軟らかい地盤における装軌車の運動特性*

今村 政弘^{*1}, 渡邊 啓二^{*2}, 山川 淳也^{*2}
城崎 博美^{*1}, 北野 昌則^{*2}

A Spatial Motion of Tracked Vehicles on Dry Loose Sand

Masahiro IMAMURA, Keiji WATANABE, Junya YAMAKAWA,
Hiromi JOZAKI and Masanori KITANO

A mathematical model was developed for the mobility simulation of tracked vehicles on non-level terrain. The motion of the vehicle is represented by three translational and three rotational degrees of freedom. The soil-track interaction model is based upon available soil plasticity theories and terrain, in this code, as described by a discretized surface elevation map. Terrain-vehicle interaction was developed by a set of generalized constitutive relations between the interaction forces and vehicle kinematic variables, such as sinkage and slip velocity. The turning tests by using a scale model on dry loose sand was conducted. The numerical results were compared with experimental data.

Key Words: Automobile, Maneuverability, Construction Machinery, Tracked Vehicle, Spatial Motion, Soft Terrain

1. 緒 言

装軌車は、履帯という無限軌道を走行する転輪を通じて荷重を地盤に伝える車両であり、軟らかい地盤においては高い浮力と推進力を有し、優れた運動特性を発揮できる⁽¹⁾⁽²⁾。これまでに、堅固路面⁽³⁾や傾斜地における過渡運動特性の解析⁽⁴⁾および、ゆるい砂地上における低速時の装軌車の平面運動⁽⁵⁾⁽⁶⁾の理論モデルを導出するとともに、各種走行条件における旋回特性を明らかにしてきた。しかし、車両は平坦な路面を走行することはまれであり、任意の起伏をもつ路面を走行することがほとんどである。Lethrwoodら⁽⁷⁾は、堅固路面における障害物通過時の車両の運動特性などについて解析し、車体の設計などに用いている。Murakamiら⁽⁸⁾⁽⁹⁾は軟らかい地盤における車両の旋回運動について、履帯と地盤の相互作用を考慮した三次元運動方程式を導出している。しかし、履帯と地盤間の荷重分布特性を一様分布と仮定したり、転輪下の転がり抵抗が考慮されておらず、また、旋回時における履帯

の沈下特性やけん引力の推定等については十分な検討が行われていない。

そこで、本研究では、起伏をもつ軟らかい地盤を走行する装軌車の三次元理論モデルを確立するため、履帯と地盤の相互作用を実験的に明らかにするとともに、懸架特性が異なる模型車両を用いて砂地盤上で走行実験を行い、装軌車の運動特性を理論と実験の両面より比較検討しようとするものである。

2. 装軌車の三次元運動方程式

図1は、装軌車の運動を三次元空間内の剛体運動と仮定した場合の座標系と車体の運動を示している⁽⁸⁾。

Fig. 1 Reference and body-attached coordinate systems

* 原稿受付 1998年3月27日。

*¹ 防衛大学校機械工学教室 (☎ 239-8686 横須賀市走水1-10-20)。*² 正員, 防衛大学校機械工学教室。

E-mail: watanabe@cc.nda.ac.jp

装軌車の運動は空間に固定された静止座標系 (X_I, X_{II}, X_{III}) に対して、任意の角速度 ω で回転しながら重心速度 V^c で並進運動する動座標系 (x_1, x_2, x_3) を用いて、6自由度の運動として解析できる。ここで、静止座標系、動座標系における単位ベクトルを $\{E_I, E_{II}, E_{III}\}, \{e_1, e_2, e_3\}$ でそれぞれ表す。また、三次元空間に記述される任意の起伏路面は $f(X)=0$ で表され、水平路面は $X_{III}=一定$ として求められる。

図2は軟らかい地盤を走行する装軌車に作用する外力を示したものである。空気抵抗を無視すれば、外力は重心に作用する重力と任意の (j, α) 転輪下において履帯が地盤から受ける力を $Q^{(j, \alpha)}$ とすれば、運動方程式は次のように求めることができる。添字 j は第 j 番めの転輪、 α は右側、左側履帯をそれぞれ 1, 2 で表す。

$$mA^c = \sum_{j=1}^n (Q^{(j,1)} + Q^{(j,2)}) - mgE_{III} \quad \dots\dots (1)$$

$$\dot{H}^c = \sum_{j=1}^n (x^{(j,1)} \times Q^{(j,1)} + x^{(j,2)} \times Q^{(j,2)}) \quad \dots\dots (2)$$

ただし、 m は車両質量、 A^c は重心加速度、 $\dot{H}^c$ は角運動量の時間的変化率であり、 $Q^{(j, \alpha)}$ は履帯と地盤の相互作用によって求められるものである。

3. 履帯と地盤の相互作用

3.1 基礎実験装置と方法 図3に履帯と地盤の相互作用を明らかにするために用いた基礎実験装置と

Fig. 2 Representation of external forces acting on a tracked vehicle

Fig. 3 Plate penetration and shear test apparatus

モデル履帯を示す。履帯は後述の模型車両の履帯接地部をモデル化した幅 8 cm、長さ 42 cm の平板 (a) と 2 cm 間隔に高さ 0.7 cm のグローサを装着した履板 (b) を使用した。実験は、砂槽上の平板に垂直荷重を与えて垂直力と沈下量の関係を測定する載荷実験、および履板の縦方向 (長手方向) に対する取付角 θ を変化させたせん断実験を行い、滑り量と沈下量、せん断力などを比較検討した。なお、実験の再現性を得るため、供試土には粒径が比較的均一な乾燥した豊浦標準砂を使用した。

3.2 履帯の準静的沈下量と垂直力 Bekker は平板の準静的な沈下量 u_3 と接地圧 p の関係について、次のような実験式を提案している⁽¹⁾。

$$p = \left(\frac{k_c}{W} + k_\phi \right) u_3^n \quad \dots\dots (3)$$

ここで、 W は載荷幅、 k_c, k_ϕ, n は地盤の性質による沈下係数である。図4は、模型車両の転輪間隔 $\Delta L = 10$ cm と同じ寸法で、幅の異なる 2 枚の平板を用いて載荷実験を行ったときの、沈下量と接地圧を両対数で表したものである。図4の勾配から $n=1.52$ 、 $k_c=4.8$ ($\times 100$ kN/m ^{$n+1$})、 $k_\phi=0.22$ ($\times 100$ kN/m ^{$n+1$}) となる。

したがって、式(3)を用いて履帯の沈下量と垂直力の間には次式が成り立つ⁽⁹⁾。

$$Q_3 = \Delta L (k_c + W k_\phi) u_3^n \quad \dots\dots (4)$$

ただし、 $\Delta L, W$ は転輪間の距離と履帯幅である。

図5は転輪間隔 ΔL と同じ幅の長さ 10.0 cm、幅 8.0 cm の平板による載荷・除荷間の沈下量と接地圧の関係を示したものである。図5から、除荷後に地盤の弾性回復に伴う弾性沈下量が認められる。そこで、

Fig. 4 Average pressure-sinkage data under monotonic loading

Fig. 5 Average pressure-sinkage curve under cyclic loading

Fig. 6 Updating scheme for the normal force

準静的な沈下量 u_3 は弾性沈下量 u_3^{el} と塑性沈下量 u_3^{pl} に分類でき、垂直力 Q_3 はフックの法則を適用すれば増分形式で次のように表せる。

$$\dot{Q}_3 = K' \dot{u}_3^{el} = K' (\dot{u}_3 - \dot{u}_3^{pl}) \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 K' は図 5 の載荷・除荷曲線の傾きから求められ、 $11\,760.0 (\times 100 \text{ kPa/m})$ となった。

図 6 は、沈下量と垂直力の関係を模式的に示したものである。図 6 のように、式 (4)、(5) を用いて、装軌車の各転輪下における垂直力 Q_3 と、弾性沈下量 u_3^{el} や塑性沈下量 u_3^{pl} を解析的に求めることができる。

3.3 滑りによって発生するせん断力 装軌車が軟らかい地盤を走行する場合、履帯と接触した地盤の比較的薄い層において、履帯の滑りによる変形によってせん断力が発生し、そのせん断力に対応するだけの推進力を得ることができる。Janosi と Hanamoto⁽¹⁰⁾ は、粘性の低い砂質土の場合、せん断力 Q_1 と滑り量 $[u_1]$ に式 (6) のような実験式を提案している。

$$Q_1 = Q_y(Q_3) \{1 - \exp(-\beta[u_1])\} \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 β は滑り-せん断曲線の形状から求められる係数であり、 $Q_y(Q_3)$ は最大降伏せん断力で垂直力 Q_3 の関数として式 (7) のようになる。

$$Q_y = c + \eta Q_3 \quad \dots\dots\dots (7)$$

(a) Without grousers

(b) With grousers

Fig. 7 Shear force and slippage relations

式 (7) の c は地盤の粘着力であり砂質土では無視できる場合が多く、 η は垂直力に対する縦方向の最大降伏せん断力を規定する地盤の係数であり、堅固路面における最大摩擦係数に相当するものである。

装軌車は操舵をする場合、左右の履帯に速度差を与えて履帯を滑らせながら旋回するため、履帯接地部が任意の方向に滑ったときのせん断力を一般化する必要がある。

図 7 に取付角 $\theta = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ におけるせん断実験結果の一例を示す。図 7(a) は平板 (w/o)、(b) はグローサ付き履帯 (w) であり、それぞれ横軸は滑り量、縦軸は滑り方向のせん断力を示している。図 7 より、せん断力は垂直力に比例し、グローサがある場合には (b) のように縦方向 ($\theta = 0^\circ$) のせん断力が大きいことから、滑り方向に依存した異方性があることがわかる。

履帯と路面間に滑りが発生するとき、地盤は塑性滑りの状態にある。一般に、塑性力学においては応力空間中の降伏面と、その上での塑性ひずみ増大の方向を示す流れ則、および硬化による降伏面の変形を実験的に明らかにする必要がある。図 8 は垂直力と、縦方向および横方向のせん断力の関係を示したものである。ここで、垂直力とせん断力の関係は図 8(a) の破壊包絡面の一点で表せる。つまり、垂直力 Q_3 が求まるとこれに応じた最大降伏せん断力 Q_y が決まり、縦方向、横方向のせん断力 Q_1, Q_2 は式 (8) で表すことができ

Fig. 8 Critical slip surface

Fig. 9 Loading surface for the loading plate with grousers

る。

$$(Q_1)^2 + (\kappa Q_2)^2 = Q_y^2(Q_3) \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここで、 κ は縦と横方向の降伏せん断力の比を表す係数である。また、運動方程式(1)、(2)を解く過程で得られる履帯の滑り速度 $[V]^{(j,a)}$ の方向が、降伏面と直交する(法線方向を向く)ならば、流れ則は関連流れ則⁽¹¹⁾に従い図8(b)のように Q_1 、 Q_2 を求めることができる。

図9は、グローサ付き履帯を用いて取付角 θ を15°ずつ変化させたせん断実験による降伏滑り面と滑り速度ベクトルを示している。横軸は縦方向(履帯の長手方向) Q_1 、縦軸は横方向のせん断力 Q_2 を表しており、図9中の●印が降伏せん断力 ($u_s = 20, 25, 30$ mm) であり、この点を結んだ曲線が降伏面となる。図9中の矢印は、 θ 方向を向く滑り速度ベクトルであり、降

Fig. 10 Generalized Janosi's shear force-slippage relation

Fig. 11 Sinkage-slippage curves with different normal loads and slip directions

伏面に対して法線方向を向いていることから流れ則は関連流れ則を適用できるといえる。

履帯が任意の方向へ滑ったときのせん断力を求めるために、Janosi と Hanamoto の式(6)は次のように有効せん断力 Q_{eff} と有効滑り量 $[u_{eff}]$ を用いて式(9)のように一般化することができる⁽⁹⁾。

$$Q_{eff} = Q_y(Q_3) \{1 - \exp(-\beta[u_{eff}])\} \quad \dots\dots\dots (9)$$

ここで、 Q_{eff} と $[u_{eff}]$ は有効せん断力、有効滑り速度として、それぞれ次のように表せる。

$$Q_{eff} = \sqrt{(Q_1)^2 + (\kappa Q_2)^2} \quad \dots\dots\dots (10 \cdot a)$$

$$[u_{eff}] = \sqrt{([V_1])^2 + \left(\frac{1}{\kappa} [V_2]\right)^2} \quad \dots\dots\dots (10 \cdot b)$$

図10は、図7(b)のグローサ付き平板のせん断実験結果を、式(9)、(10・a)、(10・b)を用いて Q_{eff} と $[u_{eff}]$ で整理したものであり、ほぼ一つの曲線で表すことができることがわかる。

3・4 地盤の沈下特性 図11は、グローサ付き平板を用いて縦方向($\theta = 0^\circ$)と横方向($\theta = 90^\circ$)に滑らせたときの滑り沈下量 u_s^l を示している。図11から、横方向の沈下量が大きいことから、滑り沈下量は滑り方向に依存した異方性があることがわかる。一般に、滑り沈下量は荷重と滑りに対して線形であると考えられるので、任意の方向 θ に履帯が滑った場合の沈

Fig. 12 Total sinkage

Fig. 13 Rolling resistance

下量を近似すると式(11)で表せる.

$$\dot{u}_3^{sl} = \gamma(\theta, Q_3) [V_s] \quad (11)$$

ただし, $[V_s]$ は合滑り速度で $[V_s] = \sqrt{[V_1]^2 + [V_2]^2}$ であり, $\gamma(\theta, Q_3)$ は滑り方向 θ と垂直力 Q_3 の関数となる.

また, 転輪が履板を通過する際には, 履板が転輪に巻き付き, 履板の運動によって路面強度に変化が起こる. これによって発生する沈下量は, かくはん沈下量 u_3^{ag} として表すことができる⁽⁹⁾.

以上より, 履帯の全沈下量 u_3 は, 図 12 のように平板載荷実験から得られる準静的な弾性・塑性沈下量 u_3^{el} , u_3^{pl} , および滑り沈下量 u_3^{sl} と, かくはん沈下量 u_3^{ag} の和として増分形式で式(12)で求めることができる⁽⁹⁾.

$$\dot{u}_3 = \dot{u}_3^{el} + \dot{u}_3^{pl} + \dot{u}_3^{sl} + \dot{u}_3^{ag} \quad (12)$$

4. 装軌車の旋回実験と 数値解析による検討

本理論モデルの有効性を検証するために数値解析を行うとともに, 模型車両を用いた走行実験と比較検討し, 懸架方式が走行特性に及ぼす影響を調べた.

4.1 転がり抵抗 車両が走行する場合, 路面が十分に堅固であれば路面は変形しないため, 転がり抵抗は比較的小さいが, 軟らかい地盤では路面を変形させるため, 車両の前進を阻止する方向に大きな転がり抵抗が生じてくる. 図 13 の左は転輪の接地圧分布を示したもので, 転輪中心線から回転方向の角度を ψ で

Fig. 14 View of the scale model during a J-turn

Fig. 15 Comparison of trajectories of C. G.

表すと, 転輪下の微小角度に作用する転がり抵抗は接地圧 p の進行方向成分として $dR^c = p \sin \psi \cdot W \cdot d\psi$ となる. p を図の右に示すように Bekker の式(3)で計算すれば, 沈下量の関数となる接触角 ψ_1, ψ_2 の間で積分することにより, 転輪に作用する転がり抵抗 R^c を式(13)で求めることができる.

$$R^c = \frac{k_c + Wk_\phi}{r(n+1)} \{ (r - u_3^{el} - u_3^{pl})^{n+1} - (r - u_3^{el})^{n+1} \} \quad (13)$$

4.2 実験装置と方法 図 14 に模型実験の概観を示す. 模型車両は, 質量 50.5 kg, 履帯接地長 42 cm の実車の 1/10 スケールモデルであり, 動力源として二つのサーボモータを使用し, 入力電圧を変化させることにより, 左右起動輪軸の回転数を任意に制御して操向比 ϵ (外側/内側履帯速度の比) を入力できる. 実験は, 幅 3.0 m, 長さ 4.0 m の大形砂槽に豊浦標準砂を約 30 cm 敷き詰め, 15 cm 掘り起こして水平平坦にならした地盤上で, 直進走行から左回りの J 旋回実験を行って, 車両の重心軌跡と履帯の所要けん引力, 路面の変形特性について調べた. なお, 重心軌跡は車体の前後に取付けた光源を天井から CCD カメラで追随し, けん引力は起動輪軸に添付したひずみゲージで測定した. 車両にはグローサのない金属製のフレキシ

プル履帯を取付けており、懸架装置は、接地圧分布が一樣になるソリ式懸架 (R: Rigid suspension) と、転輪下に集中荷重となる固定懸架方式 (F: Fixed suspension) を採用した。

4・3 数値解析と旋回実験結果の比較 図 15 は平板 (w/o) とグローサ付き平板 (w) のパラメータを用いた数値解析結果と、接地圧分布が一樣なソリ式懸架方式 (R) の模型実験による重心軌跡を示したものである。図 15 中の実線が実験値を示しており、点線が平板、破線がグローサ付き平板のパラメータを用いた数値解析結果である。なお、直進時の履帯速度 $= 0.2$ m/s, 操向比 $= 1.3$ である。図 15 より、グローサ付き平板 (w) の計算値は実験値とよく一致しているが、せん断力の異方性がない平板 (w/o) は、実験値より約 20% 程度回旋半径が大きくなっていることがわかる。これは、模型車両の履帯はグローサがないにもかかわらず、履帯はローラチェーンで結合されているため、軟らかい地盤においては履帯のすき間がグローサと同じ効果があるものと考えられる。

図 16 は、路面の変形特性を調べるために、模型車両の走行後の路面を非接触のレーザ変位計でスキャンし、路面の沈下量を右側に添付したように濃淡で表したものである。ここでは色が黒いほど沈下量が多いことを表している。また、図 17 は図 16 中の断面における定常旋回時の轍を比較したものであり、横軸は座

標 X_{II} であり、縦軸は座標 X_{III} つまり地盤の変形量を示している。これより、計算値と実験値の路面の沈下量は比較的良好に一致している。

4・4 固定懸架方式を有する装軌車の運動特性

図 18 に示すように、建設用機械などには図 18(a) の接地圧分布が一樣な懸架方式が採用されることがあるが、高速で走行する装軌車には、図 18(b) のように転輪下に荷重が集中する固定懸架方式の走行装置が一般的である。このような車両の運動特性を解析するには、履帯の接地圧分布を厳密に考慮する必要があると考え、図 18(b) のような模型車両の履帯と同寸法な履板を 1~3 枚組にして取付けた集中モデル履板 (c:

Fig. 18 Difference of pressure distribution under the tracks

Fig. 16 A discretized elevation map during a J-turn

Fig. 17 Comparison of depth of ruts

Fig. 19 Comparison of trajectories of C.G.

Fig. 20 Comparison of depth of ruts

Fig. 21 Comparison of tractive forces

Fig. 22 Simulation of passing behavior on non-level soft ground

Concentrate type) を使用したせん断実験を行って、数値解析に必要なパラメータを収集した。

図 19 は、固定懸架方式の装軌車の重心軌跡について、操向比=1.8 における数値解析と実験結果を比較したものである。図 19 中の実線が実験値 (F: Fixed suspension) を示しており、点線が平板 (*w/o*)、破線が集中モデル履板 (*c*) の数値解析結果である。図 19 より、平板の計算値に比べ、集中モデル履板の計算値は実験値とよく一致することがわかる。

図 20 は、定常旋回時の轍について実験値と計算値を比較したものである。図 20 より、沈下量に関して、集中モデル履板 (破線) は平板に比べて沈下量が大きく、実験値に近い路面の変形特性を示すことがわかる。

図 21 は、旋回中の左右履帯に作用する所要けん引力 (駆動トルク/スプロケットピッチ円半径) について、計算値と実験値の比較をしたものである。図 21 のように、車両が発進してから直進した部分においては、転がり抵抗に打ち勝つために、左右履帯にはほぼ等しい大きさのけん引力が作用している。また、旋回中には転がり抵抗によって、旋回の内側履帯の制動力は小さくて済み、逆に外側履帯では大きな駆動力が必要になることがわかる。なお、数値解析結果に振動が見られるが、これはメッシュ分割された地盤と転輪の相対位置を判定して垂直力 Q_3 を求めているため、転

輪が路面と接触していない場合に Q_3 が零になることが原因と考えられる。今後、各転輪に懸架ばねの自由度を付加することによって常に地盤に接触し、振動を抑制することができるものと推察できる。

5. 起伏した地盤における三次元運動解析

本研究の適用例として、起伏をもつ軟らかい地盤における装軌車の直進運動について数値解析を行った。図 22 は、長さ 1 m、高さ 5.0 cm の 1/2 周期の正弦波状のゆるい砂地盤の起伏を設定し、装軌車が通過するときの運動を解析した結果である。図 22 のように起伏に乗り上げるときに大きな沈下が発生する現象などが、数値解析によってはじめて三次元的に把握することができるようになった。

6. 結 言

本研究では、起伏のある軟らかい地盤を走行する装軌車の三次元理論モデルを確立するために、履帯と地盤の相互作用を実験的に明らかにするとともに、砂地盤上における模型車両を用いた走行実験を行った結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) 履帯の沈下は、弾性・塑性沈下量と、滑りによって発生する滑り沈下量、転輪と地盤の動的相互作用によるかくはん沈下量に分類できる。
- (2) 履帯の滑りとせん断力の関係は垂直力の関数となり、滑り方向に依存した異方性がある。また、塑性変形中の流れ則は関連流れ則に従う。
- (3) 履帯の滑り沈下量は、垂直力に比例し、滑り方向に依存した異方性がある。
- (4) 懸架方式が異なる装軌車の運動特性を解析するためには、履帯の接地圧分布と、せん断力の異方性を厳密に考慮する必要がある。
- (5) 一様な接地圧分布を有する装軌車は、沈下が小さく優れた旋回性能を示す。

文 献

- (1) Bekker, M. G., *Theory of Land Locomotion*, (1956), 339, The University of Michigan Press.
- (2) 木暮敬二, トラフィカビリティについて, 土木技術, **26**-10(1973), 24-32.
- (3) 北野昌則・ほか 1 名, 装軌車両の旋回性能に関する研究, 自動車技術会論文集, **9**(1975), 51-57.
- (4) 北野昌則・ほか 1 名, 装軌車両の過渡運動に関する研究, 自動車技術会論文集, **13**(1977), 63-69.
- (5) 城崎博美・ほか 1 名, 装軌車の軟弱地における旋回性能について (第 1 報), 農業機械学会誌, **40**-4(1977), 509-515.
- (6) 城崎博美・ほか 1 名, 装軌車の軟弱地における旋回性能について (第 2 報), 農業機械学会誌, **41**-3(1977), 391-

- 396.
- (7) Lehterwood, M. D., ほか 4 名, Computer-Based Analysis and Comparison of The US and Russian Heavy Equipment Transport Systems, International Society for Terrain-Vehicle Systems, *11th Int. Conf.*, 2(1993), 500-513.
 - (8) Murakami, H., ほか 3 名, A Mathematical Model for Spatial Motion of Tracked Vehicles on Soft Ground, *J. Terramech.*, **29**-1(1992), 71-81.
 - (9) Watanabe, K., ほか 4 名, Experimental Characterization of Dynamics Soil-Track Interaction on Dry Sand, *J. Terramech.*, **30**-2(1993), 111-131.
 - (10) Janosi, Z. and Hanamoto, B., The Analytical Determination of Drawbar Pull as A Function of Slip for Tracked Vehicles in Deformable Soils, International Society for Terrain-Vehicle Systems, *1st Int. Conf.*, (1961), 707-736.
 - (11) 足立紀尚・龍岡文夫, 新体系土木工学, 第 18 巻土の力学 (III)-圧密・せん断・動的解析-, (1981), 3, 技報堂出版.
-