

走行中のトラクタ横転倒に関する研究

旋回横転倒に関する考察

誌名	農業食料工学会誌 = Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery and Food Engineers
ISSN	2188224X
著者名	青柳,悠也 松井,正実 福島,崇志
発行元	農業食料工学会
巻/号	82巻1号
巻号補足	
掲載ページ	p. 39-46
発行年月	2020年1月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター

Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council
Secretariat



走行中のトラクタ横転倒に関する研究

—— 旋回横転倒に関する考察 ——

青柳悠也^{*1}・松井正実^{*2†}・福島崇志^{*3}

要 旨

トラクタは傾斜地での旋回時に転倒の危険性が高く、遠心力の転倒への影響を把握することは、農作業安全の観点から重要である。本研究では、トラクタの遠心力を考慮した上下・ピッチング・ローリング・前後方向の4自由度の運動方程式を立案した。また、機体にかかる遠心力を模型実験により確認するとともに、剛性路面上での旋回時のトラクタ挙動解析を行った。その結果、実験により走行速度4.0m/s以下の範囲において遠心力の理論値と実測値が良い一致を示した。また、向心加速度4.0m/s²程度において緩傾斜地で転倒に至ることが示され、転倒防止のためには傾斜地での旋回時は走行速度をできるだけ低くする必要性が示された。

[キーワード] トラクタ, シミュレーション, 旋回走行, 横転倒, 傾斜地

Study on Lateral Rollover of Traveling Tractor

—— Consideration of Lateral Rollover in Tractor Cornering ——

Yuya AOYAGI^{*1}, Masami MATSUI^{*2†}, Takashi FUKUSHIMA^{*3}

Abstract

Tractors face the risk of lateral rollover while cornering on slopes. Coping the situation is important for safety. In this study, dynamic equations were formulated for four degrees of freedom (vertical, pitching, rolling, and horizontal), while considering the centrifugal force. The centrifugal force affecting the tractor body was verified through a modeling experiment. Furthermore, tractor cornering behavior on a smooth slope was simulated. Consequently, the theoretical values and the measured values of the centrifugal force matched less than 4.0m/s. Additionally, the cornering tractor overturned on a gentle slope (3°-8°) at approximately 4.0m/s² centripetal acceleration. Aforementioned results indicate that to prevent overturning, even on a gentle slope, it is necessary to minimize the traveling speed.

[Keywords] tractor, simulation, cornering, lateral rollover, slope

I 緒 言

トラクタの普及発達により農業における生産性向上や軽労化が進み、労働環境の改善が成されている。一方で日本国内における農作業死亡事故件数は年間約350件(2008~2017年の平均値)にも上り、高水準のまま推移

している(農林水産省, 2019)。農作業死亡事故のうち乗用トラクタの死亡事故が、毎年100件程度(2008~2017年の平均値)発生しており、転倒・転落によるものが最も多い割合を占めている。トラクタ転倒事故の約70%が横転倒によるものという報告があり(上出, 1976)、同様に旋回時の横転倒事故の報告もある(日本農村医学

*1 会員, 東京農工大学大学院連合農学研究科(宇都宮大)・日本学術振興会特別研究員DC(〒321-8505 栃木県宇都宮市峰350), Faculty of Agriculture, Tokyo University of Agriculture and Technology (Utsunomiya University), 350, Mine, Utsunomiya-shi, Tochigi 321-8505, Japan

*2 会員, 宇都宮大学農学研究科(〒321-8505 栃木県宇都宮市峰350), Faculty of Agriculture, Utsunomiya University, 350, Mine, Utsunomiya-shi, Tochigi 321-8505, Japan

*3 会員, 三重大学生物資源学研究科(〒514-8507 三重県津市栗真町屋町1577), Faculty of Bio-resources, Mie University, 1577, Kurimamachiya-cho, Tsu-shi, Mie 514-8507, Japan

† Corresponding author: m-matsui@cc.utsunomiya-u.ac.jp

会, 2013)。事故の発生要因は, 機械諸元・特性等の機械的要因, 走行路面の傾斜・粗度や天候等の環境的要因, オペレータによる操作や管理体系等の人的要因が挙げられる(青柳ら, 2019)。したがって, 傾斜等の地形情報を考慮したトラクタ挙動について力学的な検証を行うことは農作業安全の観点から有益である。

トラクタは重心が高いことや, 作業性確保のため最小旋回半径が機体の軸距に対して小さいという機械特性を有することに加え, 農道や畑地ほ場等の傾斜不整地という環境条件の中で, ほ場入退出時には急操舵, ほ場作業時にはけい畔付近で急旋回するため, 旋回時に転倒の危険性が高い。旋回時のトラクタ横転倒は, 地形の傾斜に加え遠心力が作用して発生する。横転倒防止のためには, 遠心力を考慮して, 許容可能な地形傾斜角および走行速度を明らかにすることが重要である。これら各条件について把握することができれば, 安全な作業方法や環境整備の適正化についての基礎的な資料になると考えられる。

傾斜地を横断するトラクタの障害物乗り越え時の横転倒に関する研究として, 竹内ら(1971)は, 動横転倒角をタイヤの弾性・障害物の高さ・走行速度・静止横転倒角・機体寸法を用いた式として表現した。Zhenら(2015)は上下・ピッチング・ローリング・左右の4自由度モデルにより, 横転倒と横滑りへの走行速度・傾斜角度・摩擦係数の影響を明らかにした。また, トラクタの旋回挙動に関する研究として, 梅田ら(1975)は, 旋回時のトラクタの力学特性について検討し, 走行速度・旋回半径・横滑り角・コーナリングフォースの関係について明らかにした。笈田ら(1989)は4WD-4WSトラクタを対象とし前後・左右・ヨーイングの3自由度のシミュレーションを実施して, タイヤの横滑り角と操舵角・走行速度・摩擦係数・重心位置の影響について明らかにした。このように傾斜地での直進走行時のトラクタ横転倒や平地での旋回時のトラクタ挙動について様々な検討がなされている。しかしながら, 傾斜地での旋回時のトラクタ横転倒について上下・ピッチング・ローリング・前後の動的な検証を行っているものは少ない。

本研究では機体にかかる遠心力を模型実験により確認するとともに, 遠心力の影響を考慮した旋回時のトラクタにおける上下・ピッチング・ローリング・前後方向の運動方程式を立案した。さらに, 傾斜角度および走行速度を変化させ, 剛性傾斜路面での旋回走行シミュレーションを実施した。この結果から旋回可能な向心加速度(走行速度)および地形傾斜角度について考察を行った。

II 運動方程式および機体にかかる遠心力測定実験

1. 運動方程式

前輪にスイング機構を有した四輪トラクタを対象モデルとし, 遠心力を考慮した上下(z)・ピッチング(φ)・ローリング(θ)・前後(x)方向の4自由度の運動方程式

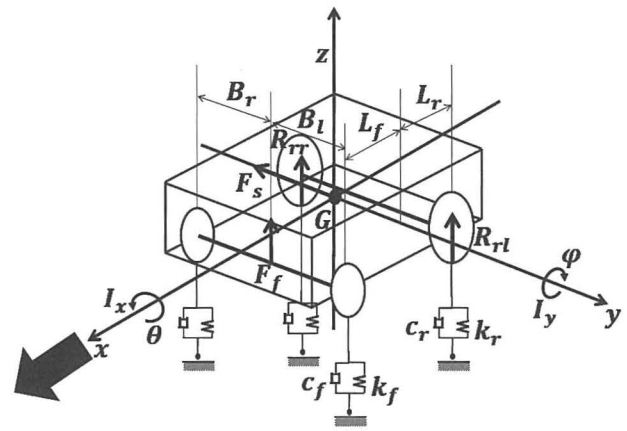


図1 トラクタ挙動モデル

Fig. 1 Behavioral model of tractor

を立案した。本研究では横滑りを排してローリングに最大限の影響を与えるため, ヨーイングおよび左右方向の自由度は無視した。前輪にスイング機構を有した四輪トラクタの挙動モデルを図1に, トラクタ挙動モデルの側面視および背面視を図2に示す。トラクタ挙動モデルは, 前輪車軸に実機同様のスイング機構を導入し, スイング範囲内では前輪車軸ピボットと後輪での3点支持とし, スイング限界角以上では各車輪での4点支持とした(松井ら, 2017)。旋回時の走行速度一定の条件での機体重心の上下・ピッチングおよび前後進に関する運動方程式を式(1)~(3)に示す。4点支持および3点支持における旋回時の遠心力を考慮した右側車輪接地点周りのローリングの運動方程式を式(4)~(5)に, 前輪車軸ピボットおよび各車輪の反力, 機体にかかる遠心力を式(6)~(8)に示す。本研究では, 旋回時に旋回中心から外側方向に向かって, 旋回軸と垂直な機体重心にかかる力を遠心力とした。平行軸の定理により算出した右側車輪接地点周りのローリングの慣性モーメントを式(9)に示す。本モデルでは, 前後輪の輪距は等しいものとしており, 右側車輪接地点周りのローリングが生じる左旋回挙動を表現している。

$$\begin{aligned} M\ddot{z} = & Mg - (F_f + R_{rr} + R_{rl}) \cos \varphi \cos \theta - D \sin \varphi \\ & + \gamma(R_{fr} + R_{fl} + R_{rr} + R_{rl}) \sin \varphi \cos \theta + F_s \sin \theta_g \cos \varphi_b \end{aligned} \quad (1)$$

$$I_y \ddot{\varphi} = (F_f L_f - (R_{rr} + R_{rl}) L_r) - \gamma(R_{fr} + R_{fl} + R_{rr} + R_{rl}) L_g \quad (2)$$

$$\begin{aligned} M\ddot{x} = & D \cos \varphi - (F_f + R_{rr} + R_{rl}) \cos \theta \sin \varphi \\ & - \gamma(R_{fr} + R_{fl} + R_{rr} + R_{rl}) \cos \theta \cos \varphi \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} I_{xw} \ddot{\theta} = & (R_{fl} + R_{rl})(B_r + B_l) - Mg \cos \theta \cos \varphi B_r \\ & + F_s \cos \theta_b \cos \varphi_b L_g \end{aligned} \quad (4)$$

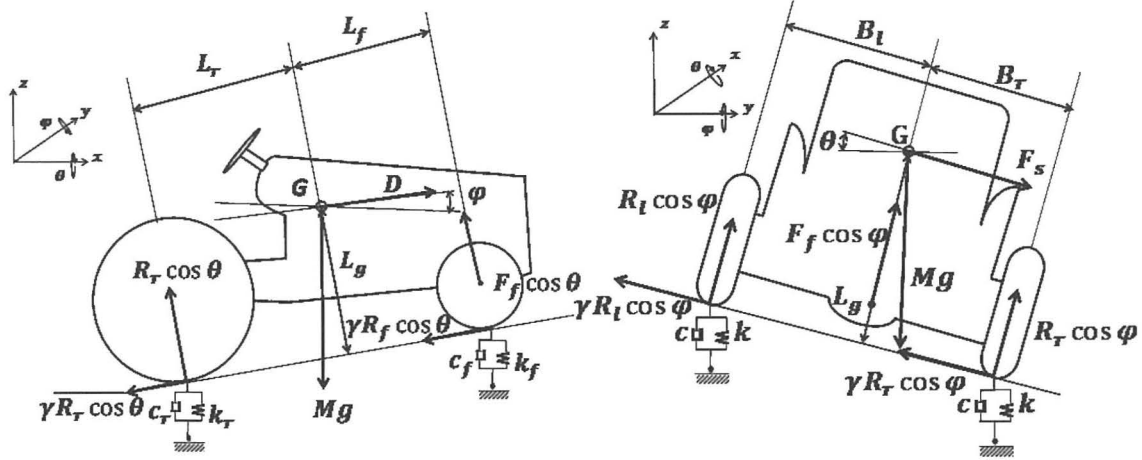


図 2 トラクタ挙動モデル (側面視, 背面視)

Fig. 2 Behavioral model of tractor (side view, rear view)

$$I_{xw}\ddot{\theta} = R_{rl}(B_r + B_l) + F_f B_r - Mg \cos \theta \cos \phi B_r + F_s \cos \theta_b \cos \phi_b L_g \quad (5)$$

$$F_f = R_{fr} + R_{fl} \quad (6)$$

$$R_{ij} = (\dot{z} + L_i \dot{\phi} + B_j \dot{\theta}) k_i + (\ddot{z} + L_i \ddot{\phi} + B_j \ddot{\theta}) c_i \quad (7)$$

$$F_s = \frac{Mv^2}{r} \quad (8)$$

$$I_{xw} = I_x + M(B_r^2 + L_g^2) \quad (9)$$

式(7)に示す反力 R が 0 以下の場合は車輪が路面から離脱しているとして、 $R \leq 0$ となった場合は $R=0$ を入力することとした。これらの運動方程式を基に Matlab/simulink を使用したオリジナルプログラムを開発した。プログラムでは前後左右の車輪が路面から受ける反力を算出し、上下・ピッチング・ローリングの各加速度について、4 次のルンゲクッタ法による数値計算を行った。

供試機は 22.1kW (30PS) のトラクタとし、各モデルパラメータ (動ばね定数・粘性減衰係数・慣性モーメント) は従前の研究 (青柳ら, 2016) と同様の値を用いることとした。供試機諸元およびモデルパラメータを表 1 に示す。

2. 旋回時遠心力測定実験

旋回時にトラクタに作用する遠心力の影響を確認するため、4 輪車両模型を用いた旋回時の反力測定実験を行った。模型は 4 輪操舵とし、質量とホイールベースおよびトレッドを基準に相似則に基づき実機の 10 分の 1 で設計した。模型の横転倒角は、重心高さにより調整し、安全鑑定基準 (農業・食品産業技術総合研究機構生物系特定産業技術研究支援センター農業機械化研究所, 2015) に基づいて左右 30° とした。図 3 に 4 輪車両模型の写真を示す。各車輪の舵角は、各車輪の理論的旋回半径に基

表 1 機体諸元およびモデルパラメータ

Table 1 Machine specifications and model parameters

項目	数値
機体質量 [kg]	1010
全長 [m]	2.98
全幅 [m]	1.32
全高 [m]	1.93
軸距 [m]	1.5
輪距 [m]	1.05
機体重心から地面までの垂直距離 [m]	0.91
前輪動ばね定数 [N/m]	60000
前輪粘性減衰係数 [N・s/m]	200
後輪動ばね定数 [N/m]	160000
後輪粘性減衰係数 [N・s/m]	4400
ピッチング慣性モーメント [kg・m ²]	600
ローリング慣性モーメント [kg・m ²]	260

づいた角度に分度器を用いて目視により確認しながら設定した。図 4 に模型実験における各車輪の操舵角の設定状況の概略図を示す。実機トラクタおよび模型諸元を表 2 に示す。模型トラクタの重心位置は後軸から軸距の 51 %、左車輪から輪距の 49 % の位置となった。

実験では、剛性水平路面上を速度および旋回半径一定の条件で旋回する模型の各車輪反力を測定した。旋回半径 (旋回中心から模型重心までの距離) は、0.39 m, 0.47 m, 0.58 m の 3 通りで、速度は 0.15 ~ 1.00 m/s (実機換算 1.5 ~ 10.0 m/s) の範囲で 5 段階に変化させた。各速度および旋回半径の組み合わせで各 2 回ずつ (計 30 回) 測定を実施した。反力の測定では、模型の各車輪支持アーム上下にひずみゲージ (KYOWA 製) を貼付し、出力をアンプ (KYOWA 製 DPM-6H) で増幅してデータロガー (TEAC 製 ES8) に 100 Hz で記録した。剛性水平路面上を速度および旋回半径一定で旋回するトラクタの各車輪反力を式 (10) ~ (13) に示す。

$$R_{fl} = \frac{L_r}{L_f + L_r} \left(\frac{MgB_r}{B_r + B_l} - \frac{F_s L_g}{B_r + B_l} \right) \quad (10)$$

$$R_{fr} = \frac{L_r}{L_f + L_r} \left(\frac{MgB_l}{B_r + B_l} + \frac{F_s L_g}{B_r + B_l} \right) \quad (11)$$

$$R_{rl} = \frac{L_f}{L_f + L_r} \left(\frac{MgB_r}{B_r + B_l} - \frac{F_s L_g}{B_r + B_l} \right) \quad (12)$$

$$R_{rr} = \frac{L_f}{L_f + L_r} \left(\frac{MgB_l}{B_r + B_l} + \frac{F_s L_g}{B_r + B_l} \right) \quad (13)$$

本研究では、力学的旋回中心から各車輪までの距離を

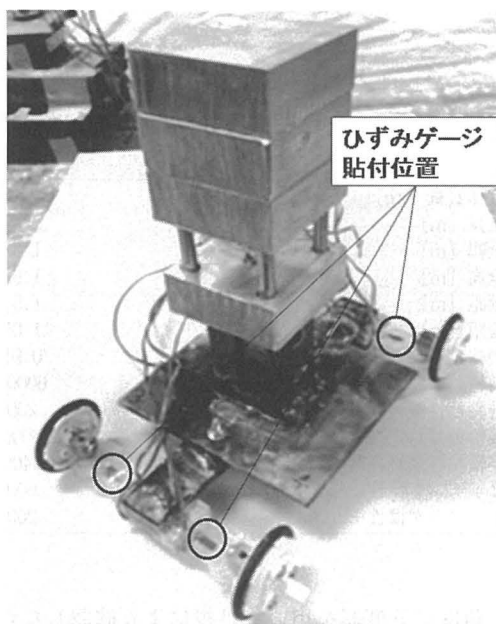


図 3 4 輪車両模型

Fig. 3 Model of 4 wheel vehicle

旋回半径と定義し、模型の重心位置を考慮して上記の式から反力の理論値を算出し、実測値との比較を行った。

図 5 および図 6 に旋回半径 0.39 m における各車輪反力の理論値および実測値を示す。図 5 および図 6 では、静的 (速度 0.0 m/s) な各車輪反力が、それぞれ重心位置に応じて異なる値となっている。図 5 および図 6 から、実測値は理論値と同様に速度に応じて 2 次曲線的に変化していることがわかる。また、0.4 m/s (実機換算 4.0 m/s) よりも低速の範囲において、4 輪とも理論値と実測値がよく一致していることがわかる。一方、0.4 m/s (実機換算 4.0 m/s) よりも高速の範囲において、外側後輪と内側前輪では、実測値と理論値がよい一致を示したが、外側前輪と内側後輪では実測値と理論値に誤差が生じた。これらは、舵角のズレによるものであり、外側前輪では理論的な舵角よりもトーインになったため車輪接地点から内側方向に発生する力により、支持アーム上面に引張りずみが生じて値が小さくなった。一方、内側後輪では理論的な舵角よりもトーアウトになったため車輪接地点から外側方向に発生する力により、支持アーム上面に圧縮ひずみが生じて値が大きくなった。図 7 に各車輪反力から算出した機体にかかる遠心力の実測値とその平均値および遠心力の理論値を示す。図 7 から、実測値と理論値どちらも、速度が上がるにしたがって遠心力が 2 次曲線的に増加しており、傾向が似ていることがわかる。特に、0.4 m/s (実機換算 4.0 m/s) よりも低速の範囲においては、比較的良い一致を示している。したがって、

表 2 実機および模型諸元

Table 2 Machine and model specifications

項目	実機諸元 (カタログ値)	模型諸元
機体質量 [kg]	1010	1.034
軸距 [m]	1.5	0.15
輪距 [m]	1.05	0.105
横転倒角 [°]	30 以上 (安全鑑定基準)	30

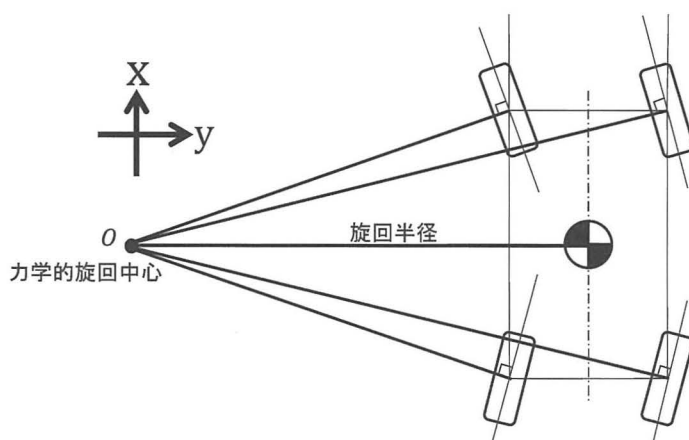


図 4 模型実験における各車輪の操舵角の設定状況 (概略図)

Fig. 4 Setting condition of steering angle at each wheel in model experiment (schematic drawings)

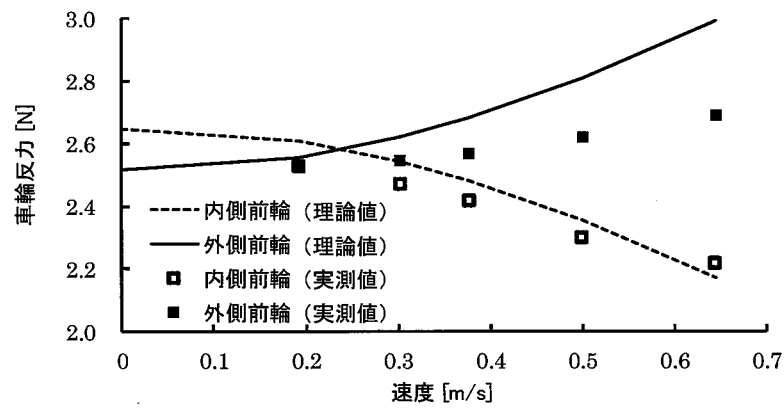


図 5 前輪反力の理論値および実測値

Fig. 5 Theoretical reaction force and measuring reaction force in front wheels

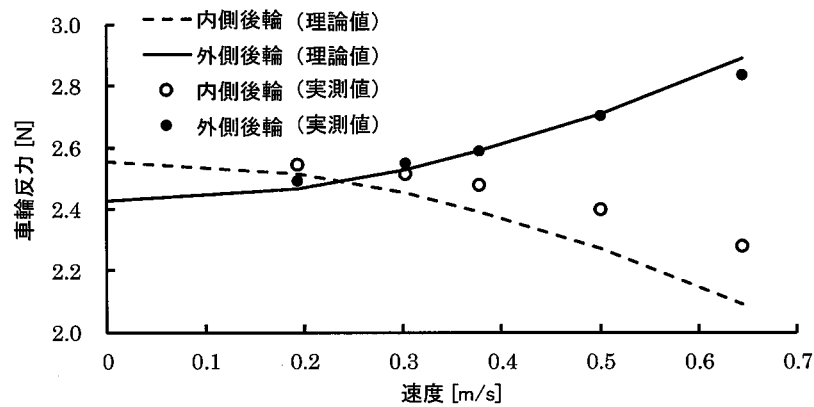


図 6 後輪反力の理論値および実測値

Fig. 6 Theoretical reaction force and measuring reaction force in rear wheels

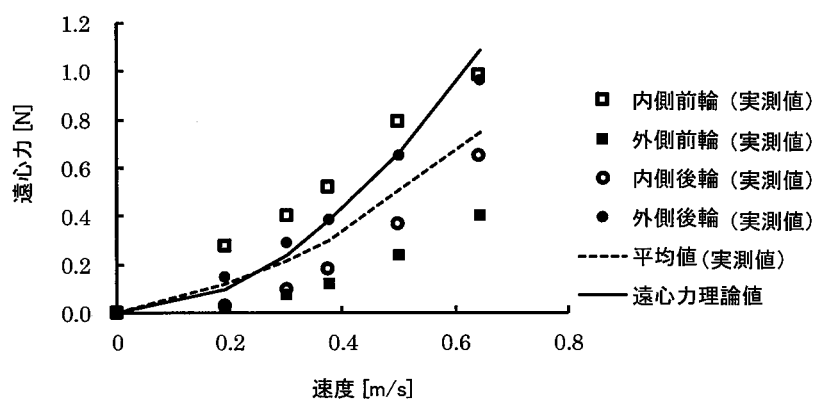


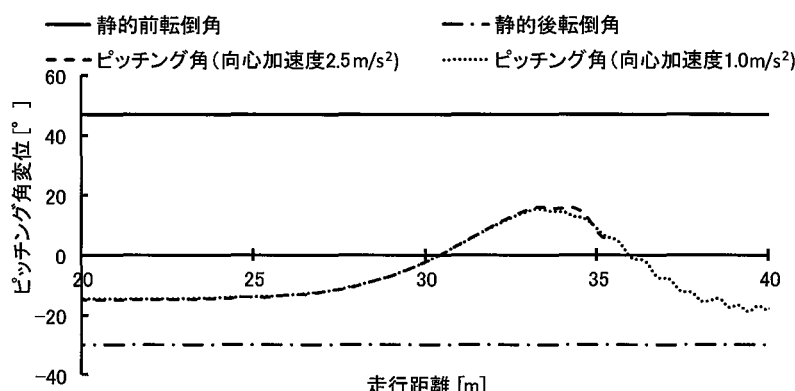
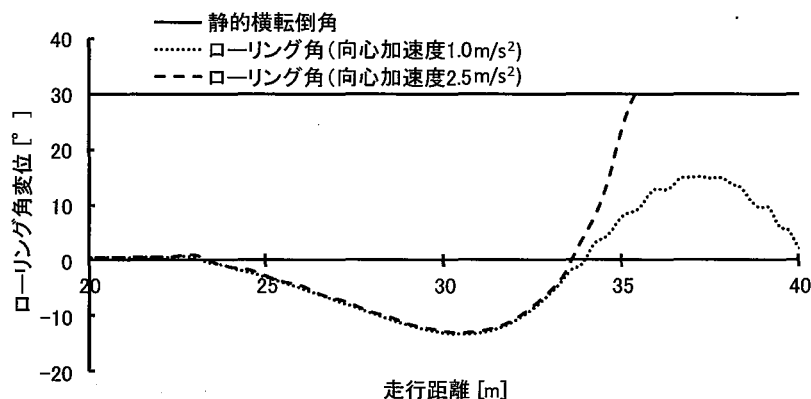
図 7 機体にかかる遠心力の理論値および実測値

Fig. 7 Theoretical centrifugal force and measuring centrifugal force

速度 4.0m/s 以下の範囲において遠心力の理論値をシミュレーションに適用することとした。

III 旋回中のトラクタにおける 遠心力の転倒への影響

実機トラクタを想定して、傾斜地での旋回シミュレーションを行った。トラクタ前輪車軸のスイング限界角は

図 8 向心加速度 1.0 m/s^2 および 2.5 m/s^2 のピッチング角変位 (傾斜 14.0°)Fig. 8 Displacement of pitch angle in case of centripetal acceleration 1.0 m/s^2 and 2.5 m/s^2 (slope angle 14.0°)図 9 向心加速度 1.0 m/s^2 および 2.5 m/s^2 のローリング角変位 (傾斜 14.0°)Fig. 9 Displacement of roll angle in case of centripetal acceleration 1.0 m/s^2 and 2.5 m/s^2 (slope angle 14.0°)

$-10\sim 10^\circ$ と設定し、重心位置は作業機の装着を想定して後軸から軸距の 35% の位置とした。地形は傾斜 $0\sim 15^\circ$ (0.5° 刻み) の剛性傾斜路面とし、路面上を「登坂」→「左傾」→「降坂」→「右傾」の順になるよう左旋回 (1 周) させた。旋回半径は、急操舵による姿勢変化への影響を考慮して、半周旋回する間 (「登坂」→「左傾」→「降坂」) で直進から徐々に小さくし、最終的な旋回半径はトラクタの最小旋回半径を想定して 2 m とした。速度の 2 乗を旋回半径で除したもの ($\frac{v^2}{r}$) を向心加速度とし、実機を想定して向心加速度を $0.5\sim 8.0\text{ m/s}^2$ (0.05 m/s^2 刻み) でそれぞれ一定として、走行速度は向心加速度に応じた値 ($1.0\sim 4.0\text{ m/s}$) とした。本研究では、移動時を取り扱うため、エンジントルクが十分で走行抵抗を無視できるため、走行抵抗係数 γ の項を無視した。

図 8 および図 9 に斜面傾斜角度 14.0° における向心加速度 1.0 m/s^2 (走行速度約 1.4 m/s) および 2.5 m/s^2 (走行速度約 2.2 m/s) のローリング角変位およびピッチング角変位を示す。図 8 および図 9 では走行距離 22.7 m から左旋回を開始している。図 8 および図 9 からピッチング角変位とローリング角変位が $\frac{1}{4}$ 周期ずれて発生し

ており、斜面を旋回していることがわかる。また、向心加速度 1.0 m/s^2 において、ローリング角変位およびピッチング角変位は、何れも転倒角に達することなく地形を走行していることがわかる。一方、向心加速度 2.5 m/s^2 では、走行距離 35 m 付近でローリング角変位が転倒角に達し、横転倒していることがわかる。

図 10 に各傾斜角度における、向心加速度ごとの最大ローリング角を示す。図 10 から、向心加速度 1.0 m/s^2 では、最大ローリング角は地形傾斜角度に応じた値となっており、向心加速度 $2.5, 3.0, 3.5\text{ m/s}^2$ ではそれぞれ地形傾斜角度 $11.5, 8.5, 3.0^\circ$ で遠心力の影響により最大ローリング角が上昇し、 $13.5, 11.5, 8.5^\circ$ で静的横転倒角に達している。また、最大ローリング角の上昇は、右傾時に遠心力と地形傾斜によって反力の偏りが大きくなり、内側後輪反力の損失 (内側後輪浮き上がり) 時に発生している。さらに、向心加速度 4.0 m/s^2 では傾斜角度 0.0° において遠心力の影響により最大ローリング角が 12° 程度となっており、傾斜角度が大きくなるにつれて最大ローリング角も大きくなり、傾斜角度 6.0° で静的横転倒角に達している。これらのことから、向心加速度 (走

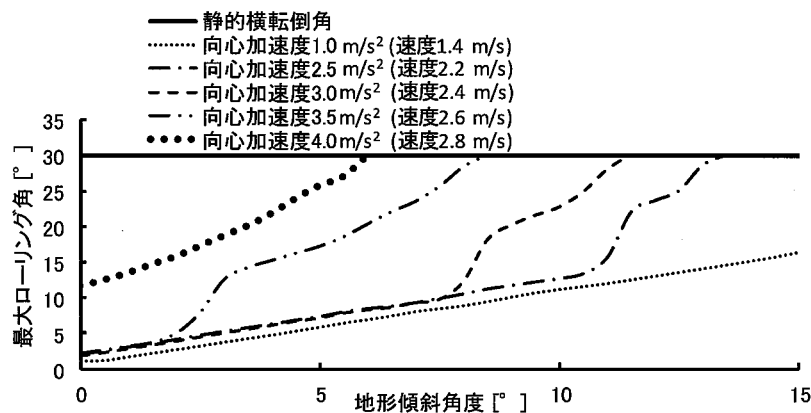


図 10 各地形傾斜角度における最大ローリング角 (向心加速度 1.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0 m/s²)
 Fig. 10 Maximum roll angle in respective slope angle (centripetal acceleration 1.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0 m/s²)

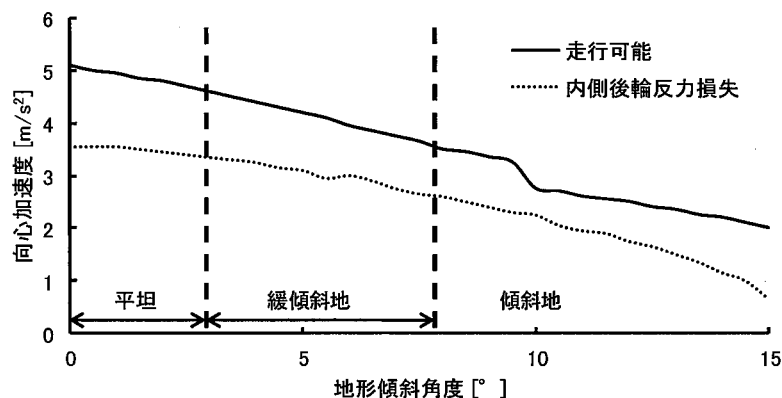


図 11 各地形傾斜角度における反力損失および走行可能向心加速度
 Fig. 11 Centripetal acceleration that loses reaction force and non-turnover centripetal acceleration in respective slope angle

行速度)が大きくなるにつれて、低い傾斜角度で転倒に至るとともに、向心加速度 4.0 m/s² 程度では遠心力の最大ローリング角への影響が大きくなっていることがわかる。

図 11 に各傾斜角度における内側後輪が反力を失う向心加速度および走行可能な向心加速度とは場整備基準における普通畑の傾斜区分 (農林水産省, 2006) を示す。図 11 から、傾斜角度が大きくなるにしたがって、内側後輪が反力を失う向心加速度および走行可能な向心加速度が小さくなっている。傾斜角度 10° 付近の向心加速度 (走行可能) の下降は、傾斜角度 9.5° 未満で最大右傾時に右転倒するのに対して、傾斜角度 10.0° 以上では、最大右傾時に機体がバランスを崩すものの転倒せず、その後に地形傾斜角度の影響により、右後輪のみが接地した状態で右後方に転倒するためである。向心加速度 4.0 m/s² (走行速度 2.8 m/s) 程度において緩傾斜 (3°~8°) でも転倒に至っており、傾斜角度 3° 以上 (緩傾斜以上) の傾斜地において、走行限界よりも平均で 1.0 m/s² 程度小さい向心加速度で転倒に至らずとも内側後輪の反力が失われて (内側後輪の浮き上がり) いる。また、向心加

速度 0.5 m/s² (走行速度 1.0 m/s) では、15° 以下の傾斜地において旋回時に転倒することではなく、内側後輪の反力が失われる (浮き上がる) こともなかった。

以上のことから、本供試条件において向心加速度 (走行速度) が上がるにしたがって低い傾斜角度で転倒角に達し、走行限界よりも平均で 1.0 m/s² 程度小さい向心加速度で転倒に至らずとも内側後輪の反力が失われることが示された。また、転倒防止と安全走行のためには緩傾斜であっても走行速度をできるだけ低く (最小旋回半径を考慮し、1.0 m/s 以下) する必要性が示された。

IV 結 言

トラクタは傾斜地での旋回時に転倒の危険性が高く、遠心力の転倒への影響を把握することは、農作業安全の観点から重要である。

本研究では機体にかかる遠心力を模型実験により確認するとともに、遠心力の影響を考慮した旋回時のトラクタにおける上下・ピッチング・ローリング・前後方向の 4 自由度の運動方程式を立案した。さらに、傾斜角度および走行速度を変化させ、剛性傾斜路面での旋回走行シ

ミュレーションを実施した。この結果から旋回可能な向心加速度（走行速度）および地形傾斜角度について考察を行った。

その結果、模型実験により速度 4.0 m/s 以下の範囲において遠心力の理論値と実測値が良い一致を示した。また、シミュレーション結果から、本供試条件において向心加速度が大きくなるにしたがって、走行可能な傾斜角度が低くなり、向心加速度 4.0 m/s^2 （走行速度 2.8 m/s）程度において緩傾斜（ $3^\circ \sim 8^\circ$ ）でも転倒し、傾斜角度 3° 以上（緩傾斜以上）の傾斜地において、走行限界よりも平均で 1.0 m/s^2 程度小さい向心加速度で転倒に至らずとも内側後輪の反力が失われる（内側後輪の浮き上がり）ことが示された。また、向心加速度 0.5 m/s^2 （走行速度 1.0 m/s）では、 15° 以下の傾斜地において旋回時に、転倒および内側後輪反力の損失（浮き上がり）がないことが示された。このことから、転倒防止と安全走行のためには傾斜地での旋回時は走行速度をできるだけ低く（最小旋回半径を考慮し、1.0 m/s 以下）する必要性が示された。

References

- 青柳悠也, 松井正実, 森尾大貴, 田村孝浩, 内川義行, 木村智之, 2016. 事故現場の地形に基づくトラクタの挙動に関する研究. 農業食料工学会誌, 78 (6), 529-535.
- 青柳悠也, 松井正実, 武田純一, 棚橋拓也, 三浦 泰, 福島崇史, 2019. 乗用トラクタの事故調査結果を用いた事故要因分析とリスク評価手法の検討. 農業食料工学会誌, 81 (2), 93-103.
- 上出順一, 1976. 傾斜地におけるトラクタの安定性. 農業機械学会誌, 37 (4), 648-651.
- 松井正実, 青柳悠也, 森尾大貴, 田村孝浩, 内川義行, 木村智之, 2017. 事故現場の地形に基づくトラクタの挙動に関する研究. 農業食料工学会誌, 79 (1), 59-65.
- 日本農村医学会, 2013. 平成 24 年度農水省補助事業こうして起こった農作業事故 II. http://www.maff.go.jp/j/seisan/sien/sizai/s_kikaika/anzen/pdf/ao0221.pdf. Accessed Mar.14.2019.
- 農業・食品産業技術総合研究機構生物系特定産業技術研究支援センター農業機械化研究所, 2015. 平成 27 年度安全装備の確認項目と安全鑑定基準及び解説. http://www.naro.affrc.go.jp/laboratory/brain/iam/files/27akijyun_1.pdf. Accessed Mar.14.2019.
- 農林水産省, 2006. 土地改良事業計画設計基準計画「ほ場整備(畑)」. http://www.maff.go.jp/j/council/seisaku/nousin/seibi/7/pdf/ref_data1.pdf. Accessed Mar.18.2019.
- 農林水産省, 2019. 平成 29 年に発生した農作業死亡事故の概要. <http://www.maff.go.jp/j/press/seisan/sizai/attach/pdf/190128-1.pdf>. Accessed Mar.14.2019.
- 笈田 昭, 伊藤博通, 1989. 4WD-4WS トラクタの旋回特性に関する研究 (第 1 報). 農業機械学会誌, 51 (6), 45-53.
- 竹内 学, 川崎 健, 藤岡澄行, 前岡邦彦, 松山龍男, 1971. 傾斜地における四輪トラクタの横転倒角 (第 2 報). 農業機械学会誌, 33 (3), 230-238.
- 梅田重夫, 穂波信雄, 1975. トラクタの操縦性能に関する研究 (第 1 報). 農業機械学会誌, 37 (2), 149-155.
- Zhen, L., Mitsuoka, M., Inoue, E., Okayasu, T., Hirai, Y., 2015. Development of stability indicators for dynamic Phase I overturn of conventional farm tractors with front axle pivot. biosystems engineering, 34 (I), 55-67.

記号

- G : 機体重心
- z : 機体重心の上下方向変位 [m]
- x : 機体重心の前後方向変位 [m]
- y : 機体重心の左右方向変位 [m]
- φ : 機体重心のピッチング角 [rad]
- θ : 機体重心のローリング角 [rad]
- L_g : 機体重心から路面までの垂直距離 [m]
- L_f : 機体重心から前輪までの距離 [m]
- L_r : 機体重心から後輪までの距離 [m]
- B_r : 機体重心から右車輪までの距離 [m]
- B_l : 機体重心から左車輪までの距離 [m]
- R_{fr} : 右前輪の反力 [N]
- R_{fl} : 左前輪の反力 [N]
- R_{rr} : 右後輪の反力 [N]
- R_{rl} : 左後輪の反力 [N]
- F_s : 機体重心にかかる遠心力 [N]
- γR : 各車輪における走行抵抗 [N]
- M : 機体質量 [kg]
- g : 重力加速度 [m/s^2]
- D : 機体全体の推力 [N]
- k : 動ばね定数 [N/m]
- c : 動粘性減衰係数 [$\text{N}\cdot\text{s/m}$]
- I_y : 重心周りのピッチング慣性モーメント [$\text{kg}\cdot\text{m}^2$]
- I_x : 重心周りのローリング慣性モーメント [$\text{kg}\cdot\text{m}^2$]
- I_{xw} : 右側車輪接地点周りのローリング慣性モーメント [$\text{kg}\cdot\text{m}^2$]
- θ_b : 旋回軸と直交する面を基準とした機体重心のローリング角 [rad]
- φ_b : 旋回軸と直交する面を基準とした機体重心のピッチング角 [rad]
- θ_g : 機体ローリング方向の地形傾斜角 [rad]
- r : 旋回半径 [m]
- v : 走行速度 [m/s]
- i : 任意の添え字 f または r (front または rear)
- j : 任意の添え字 l または r (left または right)
- (受付: 2019 年 6 月 3 日・受理: 2019 年 10 月 25 日・質問期限: 2020 年 3 月 31 日)