

砂地盤上の剛性車輪のけん引力変動に関する力学的考察

上野正実*¹・岡安崇史*²・橋口公一*²・鹿内健志*¹・大嶺政朗*¹

要 旨

車輪が発生するけん引力は定常状態においても一定ではなく、ある幅をもって変動する。これは慣性力を無視できる低速走行時でも見られる一般的な現象であるが、従来の研究では諸力学量の平均値のみが扱われ、このような変動は考慮されてこなかった。しかしながら、走行性の解明や作業機の走行制御において重要となる現象であると考え、本研究では、砂地盤上で剛性車輪による走行実験を行い、けん引力などの変動特性について力学的解析を行った。走行車輪に作用する接地反力ベクトルは、接地面上をある幅をもって往復し、その挙動は人間の歩行運動に類似していることを明らかにした。接地反力と車輪表面との交点すなわち着点から車軸の鉛直中心線までの水平距離は、けん引力の増減に対してそれぞれ逆方向に変化し、両者には負の傾きをもつ直線関係が見られた。これらの現象はトルクのつり合い式で説明できることを示し、けん引力などの変動現象解明の第一歩を提示したと考える。

[キーワード] けん引力の変動, 接地反力, 歩行運動, 砂地盤, 剛性車輪, トルクのつり合い式

Mechanical Considerations on the Fluctuation of Drawbar Pull
of a Rigid Wheel on Sandy GroundMasami UENO*¹, Takashi OKAYASU*², Koichi HASHIGUCHI*²,
Takeshi SHIKANAI*¹, Masaaki OOMINE*¹

Abstract

Drawbar pull of a traveling wheel varies with certain amplitude in a stationary state, even though the traveling speed is so slow that the inertia force is negligible. Averaged values of the mechanical quantities are used as characteristic values of traveling performance, and such small fluctuation is usually neglected. The properties of fluctuation of drawbar pull and so on are mechanically examined by the traveling tests of a rigid wheel on sandy ground so that the fluctuation is important phenomena to clarify the traveling performance and to control machine operations. A soil reaction vector acted on the wheel moves back and forth on the contact surface with some extent of width. It is clarified that such behavior is similar to the walking motion of a man's leg. The horizontal distance from the intersecting point of the vector to the vertical center line of the shaft increases with the decrease of drawbar pull, conversely decreases with the increase of drawbar pull. There is a negative correlation between the horizontal distance and the drawbar pull. It is shown that the phenomena can be represented by the balance equation of torque.

[Keywords] fluctuation of drawbar pull, reaction, walking motion, sandy ground, rigid wheel, balance equation of torque

I 緒言

農機や建機などの不整地走行車両の用途や使用範囲は今後ますます拡大することが予想され、従来以上に優れた走行性が要求される。農作業においても精密作業が注目され、作業部だけでなく走行部も含めた高度な制御が必要になりつつある。走行性は走行装置と路面との相互作用によって決まるので、大幅な向上を図るにはこの相互作用を詳細に解明する必要がある。

ところで、走行性の解析では、従来、けん引力などの力学量として最大値や平均値などの特性値が用いられてきた。しかしながら、全ての実測データにおいて、これらの力学量は定常と見なしている状態でも一定にはならず、ある幅をもって変動している。このような変動は、実験法あるいは実験条件に由来する現象と見なされ、解析の対象とはされてこなかった。平均化操作によって現象の把握が容易になる一方で、多くの情報が消失すると思われるが、その中に走行現象の理解に有用な情報が埋もれている可能性もある。したがって、けん引力の発生メカニズムを解明し、設計などに利用できる予測モデルを構築するには、このような変動特性を詳細に解析する必要がある。さらに、けん引力などの変動は作業精度や機械の制御においても影響を及ぼすものと予想され、この面からも解明が望まれる。また、走行性予測の有効な手段として期待される有限要素法などの数値解析において、変動現象の扱いを検討する必要があると思われる。

けん引力などの変動に関しては、慣性力、路面状態など様々な発生要因が考えられる。本研究では、剛性車輪を斉一な路面で超低速で走行させ、慣性力や路面の影響を除いた基本的な変動特性の解析を行った。そのため、精密な車輪走行実験が可能な土槽実験装置^{1,2)}を用いて、砂地盤におい

て一連のすべり率を与えて実験を行った³⁾。まず、実験結果よりけん引力などの変動の特徴とその大きさを調べ、走行性への影響を検討した。次に、けん引力およびトルクと密接な関係のある接地反力の変動パターンを解析し、力学的考察を行った。さらに、トルクのつりあい式によってこれらの特性を説明できることを明らかにした。

II 方法

1. 走行実験装置

走行実験装置は、土槽、車輪装置、移動台車、データ集録・処理装置、および、付帯装置より構成されている(図1参照)。車輪装置は、ゴム皮膜車輪、駆動モータ(ステッピングモータ)および減速歯車装置からなり、リニアベアリングおよびL型センサを介して、移動台車と連結されている。車輪は外径300mm、幅410mmで、外周を厚さ5mmの硬質ゴムで焼付け皮膜してある。移動台車は、土槽の両側壁上部に装着された2本のボールネジとガイドに沿って移動する。ボールネジは車輪の駆動モータと同型のステッピングモータで駆動される。リニアベアリングの作用で車輪装置は同じ姿勢で上下に移動でき、接地荷重を一定に保つ構造になっている。リニアベアリングのまさつによる微小な鉛直力成分と車輪の自重を考慮して、実際の接地荷重を求めた。すべり率は、移動台車の走行速度と車輪の回転速度を個別に与え任意に設定できる。車輪の進行距離はすべり率によって異なるが、いずれにおいても車輪回転角と高い相関(相関係数 ≈ 1)の直線関係がみられ、高精度で設定されていることがわかる。装置の詳細は別報に述べてある^{1,2)}。

車輪に作用する合力すなわち接地反力の水平成

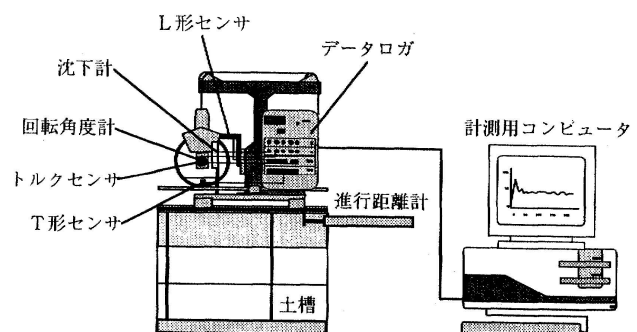


図1 走行実験装置

Fig. 1 Test apparatus

* 1993年4月 第52回農業機械学会年次大会(弘前大学農学部)にて一部講演

*1 会員, 琉球大学農学部 (☎903-0213 沖縄県西原町千原1番地 ☎098-895-8769) College of Agriculture, University of the Ryukyus, Senbaru, Nishihara, Okinawa, 903-0213 Japan

*2 会員, 九州大学農学部 (☎812-8581 福岡県東区箱崎6-10-1 ☎092-642-2929) Faculty of Agriculture, Kyushu University, Fukuoka, 812-8581 Japan

分（けん引力）、鉛直成分および作用線は、車輪と台車を連結するL型センサの鉛直バリおよび水平バリに設置したそれぞれ2組のひずみゲージで検出される¹⁾。接地反力の作用線は水平バリ、鉛直バリのそれぞれ2組のゲージの出力差（曲げモーメント差）とゲージ位置の幾何学的関係より求められる¹⁾。車軸トルクは一对のクロスゲージで測定した。回転角度、沈下量、進行距離はそれぞれ可変抵抗型ポテンシオメータで測定した。各センサで検出された力学量は、多チャンネルデータログで増幅後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・記録される。

2. 方法

供試土には気乾状態の豊浦標準砂を用いた。土槽への充填は、ホッパを装着した台車を土槽両外側のレールに沿ってゆっくり往復させ、空中落下法によって行った。充填中は、ホッパの排出口と土表面の距離を800mmに調節して、一定の落下高さを維持した。所定の間隙比の土層を安定して作成するために、ホッパから多重ふるいを通して土を落下させ、初期間隙比をおよそ0.61(平均)に調整した。この後、表面を水平に砂切りして走行路面を作製した。

実験では、土槽の所定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。最初を初期沈下状態、次を回転状態と呼ぶ。静止状態を基準にした車輪の回転角を車輪回転角と呼ぶ。車輪の周速度は0.083mm/sと超低速であるので振動の原因となる慣性力は無視しうらと思われる。本研究における実験条件を表1に示す。

表1 実験条件
Table 1 Test conditions

供試土	豊浦標準砂
間隙比	0.61(平均)
土層厚	60mm
車輪周速度	0.083mm/s
車輪重量	201N
すべり率	3.8, 9.9, 16.0, 28.0% 各3回 21.9, 42.0, 71.0, 90.2% 各2回

III 結果と考察

1. けん引力波形

図2にすべり率3.8%、16.0%、42.0%および71.0%における実測けん引力波形の例を示す。高すべり率ではけん引力は一旦ピークに達し、その後、減少してほぼ一定の値になり、ある幅で変動する波形が典型的である。後者を定常状態と見なし、そのけん引力を定常けん引力、平均値を平均けん引力と呼ぶ。すべり率が増加すると定常けん引力の振幅は大きくなり、すべり率71.0%の波形には長周期のうねりも含まれているようである。すべり率がさらに高くなると、定常けん引力の振幅は逆に小さくなる傾向がみられる。一方、すべり率3.8%では回転初期にけん引力が負の値になっているが、これは接地面において発生する推力が走行抵抗より小さいためである。回転とともに推力は次第に増加し、けん引力は正の値に転じる。

けん引力波形の特徴は、車輪直下付近の土のせん断変形特性によって、次のように定性的に説明できる。供試土層は密詰め状態であり、単純せん断試験における応力-ひずみ曲線はピークを有するひずみ軟化挙動を示す。すべり率に応じて車輪近傍の土のせん断ひずみの大きさが決まり、それに対応する応力が発生する。高すべり率ではせん断ひずみが増えて残留応力状態に近づく。すなわち、車輪下の土中のせん断ひずみの計測例^{2,7)}より供試した密詰めの砂地盤は残留応力状態付近に達していることがわかる。このため、平均けん引力の差は小さくなると考えられる。さらに、すべ

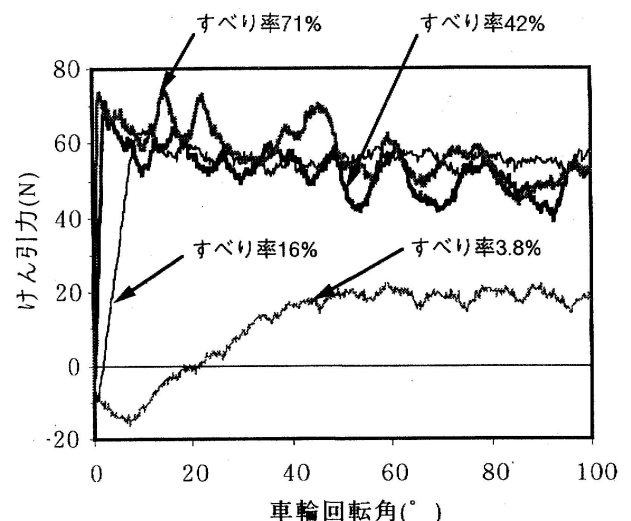


図2 実測けん引力波形の例
Fig. 2 Measured curves of the drawbar pull

り率90.0%以上では残留応力状態が優勢になり、定常けん引力の振幅は小さくなる。せん断変形がピーク応力付近で推移するすべり率においては、定常けん引力は相対的に大きく変動する。

2. トルク波形

図3に上述のけん引力波形に対応するトルク波形の例を示す。平均トルクもすべり率の増加に伴って高くなるが、定常状態における変動幅はけん引力波形に比べて相対的に小さい。トルクは接地面に作用する接線力によって決まるので、接地状態の影響を受ける。回転初期では、沈下量の増加に伴って接地状態が変化するためトルクは急激に増大している。定常状態では車輪の沈下量はほぼ一定の値で推移するのでトルクの変化は小さい。

3. 接地反力の歩行運動

接地反力はけん引力と接地荷重の合力であるので、けん引力の変動は接地反力の変動と密接に関連する。両者の関係を分析するために、接地反力の作用線と接地面との交点すなわち着力点を「反力作用位置」、そこから車軸中心線までの水平距離を「反力作用距離」と定義した。また、車軸中心線と作用線とのなす角を「反力作用角」と呼ぶ。

図4にすべり率3.8%、16.0%および42.0%における接地反力ベクトルの動きを示す。同図よりわかるように、ベクトルはけん引力の変動に合わせて接地面上をある幅で前後に往復運動する。詳細にみると、反力作用位置はけん引力増加時には

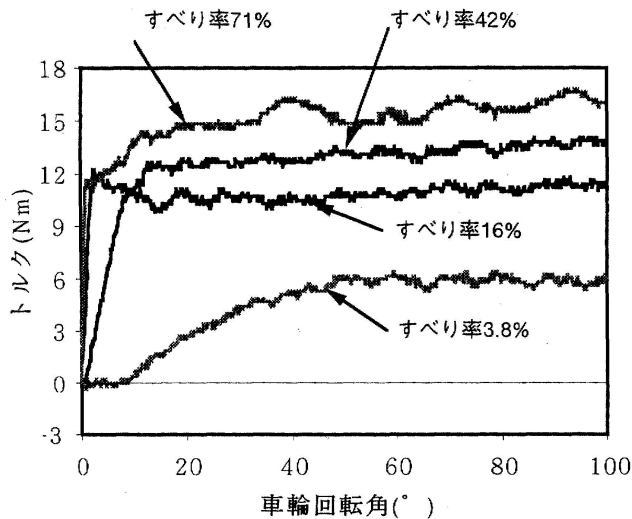


図3 実測トルク波形の例

Fig. 3 Measured curves of the torque

後方に移動し、反力作用角は増加する。すなわち、接地反力ベクトルは着力点を後方に移動させながら前傾する。一方、けん引力減少時には接地反力の着力点は進行方向へ移動し、反力作用角は小さくなる、すなわち、ベクトルが立ち上がるような運動を行う。このような接地反力ベクトルの動きは、人間が歩行する時に、まず片足を前方に移し、次第にこれに体重をかけながら軸線を傾け、後ろに蹴った後これを前に移す動きと類似している^{4,5)}。すなわち、接地反力ベクトルは、車輪の回転に伴って、人間の歩行運動に似た挙動を示すことが明かになった。すべり率3.8%および16.0%ではけん引力の振幅は小さいので接地反力の移動幅は狭いが、すべり率42.0%では振幅は相対的に大きく接地反力は広い範囲を移動している。

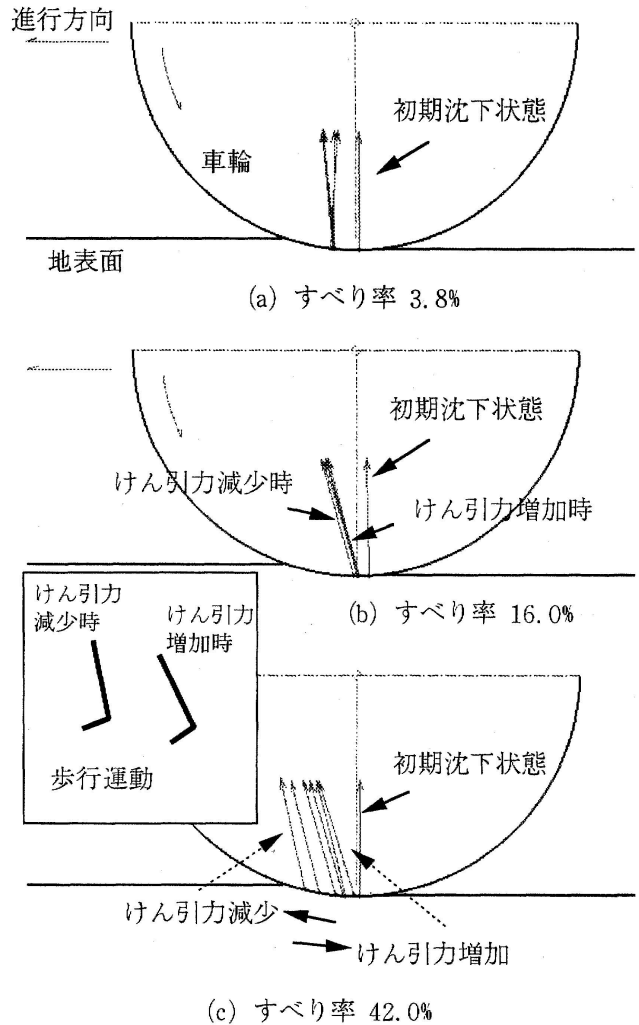


図4 接地反力ベクトルの挙動

Fig. 4 Behaviors of the soil reaction vector acted on the wheel

4. 変動が走行性に及ぼす影響

定常けん引力や定常トルクの変動の大きさを、それぞれの回帰直線を除いて波形に対する標準偏差で表す。図5に、けん引力の標準偏差と、すべり率 s および全すべり沈下量 z との関係を示す。けん引力の標準偏差はすべり率の増加に伴って大きくなり、71.0%付近で極大値を示し、それ以上では減少している。これはすべり率とすべり沈下量との関係に類似している。同様に、定常けん引力の標準偏差は沈下量に比例して大きくなる傾向がある。

けん引力の変動が走行性に及ぼす影響を見るために、その変動係数と変換効率との関係を調べた。変換効率は推進力に対するけん引力の比として定義し、けん引力への変換割合を意味する。変動係数を x (>0.02), 変換効率を y (%) とすると両者には次のような負の相関関係がみられた。

$$y = 23.67x^{-0.368} \quad (r = 0.763) \quad (1)$$

同様に、反力作用距離の標準偏差 z (mm) と走行抵抗 R (N) には正の相関関係がみられる。

$$R = 3.542z + 11.76 \quad (r = 0.697) \quad (2)$$

これらのことより、けん引力の変動はエネルギーロスにつながる事が明らかになった。

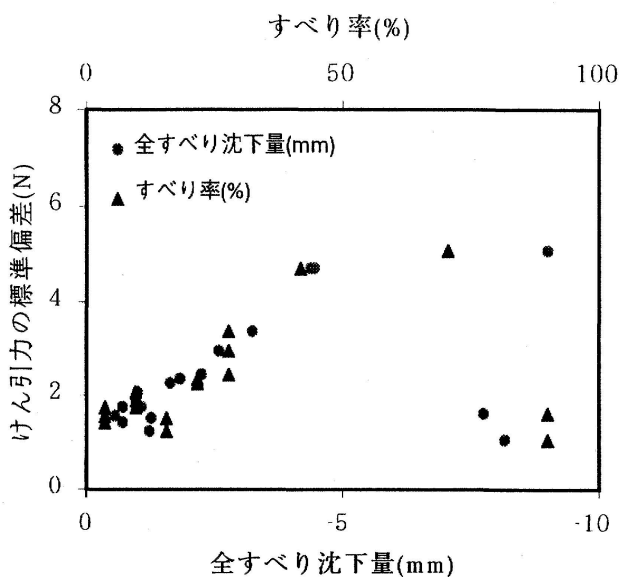


図5 けん引力の標準偏差とすべり率，全すべり沈下量との関係

Fig. 5 Relationships between the standard deviation of drawbar pull and slippage, and total slip sinkage

5. 反力作用距離とけん引力の関係

図6にすべり率3.8%、16.0%および42.0%における車輪回転に伴うけん引力と反力作用距離の推移を示す。反力作用距離の符号は車軸中心線から進行方向を正，後方を負と定義した。すべり率42.0%に比べて3.8%および16.0%ではいずれもけん引力および反力作用距離の変動幅は狭い。同図より、けん引力と反力作用距離の間には密接な関係があることが推察される。

この関係を明確にするために、けん引力と反力作用距離の関係を調べた(図7参照)。両者には明瞭な直線関係があり、車輪の走行状態すなわち回転初期，過渡状態，定常状態においてそれぞれ異

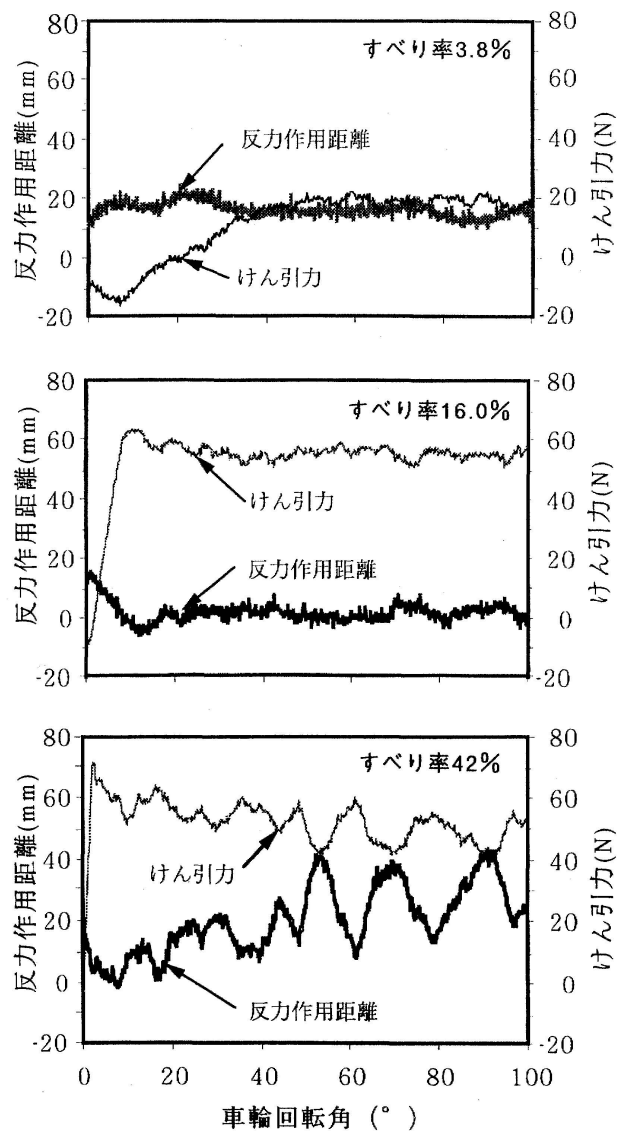


図6 車輪回転に伴うけん引力と反力作用距離の推移
Fig. 6 Changes of the drawbar pull and the application distance of soil reaction with wheel rotation

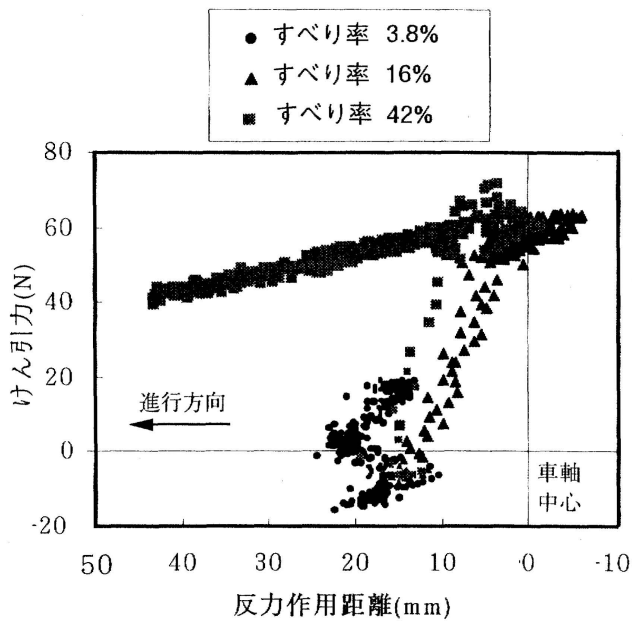


図7 けん引力と反力作用距離の関係

Fig. 7 Relationships between the drawbar pull and the applied position of the soil reaction

なるパターンが存在することが明らかになった。回転開始と同時に前面の土から走行抵抗を受けるので、反力作用位置はまず前方へ移動する(第1パターン)。これは低すべり率において顕著である。次に、けん引力増加時には反力作用位置は後方へ移動し、最大けん引力に達する(第2パターン)。その後、けん引力は次第に減少して定常状態となり、反力作用距離はほぼ直線的に増減を繰り返す(第3パターン)。このようなパターンは特定の走行条件だけでなく他の実験においても共通して見られた。

6. 接地反力の変動パターン

接地反力の変動の特徴を明らかにするために、3通りのパターンを仮定して特定を試みた(図8参照)。けん引力の増減は接地反力ベクトルの大きさだけが変化しても発生するが、この場合にはけん引力に比例した接地荷重の増減を伴う。前述のように、供試車輪装置は接地荷重一定の条件を満たす構造であるので、このパターンは該当しない。

同図のパターン(A)は、反力作用位置が接地面上のある点Pに固定され、接地反力ベクトルの傾きが変化するモデルである。ベクトルの大きさは接地荷重一定の条件を満足するように変化する。パターン(B)は、けん引力増加時には反力

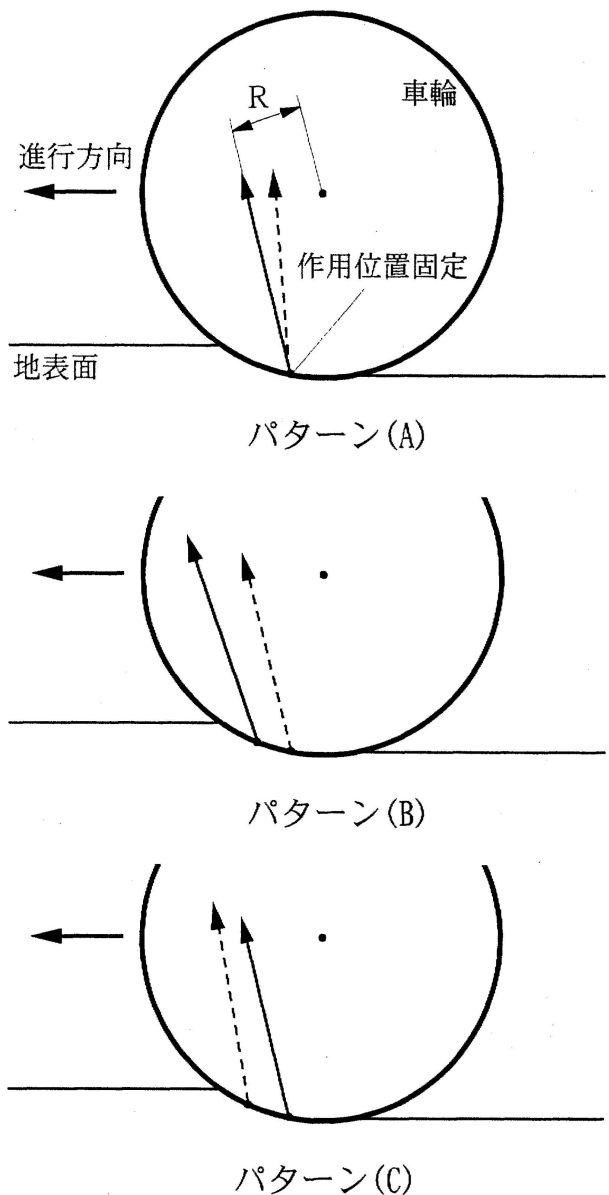


図8 接地反力ベクトルの挙動パターン
Fig. 8 Behavior patterns of the soil reaction vector

作用位置が前方へ移動し、減少時には後方へ移動するモデルである。パターン(C)はその逆の挙動を示す。これらは、接地反力の回転中心がそれぞれ接地面、その上部および下部にある場合に対応している。

それぞれのパターンに対して、実測けん引力を用いた算定トルクと実測トルクとの比較を行った(図9参照)。パターン(A)では、けん引力増加時には接地反力の大きさおよび腕の長さとともに

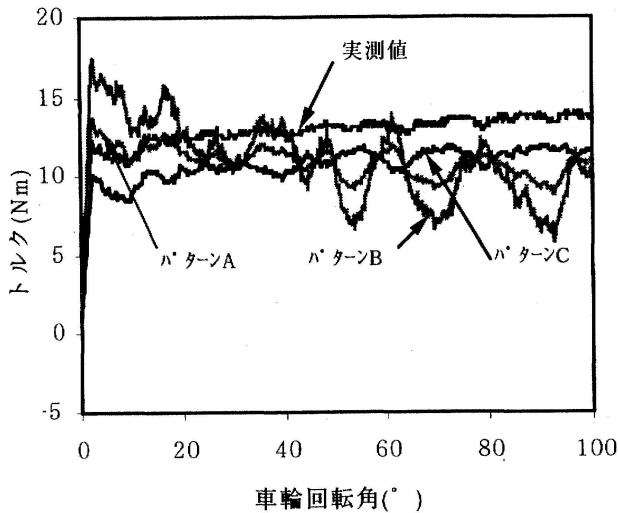


図9 接地反力ベクトルの挙動パターンによる推定トルクと実測値との比較

Fig. 9 Comparison between the measured torque and the predicted one from behavior patterns of the soil reaction vector

増大し、逆に減少時には両者とも小さくなるので、トルク (A) はけん引力波形より大きく変動する。パターン (B) では、けん引力増加時には接地反力の大きさおよびその腕の長さは増加し、けん引力減少時にはこれらはいずれも小さくなる。したがって、トルク (B) はトルク (A) 以上に大きく変動する。パターン (C) では、接地反力の大きさおよび腕の長さはパターン (B) とは逆に変化するので、トルクはけん引力の増減に関係なくほぼ一定の値を示す。トルクの実測波形はけん引力波形に比べて変動の幅が小さいので、接地反力ベクトルの変動パターンとしては (C) が実際に近いものと考えられる。このパターンは人間の足の歩行運動にも対応している。

7. 接地反力の回転中心

上述のように、接地反力ベクトルはある範囲内で回転運動を行っている。パターン (C) が実際の変動パターンに近いならば、接地反力の回転中心は接地面より上部で車軸中心線より前方に存在することになる。そこで、接地反力の瞬間回転中心 (x_c, y_c) を i 番目および $i+1$ 番目の作用線の交点として求めた。けん引力波形は移動平均によって平滑化を行った。すべり率3.8%、42.0%および90.2%における座標値 x_c と y_c の関係を図10に示す。

同図より、 x_c と y_c の間にはいずれも高い相関

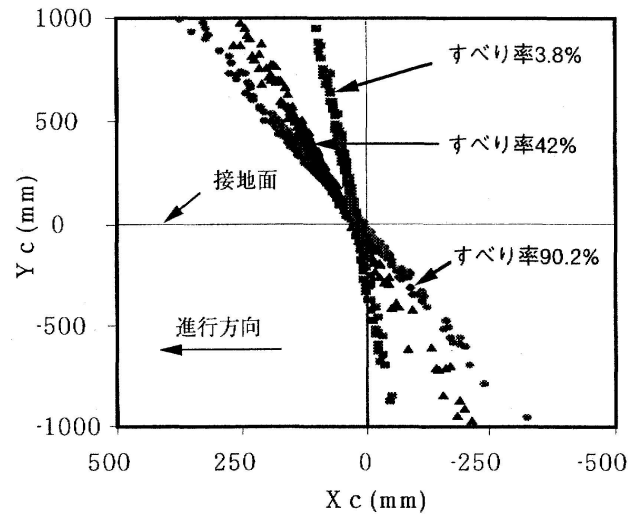


図10 接地反力の回転中心 x_c と y_c の関係

Fig. 10 Relationships between the rotation center x_c and y_c of the soil reaction

があり、そのほとんどが接地面より上部で、かつ、車軸中心線より前方に分布している。すべり率の増加に伴って回帰直線の勾配は小さくなり、切片はゼロに近づく傾向が見られる。通常、接地反力ベクトルの変化が小さいほどその回転中心は原点から遠ざかる性質がある。回転中心の分布より、接地反力ベクトルの変動はパターン (C) すなわち回転中心の y 座標値が正となるパターンが多いことがわかり、前述の議論とほぼ一致した。ただし、パターン (B) すなわち回転中心の y 座標値が負となる場合もあり、必ずしも単一パターンではない。

そこで、回転中心の分布をより詳細に調べるために、すべり率3.8%、42.0%および90.2%におけるけん引力増分と回転中心の y 座標値との関係を分析した (図11参照)。同図よりわかるように、すべり率が高いほどけん引力増分の分布幅は拡大し、回転中心の y 座標値は正の領域に大半が分布している。 y 座標値が負となるのは、回転中心が接地面付近に分布するか、またはけん引力増分が小さい場合であり、トルクの変化にはほとんど影響しない。したがって、パターン (B) はあまり重要ではないと言える。けん引力の増分値は回転中心の y 座標値に対してほぼ線対称に分布している。この関係と図10に示した相関関係より、けん引力増分の絶対値が等しい場合には回転中心の位置はほぼ一致し、反力作用位置は一定の幅で運動することがわかる。

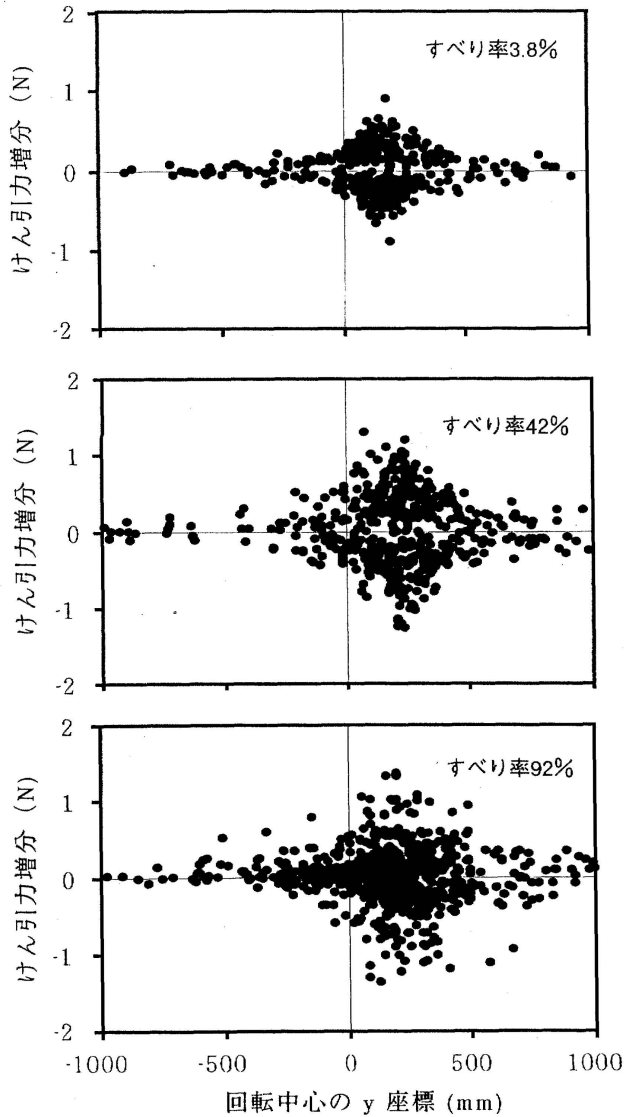


図11 けん引増分と接地反力回転中心の y 座標値との関係

Fig. 11 Relationships between the increments of drawbar pull and the y-coordinates of the rotation center of soil reaction

8. 接地反力の挙動に関する力学的考察

前述のように、反力作用距離とけん引力の間には直線関係が見られた。これは、接地反力ベクトルの挙動パターン、回転中心の位置および歩行運動に関連している。そこで、この現象を力学的に考察するために、接地反力 F を水平成分 F_h と鉛直成分 F_v に分解し、車軸から接地反力の水平成分までの距離 d_h と同じく鉛直成分までの距離 d_v を用いて、トルク T のつりあいを次式で記述した。

$$T = F_h d_v + F_v d_h = F_h \sqrt{r^2 - d_h^2} + F_v d_h \quad (3)$$

これより、けん引力は次式で与えられる。

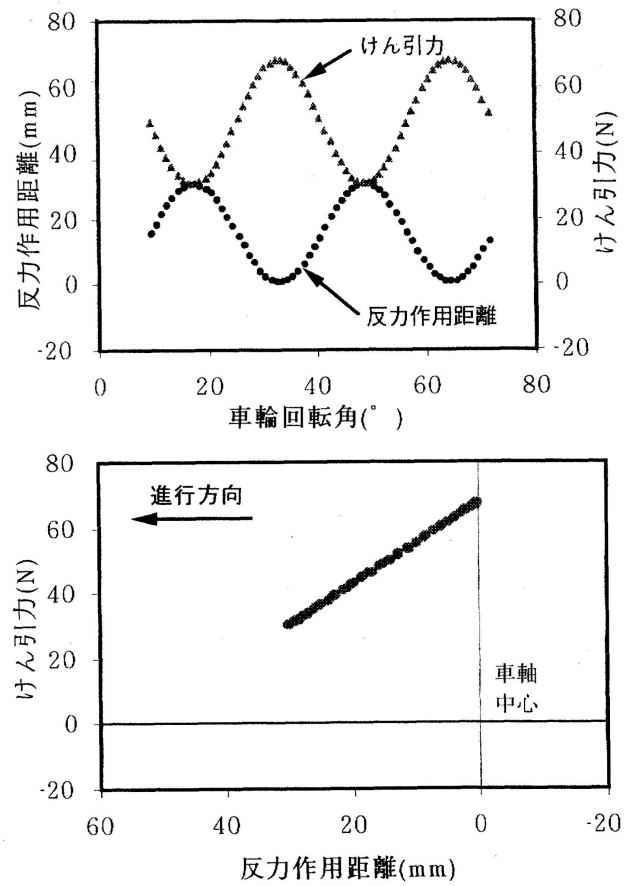


図12 トルクのつりあい式によるけん引力と反力作用距離の関係

Fig. 12 Relationship between the drawbar pull and the application distance of the soil reaction derived by the balance equation of torque

$$F_h = \frac{T - F_v d_h}{\sqrt{r^2 - d_h^2}} \quad (4)$$

車輪半径 r に対して接地反力作用距離 d_h は小さく $\sqrt{r^2 - d_h^2}$ はほぼ一定であるので、トルク T および接地荷重 F_h を一定と仮定すると、けん引力は d_h に対して直線的に変化する (図12参照)。確認の意味で、トルクおよび接地荷重を一定として、反力作用距離を三角関数で与えてけん引力の変化を調べた。その結果、反力作用位置の前方移動時にはけん引力は直線的に減少し、後方移動時には同様に増加する挙動が表現できた。このように、反力作用距離とけん引力の関係はトルクのつりあい式で説明できることが明らかになった。

定常状態においてトルクもある程度変化するので、反力作用距離とけん引力は、単一の直線ではなく、この直線を中心として一定範囲内に分布する関係となる。トルク T の値は式(4)よりわかるよ

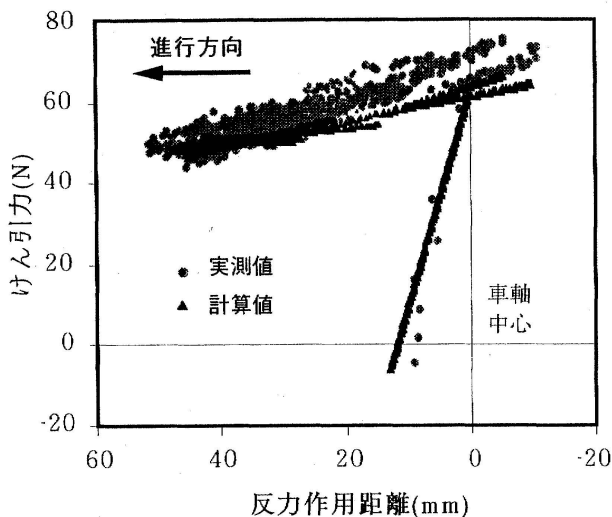


図13 トルクの変動に伴うけん引力と反力作用距離の関係

Fig. 13 Relationship between the drawbar pull and the application distance of the soil reaction due to the change of torque

うにこの直線の切片に関連している。反力作用位置の前方移動時に、トルクを一定増分で増加させると、直線の傾きは見かけ上減少する。トルクの増分値をある量より大きくすると直線の勾配は実験結果とは逆に正になる。すなわち、トルクが何らかの原因で大きく増減する時には反力作用距離とけん引力の関係は直線からずれることになる。このような特徴により、式(4)のトルクを一樣乱数を用いて変動させると、実験結果に近い関係を仮想的に作り出すことも可能である。その一例を図13に示す。式(3)あるいは(4)は一般的に成立する関係であるので、過渡状態も含めたすべての走行状態に適用できる。したがって、定常状態における接地反力の変化だけでなく、あらゆる状態における変化を解析できると考える。

前述のように、けん引力、接地反力、トルクなどの変動は慣性力による変動ではないので、その原因は他に求めなければならない。想定している原因は接地面近傍の土の変形の間けつ性である。Wong⁶⁾および著者ら^{2,7)}の研究によって車輪下の土は円弧を描くように変形することが解明されている。その動きが場所によって一樣ではなくむらが発生する、すなわち、土が大きく破壊流動したり小さな変形に留まるためにけん引力などが変動するものと考えている。これについては土の変形の計測例よりある程度確かめているが、現時点で

は計測精度⁷⁾と計測数の面からさらに検討を要する。

以上に述べたようなけん引力などの変動現象は、鉄車輪を用いた場合、土層の厚さを変えた場合、車輪重量を変えた場合などにも見られた^{8,9)}。

IV 摘 要

本研究では、剛性車輪を斉一な砂地盤上で低速走行させ、けん引力の基本的な変動特性を解析し、次の知見を得た。

- 1) 接地反力はけん引力の変動に合わせて接地面上をある幅で前後に往復運動し、反力作用位置はけん引力増加時には後方に、逆に減少時には進行方向へ移動する。反力作用距離とけん引力の間には負の相関を持つ直線関係が見られる。接地反力ベクトルの動きは、人間の足の歩行運動に類似していることを示した。
- 2) けん引力の変動はエネルギーロスにつながることを明らかにした。
- 3) 接地反力の挙動をより詳細に解析するために、いくつかの変動のパターンを仮定して得た推定トルクと実測トルクとの比較より、ありうるパターンを特定を行うとともに、反力ベクトルの回転中心の分布からもその確認を行った。
- 4) 変動現象に関する力学的考察より、トルクのつりあい式によってこれらの現象を説明できることを明らかにした。

けん引力変動の原因として車輪下の土壌変形に着目しているので、今後これを実証するとともに、実機における変動現象についても解明を進める予定である。

引用文献

- 1) 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
- 2) 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
- 3) 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, *農機学会九州支部誌*, 43, 1-8, 1994
- 4) 上野正実・泉 裕巳・後藤春樹・橋口公一・能勢行則, 内山恵一, 鹿内健志: 車輪走行時におけるけん引力の変動, *テラメカニックス*, 14, 141-147, 1994
- 5) M. Ueno, T. Shikanai, T. Okayasu, K. Hashiguchi,

- Y. Nohse, H. Gotoh and K. Uchiyama : Walking motion of the soil reaction acting on a wheel, Proceedings of the 4th Asia-Pacific Regional Conference of the ISTVS, 199-206, 1995
- 6) Wong, J.Y. : Behaviour of soil beneath rigid wheels, J. Agric. Eng. Res., 12(4), 257-269, 1967
- 7) 橋口公一・岡安崇史・上野正実・鹿内健志 : 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, 農機誌, 60(6), 11-18, 1998
- 8) 上野正実・鹿内健志 : 車輪重量がけん引性能に及ぼす影響, 琉大農学術報告, 41, 177-183, 1994
- 9) 鹿内健志・上野正実・大嶺政朗・橋口公一・山中捷一郎 : 車輪のけん引力の変動現象について, テラメカニクス, 17, 7-12, 1997
(原稿受理 : 1998年6月15日・質問期限 : 1999年9月30日)