 : トラクタ駆動輪のすべり沈下について (第1報), 農機誌, 35(3), 238-244, 1973  
(原稿受理 : 1998年6月15日・質問期限 : 1999年5月31日)