

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 21 日現在

機関番号：12605

研究種目：基盤研究(A)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19H00959

研究課題名（和文）カオス制御論を活用したトラクタ転倒・転落事故防止運転支援システムの開発

研究課題名（英文）Development of a driving support system for preventing overturning accidents of farm tractor utilizing controlling chaos

研究代表者

酒井 憲司（Kenshi, Sakai）

東京農工大学・（連合）農学研究科（研究院）・特任教授

研究者番号：40192083

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 32,500,000円

研究成果の概要（和文）：トラクタは自動車とは異なり車軸サスペンションが無く、前輪はセンターピボット懸架で、重心位置が高いため、道路走行時に自動車では問題とならない非線形過程が強く顕在化する。本研究ではトラクタの非線形動力学の中核と共振ジャンプとパワーホップのメカニズムを明らかにし、傾斜地におけるトラクタの横滑り横転のメカニズム、トラクタートレーラー系の動的不安定性などを解明した。これらは、トラクタ転倒・転落事故シナリオの解明のための理論的基盤を獲得できた。同時に、トラクタのもつ非線形ダイナミクスが生み出す危険挙動の抑制に有効な制御手法、および、Lyapunov指数など危険挙動の評価指標などについての知見を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で得られたトラクタ非線形動力学に関する知見は、トラクタ転倒・転落事故防止のための設計論、制御論、動的安定性試験法さらには道路設計基準策定の理論的根拠として活用できる。また、作物、作業機、圃場や道路環境、気象条件などの多様な組み合わせにより、作業員ごと・作業ごとに現場ごとにリスク要因が異なり一元的にリスク要因を列記できない。そのため、農作業のリスクマネジメントの観点から、多彩な事故シナリオを可視化・共有化が求められていた。本研究で提示した仮想テストドライブ手法やドライビングシミュレータは、安全研修教材や体験型の安全啓発に活用でき、トラクタ事故低減に向けて社会的意義が大きい。

研究成果の概要（英文）：Tractor overturning are the major cause of agricultural fatalities worldwide. In Japan, small tractors are used for farming in rough road surface, such as slippery rice paddies and steep slopes. Tractor overturning accidents are caused by steering instability due to bouncing and sliding. In this project, the mechanisms of resonance jumps and power hops observed in agricultural tractors were clarified. The mechanism of tractor overturning in inclined filed were elucidated. The instability of tractor-trailer systems was also identified. These results provide a theoretical basis for elucidating tractor overturning accident scenarios. Delayed feedback control and Lyapunov exponents were investigated as a possible control and evaluation methods. 6 DOF motion platform tractor driving simulator was developed combining with CarSim and MATLAB /Simulink. Based on a study of fatal accidents during agricultural work, a tractor rollover accident scenario was reproduced in a virtual test drive.

研究分野：農業機械学

キーワード：農作業事故 仮想テストドライブ カオス 非線形力学 共振ジャンプ パワーホップ ドライビングシミュレータ 農作業安全

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 1. 研究開始当初の背景

農作業死亡事故は1970年代以降400名前後の高水準で推移し、その内147件が農用車両、101件が乗用トラクタによる死亡事故件数(2015年)であり、中でも乗用トラクタ事故の重症度が最も高い。わが国のトラクタは小規模水田での超低速作業の性能を重視して発達してきたが、圃場・農村地域道路網の拡大、小型トラクタ高速化により、トラクタ設計理論と走行環境との乖離が拡大しトラクタ事故が構造化されている。本研究では、トラクタに発生するジャンプ現象・横滑り横転・パワーホップ等の突発事象を記述可能な統合型トラクタ非線形運動モデルを構築し、トラクタ転倒・転落事故の詳細なメカニズムを明らかにする。更に、トラクタ独特の非線形挙動抑制のためのカオス制御法を開発する。その上で、運転者が自身の運転による車両挙動の可視化によって自ら運転のリスク特定を行い、事故回避方法を能動的に学習できるトラクタ事故防止支援システムの開発を行うこととした。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、トラクタ転倒・転落事故のメカニズムの解明と事故回避の制御法を開発し、トラクタ運転における事故防止支援システムを実現することである。特に重要な研究要素課題として、「統合型トラクタ非線形運動モデルの構築」、「トラクタ仮想テストドライブに基づく事故回避手法」、「トラクタ用ドライビングシミュレータの開発」を掲げた。これによって、トラクタが本質的に有する動的不安定性のメカニズムを明らかにし、トラクタ事故シナリオの仮想テストドライブによる再現を通じて、その危険性を可視化・共有化手法を獲得することを目的とした。

## 3. 研究の方法

### 1) 統合型トラクタ非線形運動モデルの構築

トラクタ転倒転落事故メカニズムの解明のための車両モデルは、①振動モデル、②旋回モデル、③動力伝達系回転運動モデルが、④タイヤ駆動力発生モデル(タイヤと路面のテラメカニクス)で連成し、12自由度運動方程式として統合されている。非線形要素過程である、①ジャンプ現象(タイヤの路面離脱-再衝突)、②パワーホップ現象(Stick-Slide Dynamicsに起因する多様な自励振動)などによってトラクタが事故に至る複雑な動的挙動を記述する。これによって、①道路走行時に脱輪に至るような突発的な挙動、②パワーホップ現象、③緩傾斜における横滑り転倒、④片ブレーキによる横転、⑤前輪軸荷重低下による操縦安定性(操安性)の喪失などを仮想テストドライブにおいて再現する。また、トラクタ-トレーラ系におけるジャックナイフ現象による事故が欧米で多発していることから、その発生メカニズムについて解明する。

### 2) トラクタ転倒・転落事故回避のための制御法と不安定性の評価指標

自動車の標準的な車両運動制御システムであるABS(アンチロック・ブレーキングシステム)、TCS(トラクション・コントロールシステム)、ECS(横滑り防止システム)などのトラクタへの有効性を検証する。一方、これらの制御システムでは原理的に、前輪接地荷重喪失・浮き上がり時のトラクタ事故に至る挙動を制御することはできない。車輪接地荷重が大きく変動するパワーホップも同様である。このようなトラクタ独特の挙動は、安定平衡点の不安定化によると解釈できるためカオス制御の適用が有効と考えられるためDelayed Feedback(DF)制御などの制御手法を試みる。また、トラクタは自動車に比較して動的不安定性が高く、これが事故などの危険挙動につながる。動的不安定性に基づく危険挙動の評価指標について探索する。

### 3) 事故防止運転支援システムの実装

農研機構農業機械部門などの公的試験研究機関によって蓄積されてきたトラクタの事故調査事例に基づいて、仮想テストドライブによって事故シナリオ再現を試みる。これらの動画アーカイブなどの構築を行い、随時、安全講習や研修教材として提供する。

モーションプラットフォーム型のトラクタドライビングシミュレータの構築について着手し、必要なシミュレータ構築と6軸振動台との接続を行う。リアルタイムで体験できる能動的学習システムとして実装する。利用者が開発した制御アルゴリズムや路面データ、トラクタ仕様データなどを入力し、トラクタ事故防止・制御法開発用シミュレータとして活用するために必要な技術課題を抽出する。

## 4. 研究成果

### 1) 統合型トラクタ非線形運動モデルの構築

①トラクタにおいてはタイヤの路面離脱と再衝突によって励起される共振ジャンプ現象が顕著な非線形項となりカオスを含む動的挙動が発生する。平坦路面におけるバンプ乗り越えが旋回性能の大幅な低下につながることも車両旋回モデルも用いて明らかにした(論文1)。また、トラクタの転倒転落事故は圃場から農道への出入り口において多発するため、傾斜登坂後旋回する経路において前輪の路面離脱による脱輪⇒横転過程を数値実験によって明らかにした(論文3)。これらは、車両運動方程式の標準的な数値積分によって実施したが、同時に、自動車の車両運動シミュレータとして広く普及しているCarSimの農用トラクタへの適用を試み、仮想テスト

ドライブが可能性を示すとともに、自動車とトラクタの本質的な相違によって考慮すべき技術課題についても明らかにした。さらに、傾斜地における旋回時の遠心力による横転メカニズムを車両運動方程式による数値実験と縮尺モデル実験によって明らかにした（論文 2）。これらは、リアルタイム危険度表示・記録システムの要素技術として有用である。

## ②パワーホップ現象の力学的メカニズムの解明

大型トラクタの重けん引作業時や高速での道路走行時に発生するパワーホップもしくはパワーピッチに発生メカニズムを Bouncing ball Dynamics と Stick-slip Dynamics を統合することによって明らかにし、車両運動方程式として定式化した。CarSim において道路走行中のパワーホップ発生も確認した（論文 5）。4 輪駆動の大型トラクタが出現した 1970 年代に顕在化した現象であるが、これまではメカによる対症療法的アプローチによって対応されてきたが、本研究成果によってその力学的メカニズムを世界で初めて理論的に解明したものである。

## ③農用トラクタートレーラ系の安定性解析

農業用連結車両を等価 3 輪モデルでモデル化し、数値解析によって前輪転舵角に対する連結角の動特性を伝達関数として導出し、前輪転舵角、初期車速、路面摩擦係数、トレーラ質量の変化に伴う安定性を調査した。その結果、農用トラクタートレーラ系の安定性は、一般トラクタートレーラ系に比較してはるかに脆弱であり、トレーラ質量の増加によって系の極が原点に漸近し、安定性を著しく悪化させることを明らかにした（論文 9）。これによって、農用トラクタートレーラ系におけるスウィング現象やジャックナイフ現象など事故の直接要因となる現象解明に必要な研究要素が明白となった。

## 2) トラクタ転倒・転落事故回避のための制御と不安定性の評価

①定常波形入力によって共振ジャンプを引き起こす周波数領域とカオス解がオーバーラップしていることから、DF 制御の効果について検討し、カオス解が周期解に制御されることを車両ハーフモデルによって確認した。実際の多様な農道路面における有効性の検討に必要な項目を明らかにした。

②傾斜路面登坂時における前輪浮き上がりやトラクタの横滑り⇒横転につながる事故が多発している。トラクタのピッチ角に対するタイヤ駆動力の影響に着目し、駆動力制御によってピッチ角を抑えることによって当該事故の防止の可能性を示した（論文 4）。

③共振ジャンプ発生過程における Lyapunov 指数を加速度時系列から算出し、不安定性評価指標としての利用可能性を示した。また、傾斜路面におけるトラクタ横転事故回避のためのトルク制御の有効性について明らかにした（論文 7）。

## 3) 事故防止運転支援システムの実装

### ①トラクタの仮想テストドライブ手法

CarSim, TruckSim, CarMaker, TrachMaker など汎用の車両シミュレーションソフトにおいて農用トラクタの属性を組み込んだ仮想テストドライブ手法を開発した。これら自動車用の車両シミュレータにおいてはサスペンションが組み込まれており、一般にサスペンションを有しないトラクタに適用する際の物理パラメータ設定方法を考案した。共振ジャンプやパワーホップに起因する危険挙動について、圃場退出時の脱輪・横転事故、急傾斜登坂時の前輪浮き上がり⇒横滑り横転事故、未整備農道における脱輪横転事故、片ブレーキ時の挙動、カーブ進入バンプ乗り越えにおける脱輪事故、凸バンプと凹バンプの応答比較、などの仮想テストドライブを実施した。

### ②事故シナリオ動画教材の作成

農研機構農業機械部門において整備している農作業事故調査データに基づいて、仮想テストドライブによる事故シナリオ再現を行った。そこで生成される事故シナリオ動画を集積し、随時、安全講習・研修教材として提供した。

### ③モーション型トラクタドライビングシミュレータの開発

6 軸油圧スチュワート型振動台と CarSimDS をアナログ出力により接続し、事故シナリオのリアルタイム運転を行った。これにより、トラクタ事故シナリオの再現が可能であることを確認した。研究・開発型のモーション型トラクタドライビングシミュレータに必要な仕様を明らかにした（論文 6）。一方、簡易型・普及型のモーション型トラクタドライビングシミュレータの開発を行うために、2 軸振動台を導入した。

## 4) アウトリーチ

安全研修教材として追加すべき事故シナリオについての提案や情報提供を受けた。仮想テストドライブによる事故シナリオ動画の効果について農業現場からの意見収集し、その効果の有意性と事故低減に向けてのアウトリーチについての知見を得た。

2019 年、2021 年、2022 年の農業食料工学会年次大会においてオーガナイズドセッションを開催した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 9件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 8件）

1. 著者名 Masahisa Watanabe, Kenshi Sakai	4. 巻 192
2. 論文標題 Numerical analysis of steering instability in an agricultural tractor induced by bouncing and sliding	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Biosystems Engineering	6. 最初と最後の頁 108-116
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.biosystemseng.2020.01.014	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, 福島崇志	4. 巻 82 (1)
2. 論文標題 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-	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 農業食料学会誌	6. 最初と最後の頁 39-46.
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11357/jsamfe.82.1_39	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 -

1. 著者名 Masahisa Watanabe, Kenshi Sakai	4. 巻 184
2. 論文標題 Impact dynamics model for a nonlinear bouncing tractor during inclined passage	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Biosystems Engineering	6. 最初と最後の頁 84-94
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.biosystemseng.2019.03.013	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 Yuya AOYAGI, Masami MATSUI	4. 巻 15(1)
2. 論文標題 Theoretical Verification of Driving Force Control System for the Suppression of the Dynamic Pitching Angle of Tractors	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Engineering in Agriculture, Environment and Food	6. 最初と最後の頁 13-23
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.37221/eaef.15.1_13	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 Masaisa Wataambe, Kenshi Sakai	4. 巻 204
2. 論文標題 Novel power hop model for an agricultural tractor with coupling bouncing, stick-slip, and free-play dynamics	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Biosystems Engineering	6. 最初と最後の頁 156-169
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.37221/eaef.15.1_13	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 Masaisa Wataambe, Kenshi Sakai	4. 巻 210
2. 論文標題 Identifying tractor overturning scenarios using a driving simulator with a motion system	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Biosystems Engineering	6. 最初と最後の頁 261-270
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.biosystemseng.2021.08.010	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 渡辺将央, 酒井憲司	4. 巻 84(3)
2. 論文標題 リアプノフ指数を用いたトラクタ非線形ダイナミクスの動的不安定性の評価	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 農業食料工学会誌	6. 最初と最後の頁 166-175
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 酒井憲司	4. 巻 44
2. 論文標題 応用カオスとしてのトラクタ非線形動力学	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 振動技術	6. 最初と最後の頁 3-9
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 無
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 -

1. 著者名 風間恵介, 柏原一真, 酒井憲司	4. 巻 85(2)
2. 論文標題 農業用連結車両の平面運動解析による操縦安定性の考察	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 農業食料工学会誌	6. 最初と最後の頁 89-96
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 Clement Oppong Peprah, Megumi Yamashita, Tomoaki Yamaguchi, Ryo Sekino, Kyohei Takano and Keisuke Katsura	4. 巻 13(12)
2. 論文標題 Spatio-Temporal Estimation of Biomass Growth in Rice Using Canopy Surface Model from Unmanned Aerial Vehicle Images	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Remote Sensing	6. 最初と最後の頁 2388
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/rs13122388	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 該当する

〔学会発表〕 計10件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 Masahisa Watanabe, Kenshi Sakai
2. 発表標題 Nonlinear Dynamics of a Bouncing Tractor in a Tractor Driving Simulator
3. 学会等名 2020 ASABE Annual International Virtual Meeting (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Masahisa Watanabe, Kenshi Sakai
2. 発表標題 Numerical Analysis of Tractor Accidents using Driving Simulator for Autonomous Driving Tractor
3. 学会等名 Proceedings of 2019 5th International Conference on Mechatronics and Robotics Engineering (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masahisa Watanabe, Kenshi Sakai
2. 発表標題 Development of Tractor Bicycle Model with Ride Vibration
3. 学会等名 2019 ASABE Annual International Meeting (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masahisa Watanabe, Kenshi Sakai
2. 発表標題 Investigation by Driving Simulation of Tractor Overturning Accidents Caused by Steering Instability
3. 学会等名 13th CIGR VI Technical Symposium, Sapporo, Japan, September 3-6, 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 風間恵介, 柏原一真, 酒井憲司
2. 発表標題 農業用連結車両の準定常状態における操縦安定性の考察
3. 学会等名 農業食料工学会年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田村孝浩 小川悠一
2. 発表標題 乗用田植え機退出時における危険感の規定要因に関する考察
3. 学会等名 農業食料工学会年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田中葵 田村孝浩
2. 発表標題 年齢層別に見た農作業事故の発生傾向の比較
3. 学会等名 農業農村工学会関東支部大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田村孝浩
2. 発表標題 農作業安全と地域農業の持続的発展
3. 学会等名 農業食料工学会年次大会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 酒井憲司
2. 発表標題 農業機械の非線形数学-カオス同期と農学の諸現象-
3. 学会等名 統計数理研究所 諸科学における大規模データと統計数理モデリング（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masahisa Watanabe and Kenshi Sakai
2. 発表標題 Stick Slip Vibration in Tractor Dynamics
3. 学会等名 NOLTA 2019（国際学会）
4. 発表年 2019年



## 〔図書〕 計1件

1. 著者名 酒井憲司（第7編編著）	4. 発行年 2020年
2. 出版社 コロナ社	5. 総ページ数 1092
3. 書名 農業食料工学ハンドブック第7編土と耕うん	

## 〔産業財産権〕

## 〔その他〕

<p>Mathematics to keep farmers on track  <a href="https://www.eurekalert.org/pub_releases/2020-05/tuoa-mtk051120.php">https://www.eurekalert.org/pub_releases/2020-05/tuoa-mtk051120.php</a>          農用トラクタのジャンプ及び横滑りを予測するための非線形力学モデルを開発  <a href="https://www.eurekalert.org/pub_releases_m1/2020-05/tuoa-6051120.php">https://www.eurekalert.org/pub_releases_m1/2020-05/tuoa-6051120.php</a>          転倒事故多発、現場は農道 「数学」で防止に挑む  <a href="https://www.nikkei.com/article/DGXMZ061293230Y0A700C2X96000/">https://www.nikkei.com/article/DGXMZ061293230Y0A700C2X96000/</a>          Tractor overturn prediction using  <a href="https://www.eurekalert.org/pub_releases/2019-09/tuoa-top092519.php">https://www.eurekalert.org/pub_releases/2019-09/tuoa-top092519.php</a></p>
--

## 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	松井 正実  (Matsui Masami)  (10603425)	宇都宮大学・農学部・教授   (12201)	事故要因分析
研究分担者	田村 孝浩  (Tamura Takahiro)  (20341729)	宇都宮大学・農学部・准教授   (12201)	道路環境調査・設計指針検討
研究分担者	青柳 悠也  (Aoyagi Yuya)  (20882195)	信州大学・先鋭領域融合研究群社会基盤研究所・助教(特定雇用)   (13601)	トラクタモデルの検証

## 6. 研究組織（つづき）

	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	風間 恵介 (Kazama Keisuke) (30813422)	日本大学・生産工学部・助教  (32665)	検討システムの仮想テストドライブ
研究分担者	山下 恵 (Yamashita Megumi) (70523596)	東京農工大学・(連合)農学研究科(研究院)・准教授  (12605)	ドローンによる3D路面データの取得
研究分担者	中島 正裕 (Nakajima Masahiro) (80436675)	東京農工大学・(連合)農学研究科(研究院)・教授  (12605)	事故シナリオ動画実用性評価
研究分担者	武田 純一 (Takeda Junichi) (80133908)	岩手大学・農学部・嘱託教授  (11201)	事故現地調査と原因分析

## 7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

## 8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関