

農業用トラクタの直進走行時における ドライバ特性が操舵安定性に与える影響

日大生産工(院) ○鎌田 和希 日大生産工 風間 恵介
日大生産工 丸茂 喜高

1. 緒言

農作業では毎年 200 人以上の死亡者が確認されており、その数は少なくない。令和 5 年に発生した国内の農作業事故死亡者 236 人のうち¹⁾、農業機械作業に係る事故は 147 人と全体の約 6 割の割合を占めている。また、農業機械作業に係る事故の中でも、乗用型トラクタを用いた作業による死者数は 61 人と、農業機械全体の約 4 割を占めている。これは二番目に多い自脱型コンバインによる死者数 13 人と比較すると極めて多い。

農林水産省¹⁾の調査によると、農業機械作業に係る事故の原因として、機械の転落・転倒が最も大きな割合となった。その中でも乗用型トラクタの転落・転倒による死者数は全体の約 5 割を占める結果となった。トラクタの転落・転倒は様々な要因が複雑に関与しており、トラクタ自体に原因がある機械的要因や、地形の特性による環境的要因²⁾が挙げられる。また、ドライバの特性に依存する人的要因も事故の原因となり得る。青柳ら³⁾は死亡・重傷を伴うトラクタの事故において、ヒューマンエラーの危険度が最も高いとしている。しかし、死亡事故を人的要因の視点から解析することは行われていない。また、実機を用いた検証では危険性が伴うほか、多くの時間や費用を要する。シミュレーションを用いることで、前述した課題を担保できる。

従来の事故につながる要因分析では、車両モデルのみを対象としたものが多く、操縦者の視覚認知や操作遅れといった人的要因は十分に考慮されていない。農業用トラクタの走行ではドライバの視認性の低下や不整地路面の走行により、ドライバの判断、反応の遅れが転倒・逸脱事故を引き起こす一因となると考えられる。そこでシミュレーションを用いることで、人的要因に代表されるドライバの注視時間や操舵の遅れの影響を定量的に評価できるほか、

再現性のある形で検証を行うことができる。

本研究では、ドライバの目標コースに対して生じる前方注視点の横偏差に応じて操舵角を決定するモデルによる車両挙動への影響を明らかにすることを目的とする。シミュレーションではドライバのむだ時間と前方注視時間を変化させて、不整地路面上での車両挙動を評価する。

2. 車両モデルとドライバモデルの詳細

2.1. 車両モデル

シミュレーションで扱うトラクタのパラメータを表1に示す。シミュレーションには TruckSim Version2019.1を用いる。TruckSimは Mechanical Simulation⁴⁾社が開発したソフトウェアであり、マルチボディダイナミクス理論に基づき、車両挙動を再現することが可能である。本研究ではTruckSimに搭載されている標準車両モデルをベースに、車両寸法、質量、タイヤ特性を実際の農業用トラクタに合わせて再設定することで、トラクタ挙動の模擬モデルを構築した。TruckSimには農業用トラクタのプリセットモデルは存在しないため、本モデルはトラック車両を基盤としたカスタム構成である。車体の運動自由度は、並進3自由度および回転3自由度からなる6自由度モデルとした。

表1 トラクタのパラメータ

Sprung mass	700kg
Unsprung mass	288kg
Distance from front axle to center of gravity	0.75m
Height of center of gravity above ground	0.5m
Lateral position of center of gravity	0m
Yaw moment of inertia	700kgm ²
Wheelbase	2m
Tread width	1.3
Front cornering stiffness	330000 N/rad
Rear cornering stiffness	310000 N/rad

Effects of Driver Behavior on Steering Stability in the Straight-Line Driving of an
Agricultural Tractor

Kazuki KAMATA, Keisuke KAZAMA and MARUMO

2.2. ドライバの操縦モデル

本研究で扱うむだ時間 $\tau_l[s]$ と前方注視時間 $\tau_p[s]$ について以下に示す. むだ時間はステアリング操作を開始してから, 車両挙動に反応が現れるまでの時間的な遅れを指す. ドライバが車両の横偏差や進行方向のずれを認識してそれに基づいて操舵を行う過程を考えると操舵角 θ は, 操舵ゲイン K_s とむだ時間 τ_l により式(1)のように表すことができる. ここで τ_D は一次遅れ系の時定数, Y_{LP} は前方注視点における横偏差, Y' は目標コースの横偏差を示す (Fig.1).

$$\theta = -K_s(Y_{LP} - Y') \frac{1}{1 + \tau_D} e^{-\tau_l s} \quad (1)$$

むだ時間項 $e^{-\tau_l s}$ はドライバの認知・判断・操作の過程における遅れを表している. 前方注視時間は図1で示す前方注視距離 $L_p[m]$ を車速 $V[m/s]$ で割ったものである. このとき, $L_p[m]$ 進んだ先の点を前方注視点とする. ヨー角 φ が微小だとすると, 前方注視点における横変位は式(2)のように表すことができる.

$$Y_p = Y + L_p \varphi \quad (2)$$

ドライバは $L_p[m]$ 先を見て操舵を行う. 車両が姿勢を保持した状態で $L_p[m]$ 進んだとき, すなわち前方注視点における車両の横偏差 ε が生じる. 横偏差 ε を検知してフィードバック制御を行うときのブロック線図をFig.2に示す.

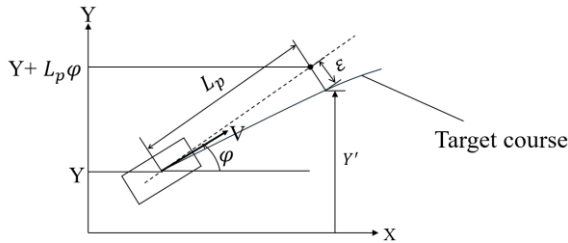


Fig.1 前方注視点における横偏差

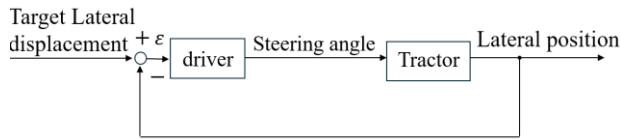


Fig.2 前方注視点における横偏差を舵角にフィードバックするときのブロック線図

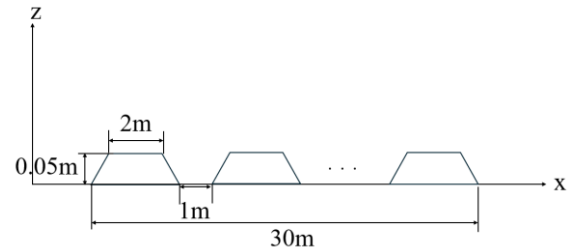
3. シミュレーション

3.1. シミュレーション条件

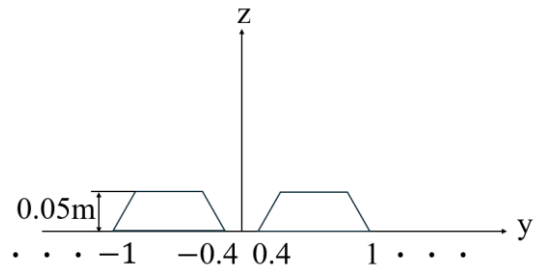
走行は整地路面と不整地路面の二つで行う. どちらも走行コースも道幅は6m (左右対称に3m) であり, 路面摩擦係数は0.8, タイヤの転がり抵抗係数は1とする.

不整地路面の概略図をFig.3(a),(b)に示す. (a)はx-z方向, (b)はy-z方向についての概略図である. ここで表すxは進行方向, yは横方向, zは鉛直方向とする. また, 不整地路面では進行方向に30mの連続する凹凸が存在する. 各凹凸の高さは0.05mでx方向に2m続き, 1m間隔でy方向に対して左右対称になっている. 車速は10km/hとし, むだ時間 $\tau_l[s]$ と前方注視時間 $\tau_p[s]$ をそれぞれ変化させる. 30秒間の走行における横変位, ヨー角, 操舵角を出力して結果を比較する.

むだ時間 $\tau_l[s]$ に着目した走行では, $\tau_l[s] = 0, 0.1, 0.2, 0.3s$ で設定する. そのとき, 前方注視時間は $\tau_p[s] = 0.6s$ の一定値とする. 前方注視時間 $\tau_p[s]$ に着目した走行においては $\tau_p[s] = 0.2s, 0.4s, 0.6s$ で設定し, むだ時間 $\tau_l[s]$ は $\tau_l[s] = 0s$ で一定とする.



(a) 不整地路面 (x-z)



(b) 不整地路面 (y-z)

Fig.3 不整地路面のコース概略図

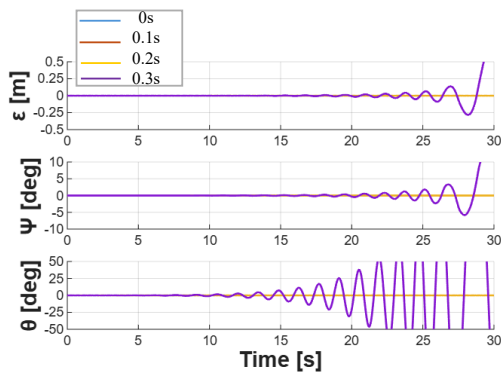
3.2. むだ時間 τ_l による影響

Fig.4の(a)に整地路面で $\tau_l[s]$ を変化させた場合の時系列応答を, Fig.4の(b)に不整地路面で $\tau_l[s]$ を変化させた場合の時系列応答を示す. ここで, 走行時間を $T[s]$ とする. $\tau_l[s] = 0 \sim 0.2s$ では, 両走行コースにおいても横変位, ヨー角, 操舵角ともに一定値に収束する結果となった. $\tau_l[s] = 0.3s$ のとき, 両走行コースにおいて, 横変位, ヨー角の振幅が増大し, 操舵角は発散する結果となった. 不整地路面では車速 $V=10km/h(\approx 2.78m/s)$ では, $T \approx 2s$ に凹凸に到達する. グラフでは $T=2s$ 付近で振幅が見られなか

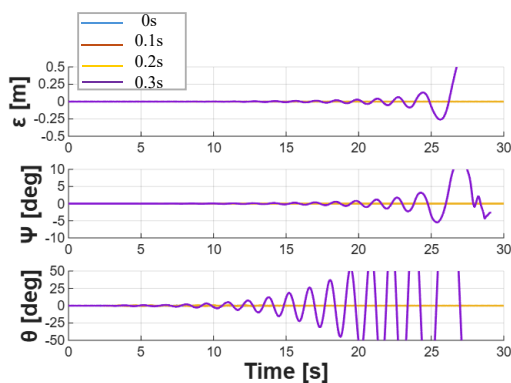
ったが、整地路面と比較したとき、特に操舵角では整地路面が $T=18s$ 付近で操舵角が $25deg$ となったのに対し、不整地路面では $T=16s$ 付近で操舵角が $25deg$ に達していることがわかる。

3.3 前方注視時間 τ_p による影響

Fig.5の(a)に整地路面で $\tau_p[s]$ を変化させた場合の時系列応答を、Fig.5の(b)に不整地路面で $\tau_l[s]$ を変化させた場合の時系列応答を示す。 $\tau_p[s] = 0.4, 0.6s$ では、両コースともに横変位、ヨー角、操舵角の応答は一定値に収束する結果となった。 $\tau_p[s] = 0.2s$ では横変位、ヨー角はともに $\tau_p[s] = 0.4, 0.6s$ 時と同じように収束していることが確認された。また、操舵角は両コースとも振幅が増大する結果となった。整地路面では $T=25s$ 前後で振幅が増大し、その後も大きくなっていることがわかる。不整地路面では $T=6s$ 付近から振幅が立ち上がり、その後振幅が増大した後、 $43deg \sim 43deg$ の範囲で周期的な振動を繰り返した。

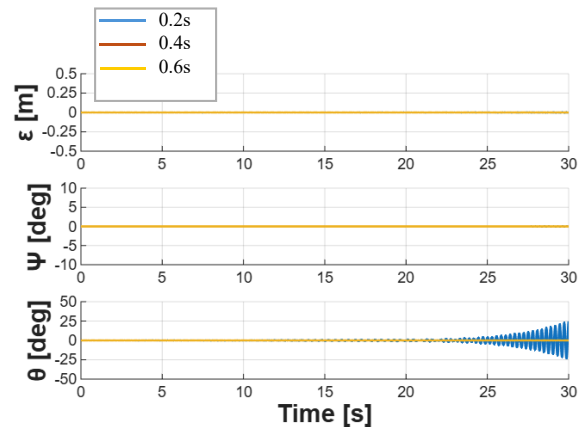


(a) 整地路面

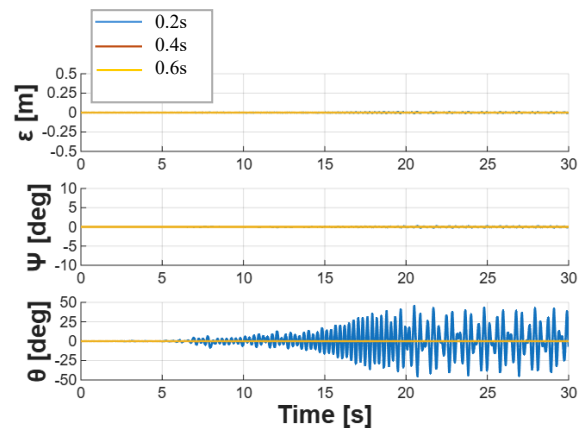


(b) 不整地路面

Fig.4 むだ時間を変化させた時の時系列応答



(a) 整地路面



(b) 不整地路面

Fig.5 前方注視時間を変化させた時の時系列応答

4. 結語

本研究ではドライバーの操舵特性による車両挙動への影響を明らかにすることを目的とした。ドライバーの操舵特性は、むだ時間と前方注視時間の二つに着目し、シミュレーションを用いて走行を行い、それぞれの状態量を評価した。むだ時間が大きくなるとトラクタは蛇行を初め、徐々に振幅が大きくなった。また、前方注視時間が小さくなると蛇行をすることが分かった。

今後は環境的要因による影響も考慮し、不整地路面での走行や、片輪走行時の操舵などシチュエーションを増やして比較、検討を行う。

参考文献

- 1) 農林水産省, 令和5年に発生した農作業死亡事故の概要, (2023), https://www.maff.go.jp/j/seisan/sien/sizai/s_kikaika/anzen/attach/pdf/sibo-11.pdf, (参照 2025-09-30)
- 2) 田村孝浩, 内川義行, 松井正実, 守山拓弥, 基盤構造に着目した農作業事故の発生要因に関する考察, 農業農村工学会誌, Vol. 84, No.8 (2016), pp. 3-6.
- 3) 青柳悠也, 松井正実, 武田純一, 棚橋拓也, 三浦泰, 福島崇志, 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, Vol. 81, No. 2 (2019) , pp. 93-103.
- 4) Mechanical Simulation, TruckSim, (2025), <https://www.carsim.com/products/trucksim/index.php>, (参照 2025-10-15)