

斜面走行時の自脱コンバインの挙動に関する考察

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	松井,正実 三浦,泰 青柳,悠也 福島,崇志
発行元	農業食料工学会
巻/号	80巻2号
掲載ページ	p. 107-113
発行年月	2018年3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



斜面走行時の自脱コンバインの挙動に関する考察*

松井正実*[†]・三浦 泰*¹・青柳悠也*¹・福島崇志*²

要 旨

自脱コンバインは、トラックへの積み下ろしや圃場への出入りの際にピッチング方向の機体姿勢が急速に変化し、オペレータの転落や転倒事故に繋がる可能性がある。本研究では、このような自脱コンバインの挙動を力学的に解明するために、上下・ピッチング・ローリングに加え、前後方向を考慮した4自由度での挙動モデルを立案した。また、これらの挙動モデルを用いて剛性傾斜路面走行時の挙動シミュレーションを行った。その結果、圃場進入時を想定した前進降り、および後進登坂終了時に転倒し易いことがわかった。これら転倒防止のためには、路面傾斜角度 23° 以下、走行速度 0.25 m/s 以下で走行する必要があることが明らかになった。

[キーワード] 自脱コンバイン, 挙動モデル, シミュレーション, 斜面, 転倒

Study on the Behavior of Combine Harvester during Slope Traveling*

Masami MATSUI*[†], Shin MIURA*¹, Yuya AOYAGI*¹, Takashi FUKUSHIMA*²

Abstract

Combine harvesters experience the risk of falling accidents owing to the rapidly changing pitching posture during loading and unloading of trucks and when entering and leaving the field. In this study, a dynamic model of traveling behavior for a combine harvester with four degrees of freedom (vertical, pitching, rolling, and anteroposterior direction) was developed. In addition, the model was simulated for travel on various rigid slopes. It was found that the combine harvester runs the risk of falling accidents in the forward descend mode when entering the field, and the backward ascend mode when leaving slope. To prevent falling, it is necessary to travel at a maximum slope angle and traveling speed of 23° and 0.25 m/s, respectively.

[Keywords] combine harvester, dynamic model, simulation, slope, tipping

I 緒 言

1960年代の発売当初から、自脱コンバインの走行部にはゴム履帯走行装置が採用されてきた。ゴム履帯走行装置は、軟弱な湿田における走破性、牽引性、機動性に優れる。しかしながら、自脱コンバインの機体構成は、刈取部を履帯の前方に、藁切断作業機の排出部を履帯の後方に、操作席や脱穀部、穀粒貯留タンクを履帯上方に配置せざるを得ないことから、転輪は機体の前後中央付近に集中して配置され、機体全長に対して接地長も短く、

重心高さも高くなる。このことは、輸送時のトラックへの積み下ろし、圃場への出入りや山間地における急傾斜農道などでの走行において、ピッチング方向の機体姿勢が急速に変化する要因となり、オペレータの転落や転倒事故に繋がる可能性がある。したがって、多様な農業環境での安全走行のためには、自脱コンバインの挙動を力学的に解明することが重要である。

井上ら(1990a; 1990b; 1990c)は、農用ゴム履帯走行部の振動特性を明らかにするために、剛性水平路面走行時の転輪と履帯間の動的相互作用を考慮した機体の上

* 2017年6月農業食料工学会第53回関東支部年次大会(長野)にて一部講演

*1 会員, 宇都宮大学農学研究科(〒321-8505 栃木県宇都宮市峰町350 TEL 028-649-8172)
Faculty of Agriculture, Utsunomiya University, 350, Mine-machi, Utsunomiya-shi, Tochigi 321-8505, Japan

*2 会員, 三重大学生物資源学研究所(〒514-8507 三重県津市栗真町屋町1577 TEL 059-231-9597)
Faculty of Bio-resources, Mie University, 1577, Kurimamachiya-cho, Tsu-shi, Mie 514-8507, Japan

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

下, ピッチングおよびローリングに関する動的モデルを提案した。光岡ら (2003) は, 振動特性に影響を及ぼすと考えられる転輪配置と重心位置を変化させて, 同力学モデルに基づく予測シミュレーションを行い, 振動特性に与える影響を考察している。

また, 機体振動シミュレーションのパラメータである転輪-ゴム履帯間の動ばね定数と粘性減衰係数について, 井上ら (1990c) は, 加振装置を用いて同定し, 野口ら (1998) は, アスファルト路面上での実走行による振動データから同定を行っている。

以上のことから, 自脱コンバインの転輪-ゴム履帯間の動的パラメータが示され, 平地における振動特性は明らかにされてきたが, 傾斜地形における自脱コンバインの姿勢変化や転倒に注目し, 理論的考察に基づく実用的な解析結果を示した研究は少ない。

自脱コンバインの走行では, 路面の凹凸や弾性, 減衰特性について考慮する必要があるが, 様々な状況に共通する基本的な挙動特性を明らかにしなければならない。よって本研究では, 路面特性を排した剛性傾斜路面の登り降りに関する傾斜角度, 地形高さおよび速度の限界について検討を行うことを目的とし, 既往の研究 (井上ら, 1990c) によって示された力学モデルに前後方向の自由度を加えた 4 自由度の挙動モデルを立案した。また, 地形の傾斜角度, 地形高さ, および速度を変化させて数値解析を行い, 機体の動的ピッチング角の変化に基づく安全走行限度について検討を行った。

II 自脱コンバインの力学モデル

1. ゴム履帯の力学特性

本研究では, 転輪が走行部フレームに剛体接続された固定転輪の場合を対象としている。このような構成にお

いては, 転輪自体の弾性および減衰特性以外に振動を軽減させる機能が無いため, 転輪はサスペンションの役割をなさない。したがって, 自脱コンバインの動的挙動はゴム履帯の動的パラメータに依存すると考えられる。井上ら (1990c) は, 動ばね係数 k と粘性減衰係数 c について, 転輪とゴム履帯を用いた加振実験を行い, その結果を基にラグピッチで周期的に変動するフーリエ級数で表現している。ゴム履帯は, 接地している全てのラグで機体質量と駆動力を分担していると考えられ, 剛性傾斜路面を一定速度で走行する場合, 加減速による荷重が発生しないこと, ラグの断面形状が台形であることなどを考慮すると, 傾斜地での機体荷重によるラグの進行方向への変形は僅かであると考えられる。よって, 本研究では同パラメータを使用することとし, ゴム履帯を除く走行部がゴム履帯上を走行する状況を想定した。

2. 運動方程式

本研究では, 固定転輪を有する自脱コンバインについて, 上下・ピッチング・ローリングに前後方向を加えた 4 自由度の運動方程式を立案した。前後方向については, 傾斜地を所定の速度で走行する際に, 駆動力の影響を考慮するために必要となる。自脱コンバインに作用する力を図 1 に示す。井上ら (1990c) による機体重心の上下・ピッチング・ローリングの運動方程式に前後進駆動力の分力を加えた運動方程式を式 (1)~(3) に, 前後進に関する運動方程式を式 (4) に, 各転輪が路面から受ける接地反力 R を式 (5) に示す。上下・前後方向の運動方程式における D は駆動力を示し, 式 (1)~(4) で γ を含む項は走行抵抗を示す。 D は接地反力と走行抵抗の分力とつりあって等速度運動をしているものとした。

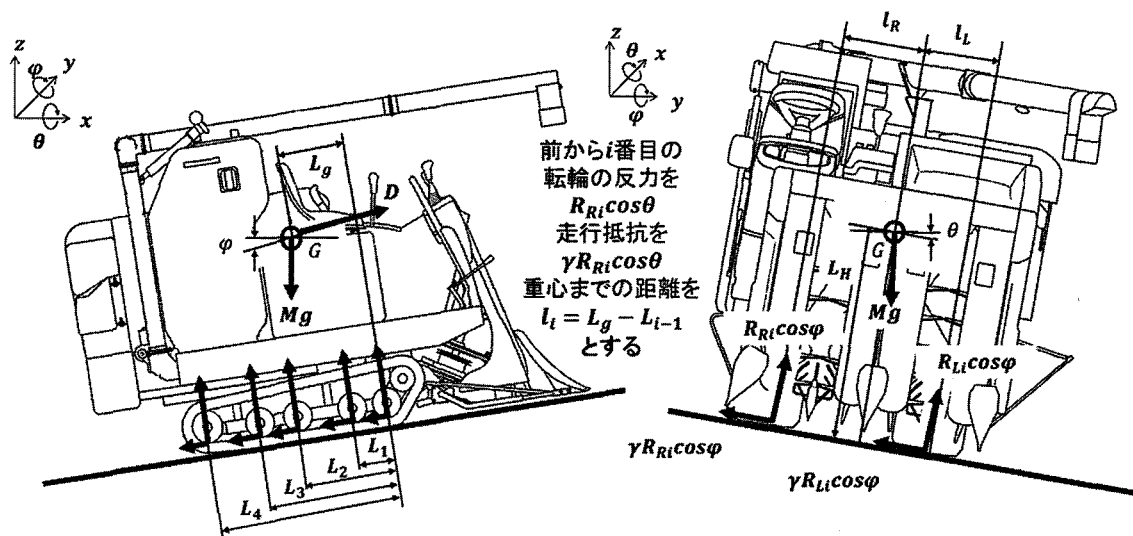


図 1 自脱コンバインに作用する力

Fig. 1 Force interacting on combine harvester

表 1 供試機と模型における諸元およびモデルパラメータ
Table 1 Body specifications and model parameters of test machine and model

項目	供試機	模型
転輪数	8	8
ラグピッチ [mm]	84	6
機体重量 [kg]	1760	0.615
機体全長 [mm]	3780	164
機体全幅 [mm]	1690	81
機体全高 [mm]	1980	73
第1転輪から第2転輪までの距離 [mm]	205	15
第1転輪から第3転輪までの距離 [mm]	630	45
第1転輪から第4転輪までの距離 [mm]	840	60
第1転輪からアイドラーまでの距離 [mm]	1355	97
第1転輪から重心までの距離 [mm]	505	34
轍間距離 [mm]	895	64
第1転輪切り上げ高さ [mm]	10	1
アイドラー切り上げ高さ [mm]	10	1
重心位置から路面までの垂直距離 [mm]	775	55
ピッチング方向の慣性モーメント [kg/m ²]	2700	0.0046
ローリング方向の慣性モーメント [kg/m ²]	1075	0.0019

$$M\ddot{z} = Mg - \sum_{i=1}^n (R_{Ri} + R_{Li}) \cos \varphi \cos \theta + \gamma \sum_{i=1}^n (R_{Ri} + R_{Li}) \sin \varphi \cos \theta - D \sin \varphi \quad (1)$$

$$I_y \ddot{\varphi} = \sum_{i=1}^n (R_{Ri} + R_{Li}) l_i - \gamma \sum_{i=1}^n (R_{Ri} + R_{Li}) L_H \cos \theta \quad (2)$$

$$I_x \ddot{\theta} = \sum_{i=1}^n (R_{Ri} l_{Ri} - R_{Li} l_{Li}) - \gamma \sum_{i=1}^n (R_{Ri} + R_{Li}) L_H \cos \varphi \quad (3)$$

$$M\ddot{x} = D \cos \varphi - \sum_{i=1}^n (R_{Ri} + R_{Li}) \cos \theta \sin \varphi - \gamma \sum_{i=1}^n (R_{Ri} + R_{Li}) \cos \theta \cos \varphi \quad (4)$$

$$R = (z + L\varphi + l\theta)k(t) + (\dot{z} + L\dot{\varphi} + l\dot{\theta})c(t) \quad (5)$$

これらの式を基に MATLAB/Simulink を使用したオリジナルプログラムを開発し、数値解析を行った。プログラムでは8つの転輪と2つのアイドラー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・前後方向の4自由度での加速度について、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A社製3条刈りコンバインとし、カタログ値および実測で得たパラメータを使用した。

3. 模型実験

自脱コンバインの力学モデルの妥当性を検証するために、模型による傾斜地走行実験を行った。実験では、車体の振動周期であるラグピッチを基準に機体寸法を1/14に縮小した模型を作成した。供試機および模型の諸元およびモデルパラメータを表1に示す。模型の重心位置は実機に基づき横転倒角を基準に決定した。模型にはジャイロセンサーを搭載したコントローラ (Genuino 101) を取り付け、ピッチング角の変化をSDカードに記録した。路面傾斜角度を14.5°と21.5°の2種類とし、走

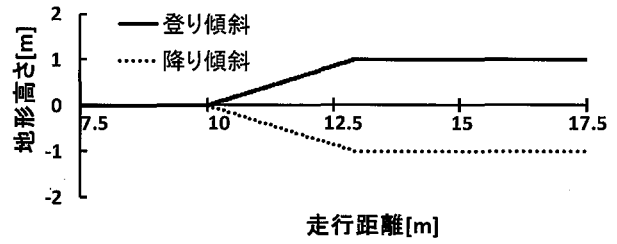


図 2 供試地形 (地形高さ1m・路面傾斜角度20°)
Fig. 2 Test road (1 m high, 20 degrees slope)

行速度 3.3cm/s (5.5Hz; 実機 0.46m/s 相当) で左右転輪を同時に平地から傾斜に進入させ一定速度で降坂させた。実測結果と同条件でのシミュレーション結果について比較を行った。

4. 実機での走行シミュレーション

シミュレーションへの供試地形は、圃場進入時やトラックへの積み降ろしを想定し、剛性水平路面を10m走行した後、0.2m、0.5m、1.0mの地形高さまで、路面傾斜角度5°から60°まで1°ごとに変化させた剛性傾斜路面を走行し、再び剛性水平路面を走行することとした。また、速度については0.08、0.17、0.25、0.42、0.84m/sの一定とし、前進及び後進で登坂、降坂させた。例として、地形高さ1m、路面傾斜角度20°の供試地形を図2に示す。

III 結果・考察

1. 模型実験結果

図3および図4に路面傾斜角度14.5°および21.5°における実測値および解析値を示す。図より、17.0秒において実測値と解析値で傾斜進入時におけるピッチング振動が共に発生しており、ピッチング振動のピークが第一周期で最大かつ同等の値をとっていたことから、実測値と解析値の挙動が一致していることがわかる。また、解析値において傾斜進入時(15.5~17.0秒付近)に緩やかな姿勢変化が見られた。これは、シミュレーションモデルが履帯の張力を加味していないため生じたと考えられる。さらに、実測値において傾斜走行時(図3, 19.5秒付近・図4, 22.9秒付近)で車体ピッチング角の増大が見られた。これは、転輪が履帯接合部を通過したことにより生じたと考えられる。しかし、転倒に繋がる傾斜進入時の最大車体ピッチング角が実測値と解析値で同様の値をとっていたことから、シミュレーションの妥当性が示された。

2. 実機での走行シミュレーション結果

図5に供試地形における前進登り傾斜走行時の動的ピッチング角の一例を、図6に前進降り傾斜走行時の動的ピッチング角の一例を示す。動的ピッチング角は、ピッチング角が正の時に前方が浮き上がり、負の時に後方が浮き上がることを示している。図5、図6から、降

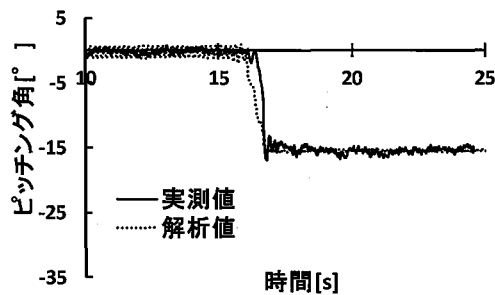


図 3 降坂進入時のピッチング角の実測値および解析値 (路面傾斜角度 14.5°)

Fig. 3 Measured and analysis results of pitching angles for 14.5 degrees down slope

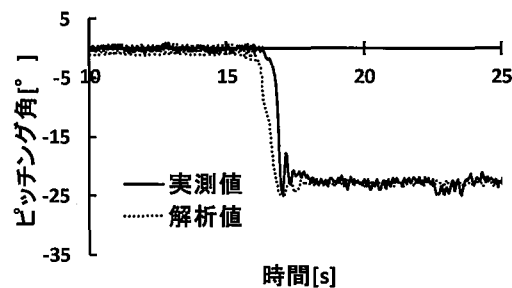


図 4 降坂進入時のピッチング角の実測値および解析値 (路面傾斜角度 21.5°)

Fig. 4 Measured and analysis results of pitching angles for 21.5 degrees down slope

り傾斜進入時および登り傾斜退出時に大きなピッチング振動が発生しており、降り傾斜進入時はピッチング振動が加わることで最大ピッチング角が増加するため、転倒しやすくなると考えられた。

(1) 地形高さによる転倒への影響

図 7~10 に走行速度 0.25 m/s の時の前進降り・後進登り・前進登り・後進降り傾斜走行時の各地形高さにおける最大車体ピッチング角を示す。また、表 2 に各地形高さにおいて転倒に達した路面傾斜角度を示す。

前進降り時の地形高さ 0.5m と 1m で最大車体ピッチング角がほぼ同じになったのは、履帯が傾斜路面のみで支持される場合の挙動が同じであることによると考えられた。最も危険な挙動を示したのは前進降り傾斜進入時 (図 7) で、地形高さ 0.5m および 1m で路面傾斜角度 24° で転倒した。次いで、後進登り傾斜離脱時には、地形高さ 0.5m および 1m で路面傾斜角度 25° であった (図 8)。前進降り傾斜進入時および後進登り傾斜離脱時が危険であった理由は、供試機の重心が前寄りにあり、重心前方の接地長が後方に比べて短かったことによるものと考えられた。これらの結果から、路面傾斜角度が 23° 以下である必要があることが明らかになった。

降り傾斜路面進入時および登り傾斜離脱時の姿勢変化

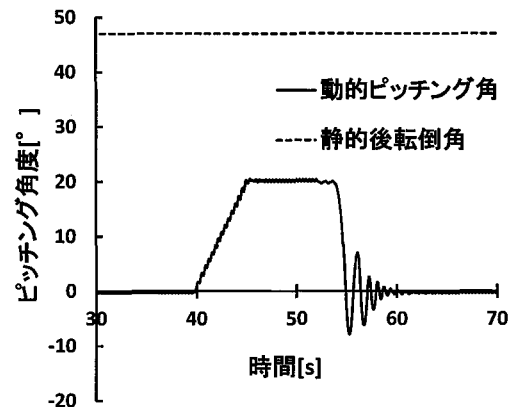


図 5 機体の動的ピッチング角 (前進・登り・走行速度 0.25m/s)

Fig. 5 Dynamic pitching angle of combine harvester (forward, ascending, speed of 0.25 m/s)

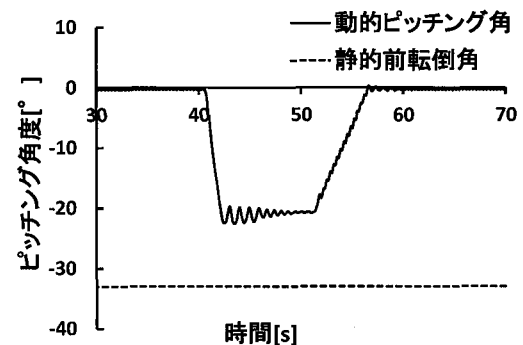


図 6 機体の動的ピッチング角 (前進・降り・走行速度 0.25m/s)

Fig. 6 Dynamic pitching angle of combine harvester (forward, descending, speed of 0.25 m/s)

によって転倒に至っていた。これらの結果は、地形の凸部を走行することになるため、主に接地長に対する重心の前後位置の関係が影響を与えていると考えられた。一方、登り傾斜路面進入時および降り傾斜路面離脱時は地形の凹部を走行するため、接地長に対する重心高さの関係が転倒に影響を与えていると考えられた。

降り傾斜路面進入時においては後進走行で地形高さ 0.5m で転倒に至らなかった (図 10) という結果から、後進走行が安全であることが明らかになった。しかしながら、圃場進入時などでは、降りながら作業を開始する必要があることや、未刈り程に囲まれた刈取り開始時の圃場での旋回が容易ではないことから、前進走行せざるを得ない。よって、路面傾斜角度を十分に小さくできない場合は、安全走行のために十分な強度を持つあゆみ板の使用が必須であることが示された。また、機体重心の前後位置が転倒に影響していることから、グレーンタンク内の籾を完全に排出していない場合は、この限りではないため、予想外の転倒の可能性があると考えられる。

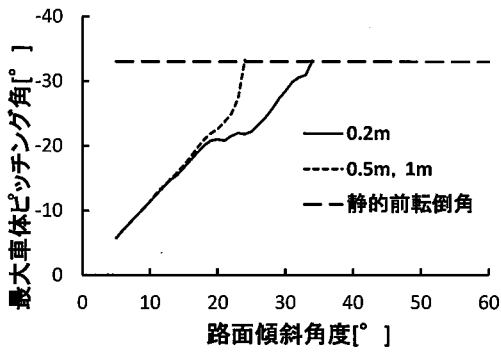


図 7 各地形高さにおける最大車体ピッチング角 (前進・降り・走行速度 0.25 m/s)
 Fig. 7 Maximum pitching angles of combine harvester on examination height (forward, descending, speed of 0.25 m/s)

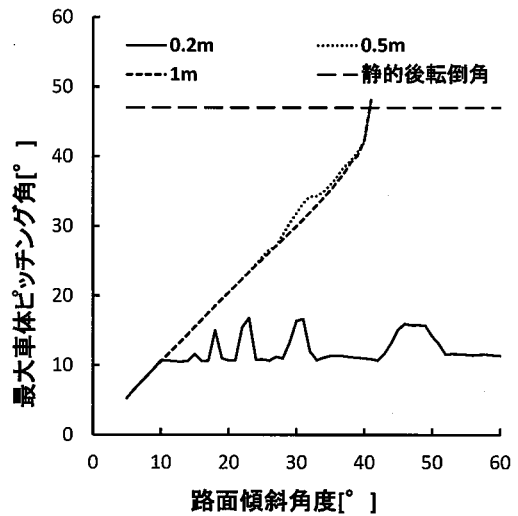


図 9 各地形高さにおける最大車体ピッチング角 (前進・登り・走行速度 0.25 m/s)
 Fig. 9 Maximum pitching angles of combine harvester on examination height (forward, ascending, speed of 0.25 m/s)

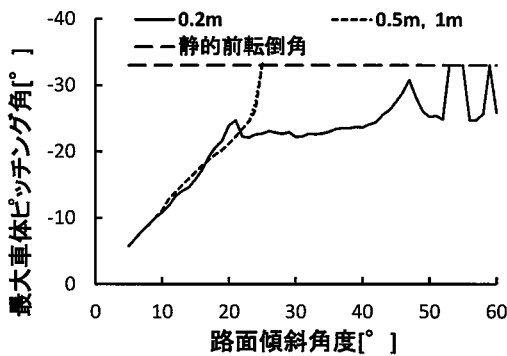


図 8 各地形高さにおける最大車体ピッチング角 (後進・登り・走行速度 0.25 m/s)
 Fig. 8 Maximum pitching angles of combine harvester on examination height (backward, ascending, speed of 0.25 m/s)

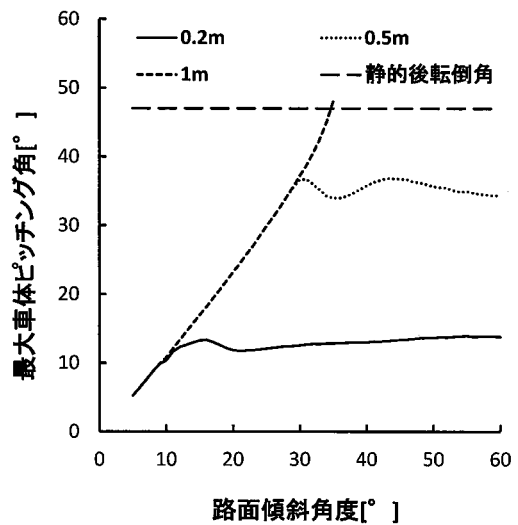


図 10 各地形高さにおける最大車体ピッチング角 (後進・降り・走行速度 0.25 m/s)
 Fig. 10 Maximum pitching angles of combine harvester on examination height (backward, descending, speed of 0.25 m/s)

(2) 走行速度による転倒への影響

図 11~14 に、地形高さ 1m の時の前進降り・後進登り・前進登り・後進降り傾斜走行時の各走行速度における最大車体ピッチング角を示す。また、表 3 に各走行速度において転倒に達する路面傾斜角度を示す。この表より、走行速度 0.25 m/s 以下では転倒に至る路面傾斜角度に大きな違いは見られないものの、前進降りおよび後進登りは、前進登りや後進降り傾斜走行時に比べて転倒の危険性が高くなり、特に、前進降り傾斜走行時には 0.25 m/s を超えると、速度が速くなるにつれ転倒の危険性が大幅に増加することがわかる。よって、0.25 m/s 以下の低速で走行する必要があることが示された。

図 13 に示す前進登り傾斜走行時には、走行速度 0.84 m/s の場合に、路面傾斜角度 24° 以上の離脱時に前転倒する場所が見られた。これらの挙動は、0.42 m/s 以下では見られないことから、前進登り傾斜走行時は走行速度 0.42 m/s より速くなると急激に危険性が増すことが示された。

表 2 各地形高さにおける転倒角 (走行速度 0.25 m/s)
 Table 2 Tipping angles on examination height (speed of 0.25 m/s)

	前進・降り	後進・登り	前進・登り	後進・降り
0.2m	34°	53°	転倒無	転倒無
0.5m	24°	25°	41°	転倒無
1m	24°	25°	41°	35°

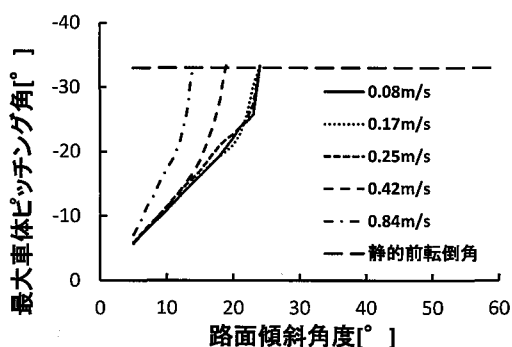


図 11 各走行速度における最大車体ピッチング (前進・降り・地形高さ 1m)

Fig. 11 Maximum pitching angles of combine harvester on examination speed (forward, descending, 1 m high)

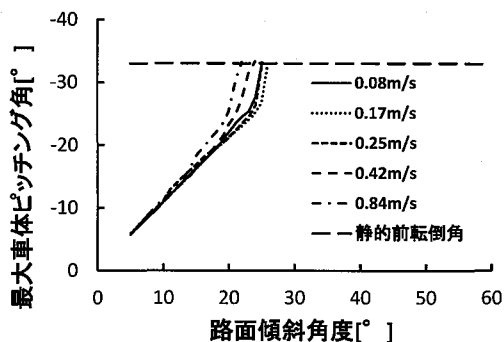


図 12 各走行速度における最大車体ピッチング (後進・登り・地形高さ 1m)

Fig. 12 Maximum pitching angles of combine harvester on examination speed (backward, ascending, 1 m high)

本研究における供試条件は、ISO8608 における路面粗度が極良の場合におけるシミュレーションであり、他機種では重心位置が異なっていること、一般的な農道等における路面粗度が普通や悪の場合があることなどを考慮すると、転倒に至る路面傾斜角度は今回の結果よりもさらに小さい角度で転倒に至ると考えられるため、傾斜地走行においては、可能な限り低速で走行する必要があると考えられる。

トラック等への積み下ろしにおいては、取扱説明書等に示されている通り、地形高さの 4 倍以上のあゆみ板を使用する必要がある。この時、あゆみ板の傾斜角度は 14° となり、本研究結果から速度 0.84 m/s で傾斜角度 15° の斜面走行時に転倒が確認されており、高速であるほど危険性が高い。したがって、十分な強度を有するあゆみ板を使用して、ごく低速 (0.25 m/s 以下) で前進降り、もしくはより安全な前進登り、後進降りを行う必要がある。

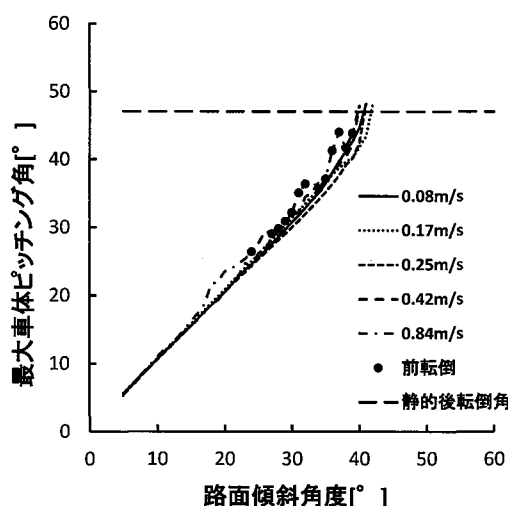


図 13 各走行速度における最大車体ピッチング (前進・登り・地形高さ 1m)

Fig. 13 Maximum pitching angles of combine harvester on examination speed (forward, ascending, 1 m high)

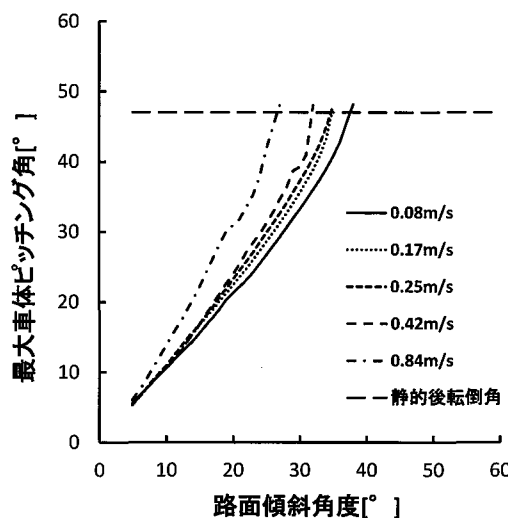


図 14 各走行速度における最大車体ピッチング (後進・降り・地形高さ 1m)

Fig. 14 Maximum pitching angles of combine harvester on examination speed (backward, descending, 1 m high)

表 3 各走行速度における転倒角 (地形高さ 1m)

Table 3 Tipping angles on examination speed (1 m high)

	前進・降り	後進・登り	前進・登り	後進・降り
0.08 m/s	24°	25°	41°	38°
0.17 m/s	24°	26°	42°	35°
0.25 m/s	24°	25°	41°	35°
0.42 m/s	19°	24°	40°	32°
0.84 m/s	15°	22°	24°	27°

IV 結 言

本研究では、自脱コンバインの剛性傾斜路面の登り降りに関する傾斜角度、地形高さおよび速度の限界について検討を行うことを目的とし、前後方向の自由度を加えた4自由度での挙動モデルを立案した。さらに、その挙動モデルに地形情報を入力した数値解析を実施した。その結果、圃場進入時を想定した前進降り進入時、および後進登坂終了時に転倒し易くなることが明らかになった。

また、本供試条件となる極良な路面において、傾斜路面走行時の転倒防止のためには路面傾斜角度を 23° 以下にする必要があること、速度が速くなると危険性が増すため、 0.25m/s 以下の低速で走行する必要があることが明らかになった。

以上より、自脱コンバインにおける傾斜路面走行時の地形・走行条件の安全走行限界を示すことができた。

References

- 井上英二, 坂井 純, 稲葉繁樹, 1990a. 農用ゴム履帯走行部の振動特性に関する基礎的研究 (第1報). 農業機械学会誌, 52 (2), 27-34.
- 井上英二, 坂井 純, 稲葉繁樹, 1990b. 農用ゴム履帯走行部の振動特性に関する基礎的研究 (第2報). 農業機械学会誌, 52 (4), 29-36.
- 井上英二, 坂井 純, 稲葉繁樹, 1990c. 農用ゴム履帯走行部の振動特性に関する基礎的研究 (第3報). 農業機械学会誌, 52 (5), 11-18.
- 光岡宗司, 井上英二, 稲葉繁樹, 原 定広, 福島崇志, 丸谷一郎, 平井康丸, 森 健, 2003. 転輪配置および重心位置が農用ゴム履帯車両に与える影響. 九州大学大学院農学研究院学芸雑誌, 58 (1) (2), 33-41.
- 野口良造, 井上英二, 中野和司, 1998. 農用ゴム履帯走行部の動的パラメータの同定. 農業機械学会誌, 60 (1), 7-17.

(受付: 2017年3月21日・受理: 2017年12月20日・質問期限: 2018年5月31日)

記 号

G	機体重心
g	重力加速度 [m/s^2]
z	機体の垂直方向変位 [m]
x	機体の水平方向変位 [m]
φ	機体のピッチング角 [rad]
θ	機体のローリング角 [rad]
M	機体の質量 [kg]
I_y	ピッチング方向の慣性モーメント [$\text{kg}\cdot\text{m}^2$]
I_x	ローリング方向の慣性モーメント [$\text{kg}\cdot\text{m}^2$]
L_H	重心位置から路面までの垂直距離 [m]
L_i	第1転輪中心から各転輪中心までの水平距離 [m]
L_g	第1転輪中心から機体重心までの水平距離 [m]
l_R	重心位置から右転輪までの水平距離 [m]
l_L	重心位置から左転輪までの水平距離 [m]
l_i	重心位置から各転輪中心までの水平距離 [m]
R_{Li}, R_{Ri}	左右履帯 i 番目の転輪における反力 [N]
$\gamma R_{Li}, \gamma R_{Ri}$	左右履帯 i 番目の転輪における走行抵抗 [N]
D	機体全体の推進力 [N]
$k_{li}(t), k_{ri}(t)$	左右履帯 i 番目の転輪下における動ばね定数 [N/m]
$c_{li}(t), c_{ri}(t)$	左右履帯 i 番目の転輪下における粘性減衰係数 [$\text{N}\cdot\text{s/m}$]