

令和 2 年 6 月 30 日現在

機関番号：55501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06244

研究課題名(和文) 剛体円環モデルを用いたラグ起振力同定手法の確立と農耕車両振動の現象解明

研究課題名(英文) Establishment of lug excitation force identification method by using rigid ring model and clarification of vibration phenomena of agricultural vehicles

研究代表者

藤田 活秀(Fujita, Katsuhide)

宇部工業高等専門学校・機械工学科・教授

研究者番号：50390498

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)：ラグ起振力を同定する為にラグ付きタイヤを3次元剛体円環モデルでモデル化した。転動実験により転動時の車軸の変位と車軸に作用する力(軸力)を3次元的に計測すると共に、この3次元剛体円環モデルを用い、転動実験の計測結果から転動時のラグ起振力を前後力・上下力・横力について同定した。同定されたラグ起振力の特性と軸力の特性を調査し、これらの特性とタイヤの振動特性との相関について調べた。更に、ラグ起振力を入力、軸力を出力とした伝達特性について調べ、タイヤの振動特性が伝達特性に及ぼす影響を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

キャビン型農耕車両では、防振ゴムでキャビンを支える防振構造が採用されている。従って、防振ゴムの最適な配置や防振ゴムの剛性特性といった振動低減対策を検討するには、入力であるラグ起振力の特性を把握し、更にラグ起振力がタイヤを通してどの様に伝達されるかの伝達特性を把握することが重要となる。研究成果により伝達特性にもタイヤの振動特性が影響を及ぼすことが確認され、農耕車両の振動低減対策を検討する上で有用な知見が得られた。

研究成果の概要(英文)：In order to identify lug excitation force, the agricultural tire is modeled by the three-dimensional rigid ring model. The shaft displacement and the shaft force during rolling motion are measured three-dimensionally by rolling test. The lug excitation force in longitudinal, vertical and lateral direction are identified from the measured data. The characteristics of the lug excitation force and shaft force are investigated, and the correlation between these characteristics and the vibration characteristics of the tire are researched. Further, the transfer characteristics between lug excitation force (as input) and shaft force (as output) are investigated, and the influence of vibration characteristics of the tire on transfer characteristics are clarified.

研究分野：工学

キーワード：動的設計

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

近年、農耕車両の作業速度・移動速度の高速化への要望が強まっている。農耕車両用のタイヤには、トレッド部に「ラグ」と呼ばれる大きな突起が千鳥状に配置されている為、舗装路面走行時にはこのラグと路面の接触に起因する振動や騒音が発生することが知られているが、実験や数値モデル等の検討は少なく起振力同定や現象解明は行われていない。高速化によりこの振動や騒音は増大すると考えられ、産業機械としての農耕車両においても振動・騒音の低減は重要な課題になってきている。

これまでの研究で、転動時のタイヤの挙動はタイヤの振動特性の影響を受け、固有振動モードのうち剛体モードのみが転動時の挙動に影響を及ぼすことが確認されたことから、ラグ付きタイヤを面内運動のみ扱うことのできる剛体円環モデルによりモデル化し、転動時のラグ起振力を前後力・上下力について同定した。しかし、ラグ付きタイヤにおいては、ラグが千鳥状に配置されている為、直進走行においても前後力と同程度の横力が発生していると考えられる。そこで、剛体円環モデルを3次元剛体円環モデルに拡張して定式化を行い、これまでに確立されているラグ起振力同定手法を発展させ、車軸方向のラグ起振力を同定する手法を確立するという着想に至った。

### 2. 研究の目的

ラグ付きタイヤを自動車の振動乗り心地解析等で代表的に用いられている SWIFT(Short Wavelength Intermediate Frequency Tyre) model (3次元剛体円環モデル) でモデル化し、ラグ起振力を前後力・上下力・横力について同定すると共に、農耕車両を対象とした振動モデルを構築し、舗装路面走行時の農耕車両の振動との関連について検討することで、タイヤラグに起因する振動の発生メカニズムを解明することを目的とする。

### 3. 研究の方法

#### (1) 転動実験

##### 実験装置

実験ではラグを有する芝刈り機用の小径タイヤを用いており、実験装置の概略を図1に示す。タイヤは片持ち支持された車軸に固定され、ドラムに予め押付け荷重で押付けられている。その状態でドラムを駆動モータで回転させることにより、タイヤは従動的に回転する構造となっている。

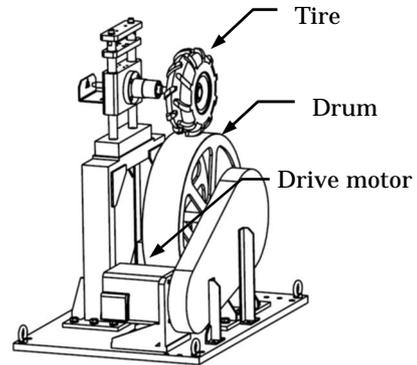


図1 転動実験装置の概要

##### 実験方法

転動実験は、タイヤのドラムへの押付け荷重は200Nとし、タイヤの回転数を50~500rpmまで10rpm刻みで変化させて行い、転動時の軸力(前後力 $F_x$ 、横力 $F_y$ 及び上下力 $F_z$ )と車軸の挙動(前後方向変位 $x_a$ 、軸方向変位 $y_a$ 及び上下方向変位 $z_a$ )をそれぞれ3次元的に計測した。車軸の支持構造を図2に示す。車軸は軸受ホルダーのみにより支持されている。軸受ホルダーには2組の軸受が内蔵されており、また軸受ホルダーは6分力計にボルトで結合されている。この構造により、車軸に作用する力やモーメントは軸受ホルダーのみに伝わるため、車軸に作用する力を6分力計で計測することが可能となる。車軸の挙動については、前後方向と上下方向の変位はレーザー式変位計により計測し、軸方向の変位は渦電流式変位計により計測した。

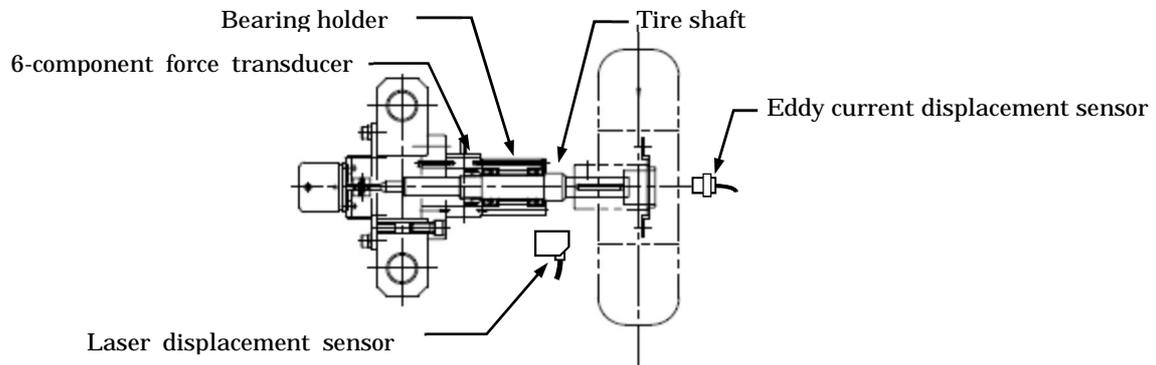


図2 車軸の支持構造

## (2) ラグ起振力の同定

3次元剛体円環モデルは、タイヤ - ホイール系を図3に示すように3つの構成要素(タイヤベルト、タイヤサイドウォール及びホイール)で表しており、ホイール中心に作用する軸力 $F_x, F_y, F_z$ と路面との接触点に作用するラグ起振力 $F_{lugx}, F_{lugy}, F_{lugz}$ を考慮している。タイヤベルトは剛体円環、ホイールは剛体でモデル化されており、タイヤベルトとホイールはタイヤサイドウォールで3次的に接続されている。

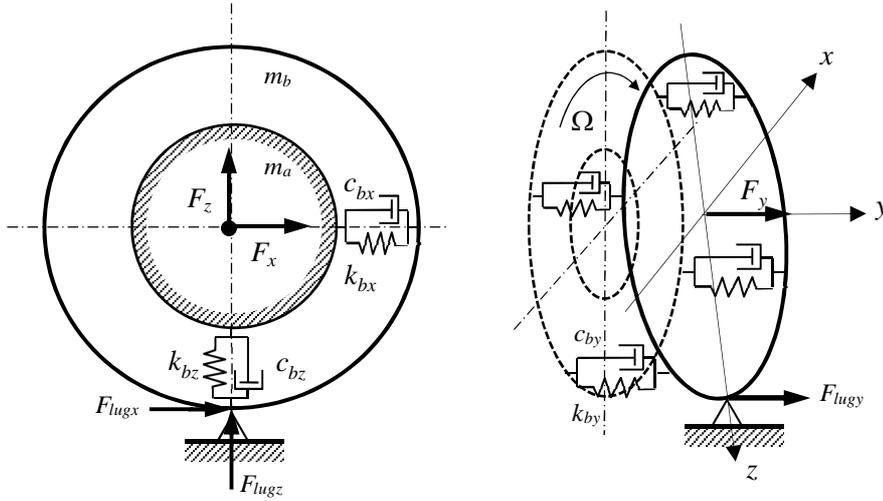


図3 3次元剛体円環モデル

ホイールは、並進運動3自由度と回転運動1自由度を有しており、並進運動に限定して考えるとホイールについての運動方程式は次式となる。

$$F_x(t) = m_a \ddot{x}_a(t) + c_{bx} \{ \dot{x}_a(t) - \dot{x}_b(t) \} + k_{bx} \{ x_a(t) - x_b(t) \} - c_{bz} \Omega \{ z_a(t) - z_b(t) \}$$

$$F_y(t) = m_a \ddot{y}_a(t) + c_{by} \{ \dot{y}_a(t) - \dot{y}_b(t) \} + k_{by} \{ y_a(t) - y_b(t) \}$$

$$F_z(t) = m_a \ddot{z}_a(t) + c_{bz} \{ \dot{z}_a(t) - \dot{z}_b(t) \} + k_{bz} \{ z_a(t) - z_b(t) \} + c_{bx} \Omega \{ x_a(t) - x_b(t) \} + F_0 + F_d$$

タイヤベルトは、並進運動、回転運動共に3自由度を有しているが、並進運動に限定して考えるとタイヤベルトの運動方程式は次式となる。

$$F_{lugx}(t) = m_b \ddot{x}_b(t) + c_{bx} \{ \dot{x}_b(t) - \dot{x}_a(t) \} + k_{bx} \{ x_b(t) - x_a(t) \} - c_{bz} \Omega \{ z_b(t) - z_a(t) \}$$

$$F_{lugy}(t) = m_b \ddot{y}_b(t) + c_{by} \{ \dot{y}_b(t) - \dot{y}_a(t) \} + k_{by} \{ y_b(t) - y_a(t) \}$$

$$F_{lugz}(t) = m_b \ddot{z}_b(t) + c_{bz} \{ \dot{z}_b(t) - \dot{z}_a(t) \} + k_{bz} \{ z_b(t) - z_a(t) \} + c_{bx} \Omega \{ x_a(t) - x_b(t) \} + F_0 + F_d$$

ただし、 $x_a, y_a, z_a$ は車軸の変位、 $x_b, y_b, z_b$ はタイヤベルトの変形量、 $\Omega$ はタイヤの回転速度、 $F_0$ は押付け荷重、 $F_d$ は動的な力である。

式(1)の関係から転動実験で計測した車軸の変位 $x_a, y_a, z_a$ と軸力 $F_x, F_y, F_z$ のデータを用いて、タイヤベルトの変位 $x_b, y_b, z_b$ 及び動的な力 $F_d$ を同定し、同定されたタイヤベルトの変位及び動的な力と計測された車軸の変位を用いて、式(2)の関係からラグ起振力 $F_{lugx}, F_{lugy}, F_{lugz}$ を算出した。

## 4. 研究成果

### (1) 軸力特性とラグ起振力特性の比較

軸力とラグ起振力のスペクトルマップを図4(左側が軸力、右側がラグ起振力)に示す。進行方向がタイヤ回転数、横軸が周波数、縦軸が振幅となる。タイヤラグに起因する振動では、ラグ数 $L$ (本)とタイヤ回転数 $N$ (rpm)から定まるラグ起振周波数が支配的となり、ラグの一次の起振周波数 $f_e$ (Hz)は $f_e = NL/60$ で求められる。スペクトルマップには、破線で1次、2次及び0.5次(軸方向のみ)の起振周波数を示している。

スペクトルマップから、共振的な現象が発生している回転数(図中太線で示す)での支配的な周波数を調べた。いずれの場合も支配的な周波数はラグの起振周波数と一致していることが確認できる。これらの共振時の支配的な周波数を共振周波数と定義することにする。軸力とラグ起振力の共振周波数は良く一致しており、前後方向については3つの共振周波数(40Hz, 53Hz, 69Hz)、軸方向については2つ(31Hz, 73Hz)、上下方向については1つ(65Hz)が確認できた。

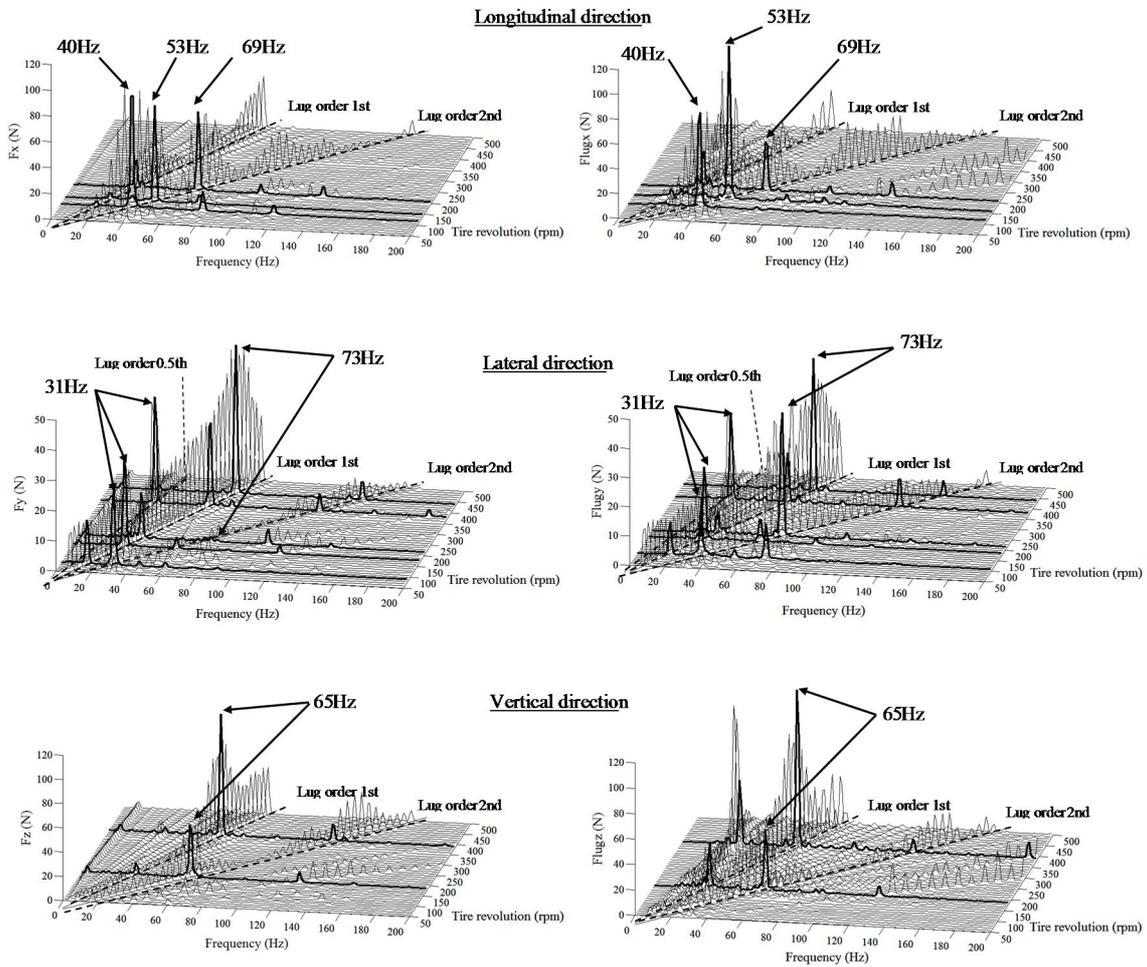
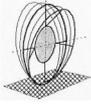
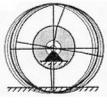
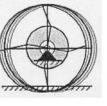
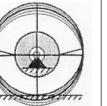
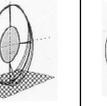
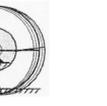


図4 スペクトルマップ

次に、スペクトルマップより確認された共振周波数と加振実験で得られた固有振動数及び固有振動モードを比較したものを表1に示す。表1よりタイヤの固有振動数が軸力及びラグ起振力の共振周波数に対応しており、タイヤの振動特性が軸力及びラグ起振力の共振に影響を及ぼしていることが確認できる。すなわち、共振周波数とそれに対応する固有振動数を比較すると、共振が確認された力の方向とそれに対応する固有振動モードの振動する方向が全ての場合において一致していることが判る。このことから、共振的な現象はラグの起振周波数がタイヤの固有振動数と一致したとき、その固有振動数に対応する固有振動モードの方向の力が励起される現象であると考えられる。

表1 共振周波数と固有振動数及び固有振動モードの比較

Natural frequency	35Hz	48Hz	68Hz	74Hz	85Hz	90Hz
Natural mode	 camber	 rotational (in-phase)	 rotational (anti-phase)	 vertical	 lateral	 longitudinal
Resonance frequency	31Hz	40Hz	53Hz	65Hz	73Hz	69Hz
Force direction	lateral	longitudinal	longitudinal	vertical	lateral	longitudinal

(2) ラグ起振力と軸力の伝達特性

軸力とラグ起振力の共振周波数はこの様に良く一致しているが、一方でスペクトルマップを比較してみると、軸力とラグ起振力でスペクトルの振幅が異なっていることが確認できる。例えば、前後方向に関しては、軸力では3つの振幅がほぼ同じであるのに対し、ラグ起振力では3つの振幅が異なっている。これは、ラグ起振力がタイヤサイドウォールを介して軸力に伝わっていることを考えると、ラグ起振力を入力とし、軸力を出力とした伝達特性が影響していることが考えられる。そこで、全ての共振的な現象が起きているタイヤ回転数について、ラグ起振

力と軸力の伝達関数から振幅の倍率と位相差を調べた。得られた伝達特性を図5に示す。振幅の倍率の図中に示している数値は共振周波数であり、その共振周波数に対応する固有振動モードも併せて示している。また、プロットはラグ起振周波数の次数を区別している。振幅の倍率は、ラグ起振力に対する軸力の倍率を求めているため、1より大きい場合は、ラグ起振力が拡大して軸力に伝わっている状態に対応していると考えられる。また位相差については、 $-90 \sim 90(\text{deg})$ を同位相、 $90 \sim 180(\text{deg})$ 及び $-180 \sim -90(\text{deg})$ を逆位相として評価した。

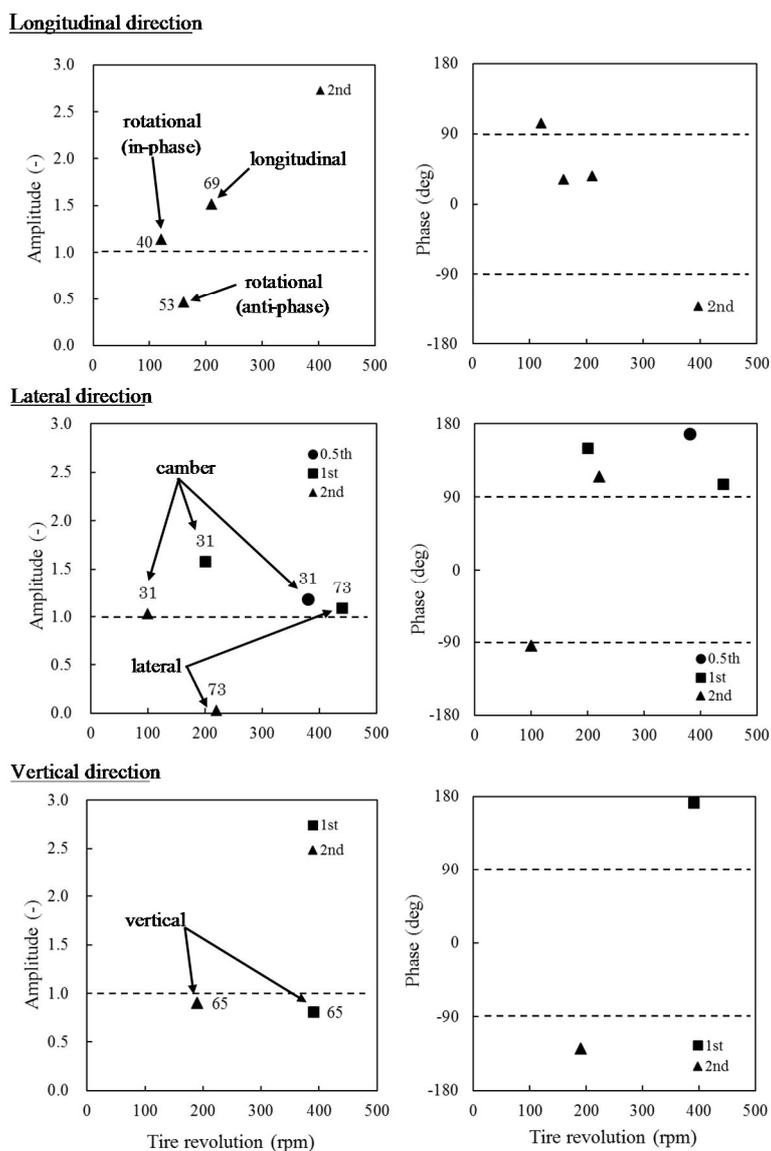


図5 伝達特性

ラグ起振力と軸力の伝達特性として振幅の倍率と位相差を調べた結果、前後方向と軸方向の力は基本的にラグ起振力が拡大して軸力に伝わる傾向があるのに対し、上下方向の力はラグ起振力が減衰して軸力に伝わる傾向にあることが判明した。位相差に関しては、前後方向の力は同位相となるのに対し、軸方向と上下方向の力は逆位相となることが確認できた。ラグ起振力が拡大するか減衰するかについては、対応する固有振動モードの形状と相関があるものと思われ、その意味においてタイヤの振動特性がラグ起振力と軸力の伝達特性に影響を及ぼしていると考えられる。

### (3)まとめ

タイヤラグと路面の接触によるラグ起振力は、ラグ形状や複合材料であるタイヤの物性などで、入力方向と大きさが複雑に変化する。また、シャシへの直接的な入力部位となる車軸への入力には、ラグ部から車軸部までの伝達特性が影響する。これらの複雑な現象を分離・単純化する為、3次元剛体円環モデルを用いてラグ起振力を同定し、ラグ部のラグ起振力と車軸部の軸力の間の伝達特性を明らかにする解析手法を確立した。

## 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 0件）

1. 著者名 Katsuhide Fujita, Takashi Saito, Mitsugu Kaneko	4. 巻 -
2. 論文標題 Influence of Vibration Characteristics of Agricultural Tire on Transfer Characteristics of Lug Excitation Force and Shaft Force	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of the ASME 2019 International Mechanical Engineering Congress and Exposition	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1115/IMECE2019-11055	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 Katsuhide Fujita, Takashi Saito, Mitsugu Kaneko	4. 巻 -
2. 論文標題 Identification of Lug Excitation Force by Using Three-dimensional Rigid Ring Model	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of the ASME 2018 International Mechanical Engineering Congress and Exposition	6. 最初と最後の頁 -
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 -

1. 著者名 Katsuhide Fujita, Takashi Saito, Mitsugu Kaneko	4. 巻 -
2. 論文標題 Parameter Identification of Agricultural Tire by Using Rigid Ring Model	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Proceedings of 24th International Congress on Sound and Vibration	6. 最初と最後の頁 -
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4件（うち招待講演 1件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 藤田活秀, 齊藤俊
2. 発表標題 タイヤ振動特性がタイヤ/路面騒音に及ぼす影響に関する研究（振動特性と軸力特性の相関に関する考察）
3. 学会等名 日本機械学会 2019年度年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 藤本雄介, 藤田活秀, 齊藤俊, 金子貢
2. 発表標題 農用タイヤの振動特性がラグ起振力と伝達特性に及ぼす影響
3. 学会等名 日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 藤田活秀
2. 発表標題 3次元剛体円環モデルによるラグ起振力の同定
3. 学会等名 自動車技術会 将来の車外騒音検討委員会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 藤田活秀, 齊藤俊, 金子貢
2. 発表標題 3次元剛体円環モデルを用いたラグ起振力の同定
3. 学会等名 日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2017
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	齊藤 俊  (Saito Takashi)  (10162207)	山口大学・大学院創成科学研究科・教授    (15501)	