

(続紙 1)

京都大学	博士 (農 学)	氏名	孫 超 然
論文題目	Numerical Simulation of Sideways Overturning Dynamics for Agricultural Vehicles on a Slope (傾斜面における農用車両の側方転倒力学の数値シミュレーション)		
(論文内容の要旨)			
<p>本論文では、オペレータ保護用安全フレーム(TOPS)を装着した農用車両が傾斜面上で連続的に側方転倒するかしないかを高精度に予測する計算手法の開発を目標としている。なお、本研究において、車両は剛体、傾斜面は反発係数で近似した剛体と仮定する。主な内容は次のとおりである。</p> <p>まず、TOPSを装備した1:1.5(33.7度)の傾斜面に静止した農用三輪運搬車が、山側側面を持ち上げて転倒させたのち斜面上を連続的に側方転倒するかどうかを簡易に予測する手法を検討した。すなわち、OECDコード6に記載された農用トラクタの傾斜面転倒挙動予測のためのBASICプログラムを車両の構造を考慮して前後逆に適用する既報の四輪運搬車の転倒解析手法を元に新たに三輪運搬車を考慮可能なように拡張した。得られたプログラムは、設定TOPS高さに対する三輪運搬車の転倒挙動を予測するもので、あらかじめ接地候補点とこれにより決定される回転軸を定義しておく必要があるものの、四輪運搬車ならびに三輪運搬車を考慮可能なものである。また、運搬車の車両パラメータと供試TOPS高さを入力すれば、傾斜面での転倒時の角速度の計算結果とともに連続転倒するか側方転倒が止まるかを表示する。次いで、開発したOECD方式の計算結果の精度を検証するため、実機の約1/10のモデル運搬車を製作供試し、TOPS高さを変えた際のモデル運搬車の転倒挙動実験結果を得た。得られた実験結果とOECD方式での解析結果との比較より、OECD方式によるTOPS高さの予測は概ね妥当であるが、実験時に観察された車両転倒時の斜面上の滑りや落ちやバウンドは、OECD方式では車両と傾斜面間の反発係数や摩擦係数を直接考慮できないことと相まって表現できないことを確認した。</p> <p>次に、側方転倒に伴う運搬車両の動力学解析の高精度化を目的として、オープンソースソフトの物理エンジン(Bullet Physics Library; 以下Bulletと略称)の転倒挙動解析への適用性を明らかにした。すなわち、Bulletを用いて農用運搬車を想定した車両の解析モデルを作成し、Bulletの中に力学量の計算結果を書き出す機能を追加した解析プログラムを開発した。ここでは、車両および傾斜面をそれぞれ剛体と仮定し、Bulletに含まれる剛体衝突計算機能を利用して、車両と傾斜面間の摩擦や反発条件を直接考慮した衝突計算を実現した。また、転倒中の車両運動のアニメーション表示とともに衝突力、重心の並進速度、重心回りの角速度などの力学量の結果を保存可能である。運搬車モデルの実験結果とBulletによる計算結果とを比較するため、上記</p>			

のモデル運搬車両と傾斜面を用いて、運搬車モデルの質量や慣性モーメントなどの車両関係の物理パラメータとともに供試斜面の反発係数を測定した。転倒する際の運搬車の車体と傾斜面との接触点ならびに回転軸の推移をBulletのアニメーション機能により視覚的に確認するとともに、実験結果ビデオとの比較検証により、農用運搬車と傾斜面との接触衝突計算ならびに転倒挙動が高精度に行えることを明らかにした。

さらに、安全フレーム(ROPS)を有する農用トラクタの走行時の転倒挙動をBulletにより解析した。まず、四輪トラクタ車両モデルを後輪駆動かつ前車軸中央のピボット支持構造を考慮したトラクタモデルをBulletにより作成した。過去に公表された転倒実験結果例と比較するため、トラクタがほ場側道から低地へ転落するような段差条件での転倒挙動を解析した。また、OECDコード6記載のプログラムの適用例題である平坦な傾斜面での各種トラクタの転倒挙動解析にもBulletを適用した。各条件について計算された角速度や線速度などの力学データと既往研究の測定値をRMSE値により比較した結果、両傾斜条件においてもBulletによるトラクタの転倒挙動の予測が十分な精度ならびに適用性を有すること、OECD方式での解析不可条件においてもBulletにより解析可能となることを明らかにした。次いで、ROPSを設置した実機小型トラクタによる静止時ならびに走行時の舗装路面への側方転倒実験を行い、転倒時の角速度ならびに路面衝突時にROPS側面に作用する衝撃力について、Bulletにより得られた結果と定性的な挙動が一致することを確認した。

以上より、物理エンジンを適用することで、農用車両の傾斜面での転倒挙動や衝突力を介して連続転倒予測が容易に実現できることが確認できた。また、従来のOECD方式のように車両モデルにあらかじめ転倒時の接地点や回転軸の準備が不要であり、また傾斜面での摩擦や反発係数が物理エンジンでは考慮可能であることから、物理エンジンによる農用車両の側方転倒解析も高精度かつ容易に実現可能なことが明らかとなった。

注) 論文内容の要旨と論文審査の結果の要旨は1頁を38字×36行で作成し、合せて、3,000字を標準とすること。

論文内容の要旨を英語で記入する場合は、400～1,100 wordsで作成し
審査結果の要旨は日本語500～2,000字程度で作成すること。

(論文審査の結果の要旨)

我が国においては、農業従事者の高齢化とあいまって、農用車両による農作業時のオペレータの事故は多く、作業中の死亡事故が毎年報告されている。したがって、作業時の農用車両の各種安全対策は喫緊の課題であり、新規に販売される農用トラクタでは安全キャブや安全フレーム(ROPS)の装着が義務付けされている。一方で、農用運搬車両においては、まだ義務化は実現していない。このような背景を元に、本論文では、傾斜地での農用車両による機械作業を想定し、車両の転倒開始後の連続転倒挙動と転倒時の角速度や衝撃力の予測を試みたものである。まず農用三輪運搬車を対象として汎用のOECDコードを援用し、先行研究例のある農用四輪運搬車の場合と同様の転倒挙動結果が得られることを確認した。次いで、更に予測精度を高めるため、様々な路面条件を考慮可能な3次元物理エンジンを適用し、運搬車の転倒挙動が精度よく予測可能なことを示した。また走行中のトラクタの傾斜面上の転倒や側道からの転落を対象に物理エンジンを用いた解析を行い、公表されている実験結果との比較により農用トラクタへの適用性を明らかにしたものである。

本論文が評価できる点は、以下の通りである。

1. OECD方式における農用三輪運搬車モデルでの計算結果は、四輪の安全フレーム(TOPS)高さが三輪のものより高くなることがモデル車両の転倒実験結果と一致した。また、計算結果では慣性モーメントや反発係数の変化に伴う三輪模型または四輪模型車両のTOPS高さが既往の研究例と同様な傾向となり、農用三輪運搬車の転倒挙動を十分な精度で予測可能なことを確認した。
2. 傾斜面の摩擦と反発係数を直接考慮するため、新たな手法として物理エンジンを適用し、三輪運搬車と四輪運搬車の連続転倒解析を行った。異なる路面条件での計算結果との比較により、摩擦係数と反発係数の条件の考慮ならびに物理エンジンによる衝突挙動の視覚的確認の結果、物理エンジンを適用することで運搬車の転倒挙動の解析精度がOECD方式よりも向上することを示した。
3. ROPSを有する農用トラクタを対象として、物理エンジンを用いた傾斜面ならびに側道からの転倒挙動解析を行った。解析結果を過去に公表された実験結果と比較することで、角加速度などの力学量が高精度で得られること、またOECD方式よりも車両モデルデータの準備ならびに車両の傾斜面での転倒挙動の判断が容易であることを確認した。

以上のように、本論文は農用車両の傾斜面での側方転倒力学シミュレーションに物理エンジンを適用することでOECDコードによる従来法よりも容易にかつ精度よく解析できることを明らかにし、物理エンジンにより農用車両の側方転倒時の安全フレームの有効性の予測が実現可能であることを示しており、農業システ

ム工学、フィールドロボティクス、生物センシング工学の発展に寄与するところが大きい。

よって、本論文は博士（農学）の学位論文として価値あるものと認める。

なお、平成30年11月12日、論文並びにそれに関連した分野にわたり試問した結果、博士（農学）の学位を授与される学力が十分あるものと認めた。

また、本論文は、京都大学学位規程第14条第2項に該当するものと判断し、公表に際しては、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。

注) 論文内容の要旨、審査の結果の要旨及び学位論文は、本学学術情報リポジトリに掲載し、公表とする。

ただし、特許申請、雑誌掲載等の関係により、要旨を学位授与後即日公表することに支障がある場合は、以下に公表可能とする日付を記入すること。

要旨公開可能日： 年 月 日以降（学位授与日から3ヶ月以内）