

令和 2 年 5 月 31 日現在

機関番号：12201  
 研究種目：基盤研究(C)（一般）  
 研究期間：2017～2019  
 課題番号：17K08017  
 研究課題名（和文）農用車両転倒事故状況の把握と転倒防止のための車輪トルクコントロールシステムの開発

研究課題名（英文）Understanding the situation of agricultural vehicle falling accidents and developing wheel torque control for suppression of dynamic behavior

研究代表者  
 松井 正実（Matsui, Masami）  
 宇都宮大学・農学部・教授

研究者番号：10603425

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、転倒によるトラクタ死亡事故防止のため、事故調査と力学解析によって、1)簡易な測量とフーリエ級数で表現した路面粗さによって詳細な走行地形を再現し、その手法を提案した、2)トラクタ挙動モデル（ピッチング・ローリング、上下・前後の4自由度）を立案し事故時の動的挙動を再現するとともに、安全走行のための機械条件を明らかにした、3)トラクタ挙動モデルによる駆動トルクをPID制御でコントロールし、転倒につながる挙動をキャンセルして、挙動安定化を図るトルクコントロールシステム（TCS）を開発したことにより、転倒事故防止を図り、農作業事故の低減に寄与する。

#### 研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、農作業死亡事故件数は年間約400件に上り、他産業に比べて死亡事故発生率も極めて高く、多くの尊い人命を失っており、農作業事故防止は、人命尊重および労働環境の改善と健全な農業発展の観点から極めて重要な課題である。本研究では、トラクタ事故調査データに基づいて、対策可能かつ有効な事故原因を抽出し、安全に利用するための機械条件を明らかにするとともに、挙動安定化を図るトルクコントロールシステムを開発して、農作業死亡事故件数の低減に寄与する。

研究成果の概要（英文）：In this research, in order to prevent tractor accidents due to falling and overturn, dynamic analysis and the detailed survey. 1) The detailed terrain for dynamic analysis was reproduced by simple topographic survey and road surface roughness expressed by Fourier series, and the method was proposed. 2) The tractor behavior model (4 degrees of freedom; pitching / rolling / up-down / forward-backward) was designed to reproduce the dynamic behavior in accident, and the mechanical conditions for safe driving were clarified. 3) It was developed a torque control system (TCS) that controls the wheel torque with PID control using tractor behavior model, and the system cancels the behavior to falling and overturn, and stabilizes the behavior. The results prevent falling and overturn accidents and contribute to the reduction of agricultural work accidents.

研究分野：農業環境・情報工学

キーワード：農作業事故 トラクタ 転倒 挙動モデル 地形再現

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

農業機械は様々な用途に利用され、軽労化と高能率化が達成されている。一方で、農業機械利用時の事故も多発している現状にある。農林水産省によると、過去 20 年間の農作業死亡事故件数は年間約 400 件に上り、他の産業に比べて死亡事故発生率も極めて高く、多くの尊い人命を失っている。したがって、農作業事故防止は、人命尊重および労働環境の改善と健全な農業発展の観点から極めて重要な課題であるといえる。

農作業事故のうち、トラクタの死亡事故件数は毎年数十件に上り、事故原因の過半数は転倒・転落が占めている。農作業事故は、環境的要因と機械的要因および人的要因に大別することができ、これらの総和がある水準を超えたときに事故が発生すると考えられる。我が国の耕地面積の 40% を占める中山間地域では、自主施工農道も多い現状にある。このような農道は、急傾斜で道路幅も狭く、土壌侵食や流亡で路面も荒れており、転倒・転落の危険性が高い。このような傾斜地や不整地を改修（環境的要因対応）し、走行中のトラクタの挙動特性を把握して、転倒につながる挙動をキャンセルすること（機械的要因対応）ができれば、農道走行ハザードマップ作成も可能になり利用者への注意を喚起できる（人的要因対応）。

### 2. 研究の目的

本研究では、転倒によるトラクタ死亡事故防止のため、事故調査と力学解析によって、1) 簡易な測量や既存の地形図から得た概略地形と、フリー工級数で表現した路面粗さによって詳細な走行地形を再現するとともに、その手法を提案すること、2) トラクタ挙動モデル（ピッチング・ローリング、上下・前後の 4 自由度）を立案し事故時の動的挙動を再現するとともに、安全走行のための機械条件を明らかにすること、3) トラクタ挙動モデルを用いて、各車輪駆動トルクを PID 制御でコントロールし、転倒につながる挙動をキャンセルして、挙動安定化を図るトルクコントロールシステム（TCS）を開発することで、転倒事故を防止することを目的とした。これら研究経過を踏まえ、農作業事故の低減に寄与する。

### 3. 研究の方法

#### 1) 概略地形と路面粗さによる走行地形の再現

トラクタ事故調査結果の入手と事故状況現地調査により、トラクタの状態の聞き取りに併せて、事故現場と周辺の地形測量を実施する。現地調査での測量点や既存の地形図の等高線から、走行地形の基準点を得て、滑らかなスプライン補完曲線とし、これにアスファルト、土、砂利などの路面粗さを加えることで事故現場走行地形の再現する手法を提案する。

#### 2) トラクタ挙動モデルによる動的挙動の再現と安全走行条件

4 自由度のトラクタ挙動モデル（上下：(1)式、ピッチング：(2)式、ローリング：(3)式、前後：(4)式）と再現地形からトラクタの事故時の挙動を確認し、現地調査と良い一致を得たことから、他の事故状況についても検証を進め、解析精度向上とモデルの汎用化を図り、安全走行のための機械条件・操作方法を示す。

#### 3) 機体挙動安定化のための駆動 TCS 開発

不整地や傾斜地を走行するトラクタには、車輪の接地確保・維持とその挙動の安定化が必要で、ピッチング角抑制制御が有効である。そこで、4 自由度挙動モデルから最大ピッチング角を駆動トルクの入力で調整して、フィードバック制御として開発を進める。

### 4. 研究成果

#### 1) 概略地形と路面粗さによる走行地形の再現

i. 事故調査；事故情報収集については、危険を回避した事例収集のため、農家と法人を対象にヒヤリハット事例を含め 3 か所で実施し、事故状況の聞き取りと電子平板測量による地形データの取得を行った。その結果、危険を感じる場所として圃場進入路が最も多かった。地形改善では傾斜緩和と拡幅が最も多く、次に進入路の新設に取り組んでいる実態が明らかになった。

2019 年度には、これまでの事故調査結果に加え、新たに入手したトラクタ事故事例約 850 件の事例から、事故詳細要因 21 項目について対策時のリスク低減効果の検討を行った。その結果、機械的要因の「機械の整備不良、危険状態」、「安全性や操作性の低い機械」、環境的要因の「天候の悪条件」、場所の軟弱さ、滑りやすさ、「場所の傾斜、段差、凹凸」の計 5 要因で 95% 以上のリスク低減効果が認められた。

ii. 走行地形再現；2017 年度の研究実績として、概略地形と路面粗さによる走行地形の再現を行うため、微地形測量を可能にする高精度レーザー変位計を設計製作した。本装置は、小型軽量、充電池駆動で、レール上を自走して直下の直線断面を計測可能とした。測定項目は、移動距離、地形高さ、機体変位および変位角で、取得データは SD カードに記録する。本装置を用いて、圃場へのアクセス路（アスファルト、砂利、土）の測定を行った結果、測定位置によって粗度の分布がやや異なるものの、ISO 8608 で示された粗さの基準に概ね準じていることが判明した。

#### 2) トラクタ挙動モデルによる動的挙動の再現と安全走行条件

トラクタの挙動モデルについては、路面や走行速度等のあらゆる外的影響を考慮した動的挙動再現のため、上下、前後、ピッチング、ローリング方向の運動方程式に加え、新たに左右方向

の運動方程式を立案し、移動農機の微小時間における挙動を把握するために必要となるモデリングを行った。左右方向のモデリングは傾斜地走行時および遠心力作用時に影響するため、特に遠心力の影響について、1/10 程度の4輪車両を設計製作し、定常円旋回による模型実験により検証した。模型実験の結果は、運動方程式によるシミュレーション結果と良い一致を示し、移動農機における挙動モデルのシミュレーション精度を向上した。さらに傾斜地走行時および遠心力作用時の影響について調べ、傾斜耕作地の旋回時や圃場間移動時の進入路旋回等において、遠心力の影響による横転倒の危険性が大幅に上昇することがわかった。

### 3) 機体挙動安定化のための駆動 TCS 開発

機体挙動安定化のための駆動 TCS 開発については、基本的な挙動安定化に向けた制御対象として、トラクタのピッチング転倒を想定した後輪の駆動トルクの増減について検討した。駆動トルク増減は機関出力とブレーキ力を最大値とした PID 制御とした。シミュレーションではピッチング転倒事例として微地形測量を行った事故現場地形を用いた。その結果、ピッチング角の抑制を可能とすることがわかった。2019 年度には、フィードバック制御システムを適用した 3 自由度（上下、前後、ピッチング）のダイナミックシミュレータを開発し、事故現場の地形情報を用いて駆動トルク制御モデルと定速モデルを比較して、制御効果を検討した。シミュレーションの結果、最大ピッチング角度は、制御モデルで  $18.4^\circ$ 、定速モデルで  $21.0^\circ$  で、制御モデルの最大ピッチング角度は約 10% 低い結果となった。また、制御モデルのピッチング角度は、静止姿勢と比べて  $3.7^\circ$ 、定速走行モデルでは  $7.7^\circ$  上昇していた。以上の結果から、駆動力制御による動的ピッチング角の抑制効果が認められた。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 白髭祐未, 田村孝浩, 松井正実, 守山拓弥	4. 巻 37巻
2. 論文標題 大規模農業経営体における農作業安全対策の実態と特徴	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 農村計画学会誌	6. 最初と最後の頁 196-201
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 青柳悠也, 松井正実, 武田純一, 棚橋拓也, 三浦泰, 福島崇志	4. 巻 81巻2号
2. 論文標題 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	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 農業食料工学会誌	6. 最初と最後の頁 93-103
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 松井正実, 三浦泰, 青柳悠也, 福島崇志	4. 巻 80
2. 論文標題 斜面走行時の自脱コンバインの挙動に関する考察	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 農業食料工学会誌	6. 最初と最後の頁 107-113
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 棚橋拓也, 松井正実, 青柳悠也, 武田純一, 三浦泰, 福島崇志
2. 発表標題 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
3. 学会等名 農業食料工学会関東支部年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 佐藤弘之, 松井正実, 青柳悠也, 三浦泰
2. 発表標題 路面粗度測定装置の開発と性能評価
3. 学会等名 農業食料工学会関東支部
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 三浦泰, 松井正実, 青柳悠也
2. 発表標題 自脱コンバインの機動性に関する考察
3. 学会等名 農業食料工学会関東支部
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yuya AOYAGI, Masami MATSUI
2. 発表標題 VIBRATION ANALYSIS OF MOVING AGRICULTURAL MACHINES USING ROAD SURFACE CRITERIA
3. 学会等名 The 9th International Symposium on Machinery and Mechatronics for Agriculture and Biosystems Engineering (ISMAB) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 棚橋拓也, 青柳悠也, 松井正実, 武田純一, 三浦泰, 福島 崇志
2. 発表標題 コンバインの事故調査結果を用いた事故要因分析とリスク低減効果の検討
3. 学会等名 農業食料工学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 白髭祐未, 田村孝浩, 松井正実, 内川義行, 守山拓弥
2. 発表標題 農業経営体の事例に基づく農作業事故のリスク低減策
3. 学会等名 農業食料工学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 青柳悠也, 松井正実
2. 発表標題 旋回中のトラクタにおける遠心力の転倒への影響
3. 学会等名 農業食料工学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 三浦泰, 松井正実, 青柳悠也
2. 発表標題 自脱コンバインの転輪配置に関する考察 転倒, 振動, 旋回性能による評価
3. 学会等名 農業食料工学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 三浦泰, 松井正実, 青柳悠也
2. 発表標題 自脱コンバインの転倒防止と振動低減に関する考察
3. 学会等名 農業食料工学会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 青柳悠也, 松井正実, 三浦泰
2. 発表標題 トラクタの脱輪横転倒に関する考察
3. 学会等名 農業食料工学会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 田村孝浩, 内川義之, 松井正実
2. 発表標題 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 - 農業土木からのアプローチ
3. 学会等名 農業食料工学会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	井上 英二  (Inoue Eiji)  (00184739)	九州大学・農学研究院・教授   (17102)	
研究分担者	田村 孝浩  (Tamura Takahiro)  (20341729)	宇都宮大学・農学部・准教授   (12201)	
研究分担者	光岡 宗司  (Mitsuoka Muneshi)  (60437770)	九州大学・農学研究院・助教   (17102)	