

令和 2 年 5 月 22 日現在

機関番号：13301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H03163

研究課題名(和文) 路面摩擦係数の安定した測定が可能なインテリジェントタイヤおよび走行模擬装置の開発

研究課題名(英文) Development of intelligent tires and a driving simulator for stable measurements of road friction coefficients

研究代表者

立矢 宏 (TACHIYA, Hiroshi)

金沢大学・フロンティア工学系・教授

研究者番号：10216989

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、まず、室内にてタイヤに高負荷を作用させながら任意方向の摩擦力を負荷可能な走行模擬装置を開発し、スリップ条件下においてタイヤの側面に生じるひずみと、タイヤと接地面との間に作用する鉛直荷重、摩擦力との関係を明らかにした。次に、同結果から、路面摩擦係数を求めるための実験式および測定方法を確立した。実際に様々な接地面に対して負荷方向を変化させ、提案する測定方法によって精度良く測定が可能であることを確認した。さらに、実車における走行実験により路面摩擦係数の測定を行い、時速60km程度までの直進条件下で、幅広いスリップ率、種々の路面状況において、定性的に妥当な測定結果が得られることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

タイヤをセンサとして路面摩擦係数を測定する試みは多数実施され、それらでは主にタイヤ底面の变形などから測定を試みていた。しかし、タイヤ底面は局所的な变形が大きく、安定した測定が難しい。これに対し、本研究ではタイヤ側面ひずみが、タイヤと接地面間に生じる鉛直荷重、摩擦力と強い線形関係を有し、複数位置のひずみを用いれば路面摩擦係数が十分測定可能であることを示しており、学術的意義は高い。また、本成果は、すべりやすい路面における自動ブレーキ性能の向上、様々な道路環境下での自動運転の実施を可能とする基礎技術であり、事故の低減や、交通手段としての自動運転の実現に寄与するなど、重要な社会的意義を有している。

研究成果の概要(英文)：In this study, we first developed a laboratory simulator device that can subject a frictional force in any direction while applying a high load on the tire, and we determined the relationship of the strain on the side of the tire with the vertical load, frictional force acting between the tire and the ground surface under slip conditions. Next, from the above results, experimental formulas and measurement methods were established to determine the road surface friction coefficient. Actually, it was confirmed that the measurement method proposed can accurately measure the friction coefficients of various ground planes in arbitrary directions. Furthermore, the road surface friction coefficient was measured by the experiments on actual vehicle running, and it was confirmed that qualitatively reasonable measurement results were obtained under straight driving conditions up to about 60 km/h for a wide range of slip rates and various road surface conditions.

研究分野：ロボット工学

キーワード：インテリジェントタイヤ 路面摩擦係数 先進運転支援システム 走行模擬装置 車 自動ブレーキ 自動運転 タイヤ側面

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

自動ブレーキなど、先進的な安全システムが一般車にも取り入れられつつある。これらは、乾燥路では優れた効果を発揮するが、湿潤路、凍結路などへの対応は未だ難しい。また、すでに広く普及した ABS では、かえって制動距離が延び、危険な場合もある①。その原因は、車速やタイヤ回転速度などを主な情報として制動を行い、路面摩擦状態に応じた制御を行っていないことにある。路面の摩擦係数が走行時に検知できれば、車の安定性維持、危険察知時の自動停止などが多様な状況で適切に行える②。さらに、路面摩擦係数の検知は、自動運転自動車が様々な天候、路面状況において、安定した走行、停止などを行うために不可欠である。

そのため、路面摩擦検知に関する研究が盛んに行われており、それらは大きく 2 つに分類される。一つは、車体の速度、車軸トルクなどから間接的に路面状態を検知しており③、比較的測定は容易であるが、多数のセンサを要し、また、路面状態の識別は行えても、摩擦係数の詳細な測定は難しい。もう一つとして路面と接するタイヤの内部底面にセンサを装着し、摩擦状態を検知する方法が多数検討されている④。前者に比べ、路面状態を少数のセンサで直接測定でき、より精度良く摩擦状態を検知できる。しかし、センサの取り付けが難しく、路面の凹凸などが、測定やセンサの耐久性に影響するため、安定した使用は、かなり困難である。申請者らも、タイヤ底面に装着するセンサを提案し、任意方向の摩擦係数を検知可能とした⑤。しかし、タイヤの加工が必要で、また、タイヤ底面の変形の影響が課題となり、安定した測定は難しい状況であった。

2. 研究の目的

そこで本研究では、路面摩擦係数の検知が安定して行えるインテリジェントタイヤを提案し、また、タイヤの挙動や能力を室内で測定可能な走行模擬装置を用いて同タイヤの検証を行い、さらに、実車を用いた走行試験をととして、その実用化を図ることを目的とした。

3. 研究の方法

I. 室内走行模擬装置を利用し、鉛直高荷重下において、任意方向の摩擦力に対するタイヤ側面のひずみを測定し、負荷とひずみとの関係を明らかにして、タイヤ側面ひずみから鉛直荷重と、摩擦力の大きさと方向を測定可能とする。次に、II. 室内走行模擬装置に装着可能なスリップ率調整機構などを設計製作する。次に、III. 以上の機構などを利用しながら、タイヤの走行模擬実験を室内で実施し、提案する手法の妥当性、精度などを確認する。次に、IV. 実車での走行実験を行うための無線送受信が可能な測定系を構築する。さらに、V. 実車両にインテリジェントタイヤを装着して、走行実験を行い、提案する測定方法によって摩擦係数などを求め、その妥当性を確認する。

4. 研究成果

(1) タイヤ側面ひずみの測定方法

タイヤには路面が低摩擦となりやすい冬期での使用を想定してスタッドレスタイヤを用いた。図 1 に示すように、タイヤとホイールが接している部分から半径方向に 15 および 55 mm の 2 箇所に 3 軸ひずみゲージを、測定方向がタイヤの円周方向、半径方向、およびそれらの中間方向となるように貼付し、ひずみを測定した。以下では、半径方向 15mm の位置のひずみゲージを用いてタイヤ全体に作用する鉛直荷重と摩擦力を求めて、路面摩擦係数の測定を行った結果を示す。なお、結果は略すが半径方向 55mm の位置のひずみゲージによる測定値を用いても同様な結果を得ている。

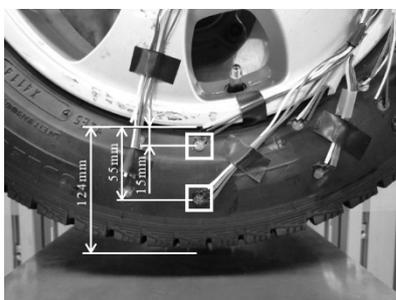


図 1 ひずみゲージの貼付位置

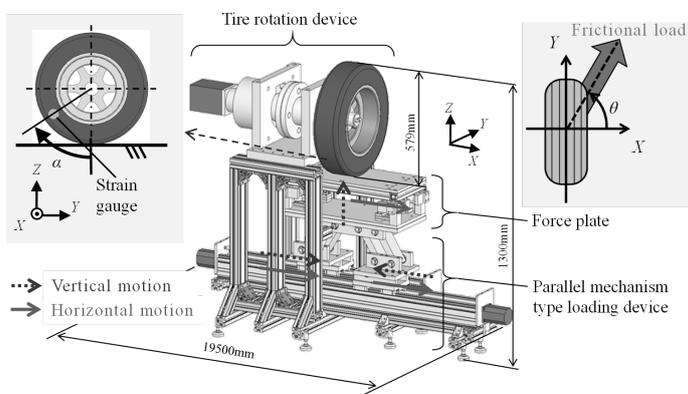


図 2 タイヤ走行模擬装置

(2) 実験装置

車の走行を模擬し、タイヤを回転させながら負荷を与えるために図 2 の装置を用いる。同装置は、タイヤ接地面に鉛直荷重および摩擦力を負荷する 2 自由度パラレルメカニズム式負荷装置、

タイヤを回転させる駆動部、接地面であるとともにタイヤに加わる 3 軸方向の負荷を測定可能なフォースプレートで構成している。パラレルメカニズムは上部に積載したフォースプレートを図 2 中に示す座標系 $O-XYZ$ に対し、 Z 軸方向に上下動および X 軸方向に水平移動させることができる。タイヤは接地面の接線速度が Y 軸方向となるように回転する。なお、タイヤの回転角は図 2 に示す α で、タイヤ接地面に作用する摩擦力の方向を同図に示す θ でそれぞれ表す。

実験時にはフォースプレートを Z 軸方向に上昇させてタイヤ底面に押しあててすることで、タイヤに鉛直荷重 W を加える。この状態で、タイヤを回転させると接地面には前後方向の摩擦力 F_X が作用する。さらに、フォースプレートを Y 軸方向に水平移動させるとタイヤ接地面には横方向の摩擦力 F_Y が作用する。タイヤの回転速度とパラレルメカニズム式負荷装置による水平移動速度を変えることで F_X と F_Y の大きさの比を変化させることができ、 F_X と F_Y の二乗和の平方根で表される摩擦力 F の方向を調整できる。パラレル式負荷装置、タイヤ駆動部は、質量が約 1t の小型自動車をもつ 4 本のタイヤで支持することを想定し、最大 3000N 程度の W および F を負荷可能である。タイヤの回転数は最大 15min^{-1} 、最大周速度は 160mm/s である。なお、フォースプレート天板の材質を変更することでタイヤ接地面の摩擦係数を調整可能である。

本装置で実現可能なタイヤと接地面間のすべり状態は、接地面に対してタイヤが並進移動せずに回転する完全なすべり状態である。

(3) タイヤ側面ひずみと荷重との関係の測定

タイヤに作用する荷重とタイヤ側面に生じるひずみとの関係を以上の実験装置で測定した。測定では、摩擦力 F_X 、 F_Y および鉛直荷重 W をそれぞれ独立に変化させた。

摩擦力 F_X を変化させる実験では、鉛直荷重の目標値を 2500 N とし、摩擦係数の異なるゴムシート、模様付きアクリル板、PTFE 板を接地面としてフォースプレート上に固定した状態でタイヤを回転させることで、 F_X を 3 段階で変化させた。鉛直荷重 W を変化させる実験では、接地面を以上の F_X を変化させる実験と同じとし、摩擦力 F_X の目標値を 1162 N とし、鉛直荷重 W の大きさを 3 段階で変化させた。摩擦力 F_Y を変化させる実験では、鉛直荷重の目標値を 1370 N とし、タイヤの回転を静止した状態でフォースプレートを Y 軸正および負方向に水平移動させ、 F_Y を 6 段階に変化させた。図 2 に示す摩擦力の方向 θ は、 F_X および W を変化させる実験では 180deg 、 F_Y を変化させる実験では $90, 270\text{deg}$ となる。

図 2 に示すタイヤの回転角 α に対する円周方向、半径方向、中間方向のひずみを測定した結果、中間方向のひずみの変化が顕著で、値も大きく、タイヤに作用する力の影響を顕著に表していることを確認した。そこで、本研究では、主に中間方向ひずみの測定値を用いて、接地面に作用する鉛直荷重、摩擦力を求めることとした。

測定結果より求めた、タイヤの回転角 α が 150deg での中間方向ひずみ ε と各荷重との関係を図 3 に示す。図 3(a)、(b) および (c) は、摩擦力 F_X 、 F_Y および鉛直荷重 W に対する結果である。図 3 より、タイヤ側面に生じるひずみと F_X 、 F_Y 、 W の関係は強い線形性を示している。なお、他の回転角、他の方向のひずみにおいても線形性および再現性について同様の傾向であることを確認している。

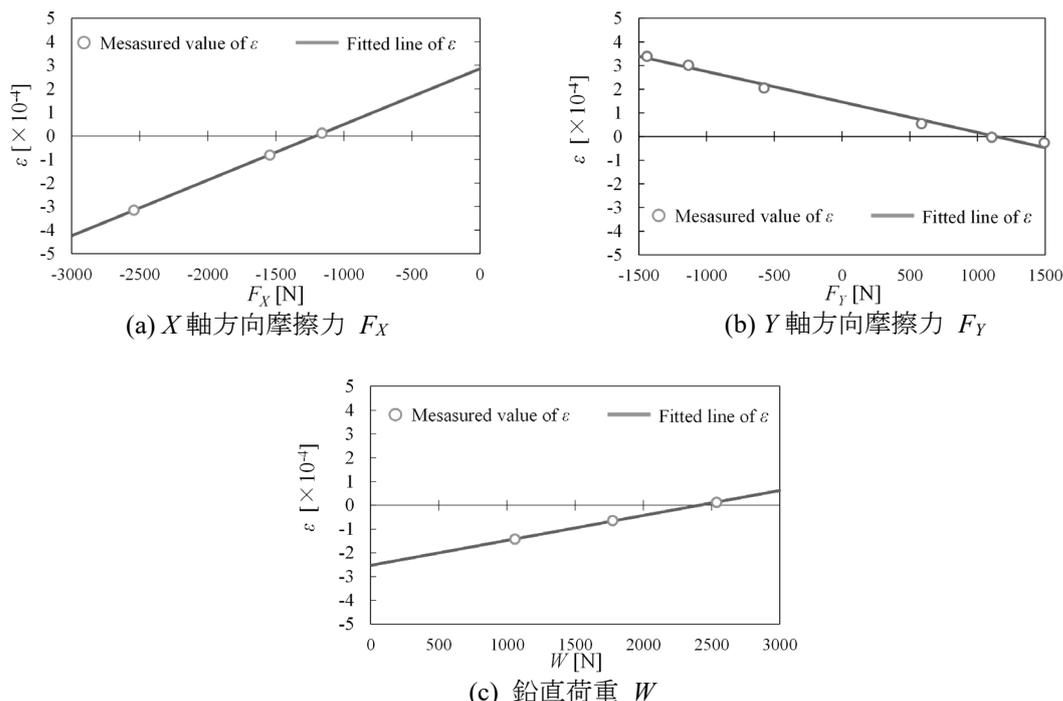


図 3 タイヤ側面に生じるひずみと荷重との関係

(4) タイヤ側面ひずみによる摩擦係数測定のための実験式

以上の結果より、タイヤに作用する荷重と生じる変形の関係は比例し、側面に生じるひずみは各荷重によるひずみの線形和として表される。そこで、タイヤ側面ひずみ $\varepsilon(\alpha)$ と各荷重の関係を式(1)で表す。なお、 $k(\alpha)$ 、 $l(\alpha)$ 、 $m(\alpha)$ 、 $n(\alpha)$ は、あらかじめ決定する実験定数である。

$$\varepsilon(\alpha) = k(\alpha) \cdot F_X + l(\alpha) \cdot F_Y + m(\alpha) \cdot W + n(\alpha) \quad (1)$$

摩擦係数の測定では、互いに異なる回転角 α を 3 つ選択し、それぞれで成立する式(1)を三元一次方程式として連立して、 F_X 、 F_Y および W の値を求める。さらに、得られた F_X と F_Y の二乗和の平方根を W で除すことで摩擦係数 μ を算出する。

なお、選択する回転角の組み合わせによっては連立方程式が正確に解けず、解が得られないことがある。そこで、校正実験において実験定数 $k(\alpha)$ 、 $l(\alpha)$ 、 $m(\alpha)$ 、 $n(\alpha)$ は値を求めるとともに、適切な回転角の組合せを決定する。

(5) 走行模擬装置による摩擦係数測定実験

まず、式(1)に含まれる実験定数を決定する。図 2 の装置を用いれば、同一の接地面を用いて、タイヤに作用する F_X 、 F_Y および W を種々変化させることができる。このとき得られるタイヤ側面ひずみ $\varepsilon(\alpha)$ の測定値と式(1)の値が一致するように定数 $k(\alpha)$ 、 $l(\alpha)$ 、 $m(\alpha)$ 、 $n(\alpha)$ を決定した。

得られた実験定数を用い、ある同一時刻において異なる 3 つの回転角における $\varepsilon(\alpha)$ の測定値を用い、式(1)より三元連立一次方程式を成立させて解くことで、 F_X 、 F_Y および W の値を求める。ただし、上述のように回転角の組合せによっては精度のよい解が得られない。

そこで、可能な回転角の組合せすべてにおいて摩擦係数を測定するとともに、三元連立一次方程式を数値解析などで解く場合に用いる $k(\alpha)$ 、 $l(\alpha)$ 、 $m(\alpha)$ 、 $n(\alpha)$ を要素とする係数行列の条件数を評価した。その結果より、解の精度が高く、条件数が良好となる回転角の組合せを決定した。

以上の結果に基づき、走行模擬装置において様々な条件下で路面摩擦係数の測定を行い、精度などを確認した。図 2 の装置において、接地面をアルミニウム、アクリル、PTFE、油を塗布したアクリルとし、鉛直荷重 W の大きさ、 F_X と F_Y の比を変化させて摩擦係数を測定した。得られた結果を図 4 に示す。図 4(a)、(b)、(c)、(d)は、タイヤ幅方向摩擦力 F_X 、タイヤ周方向摩擦力 F_Y 、鉛直荷重 W 、摩擦係数 μ の結果であり、縦軸が提案する方法による測定値、横軸がフォースプレートによる値で真値とする。

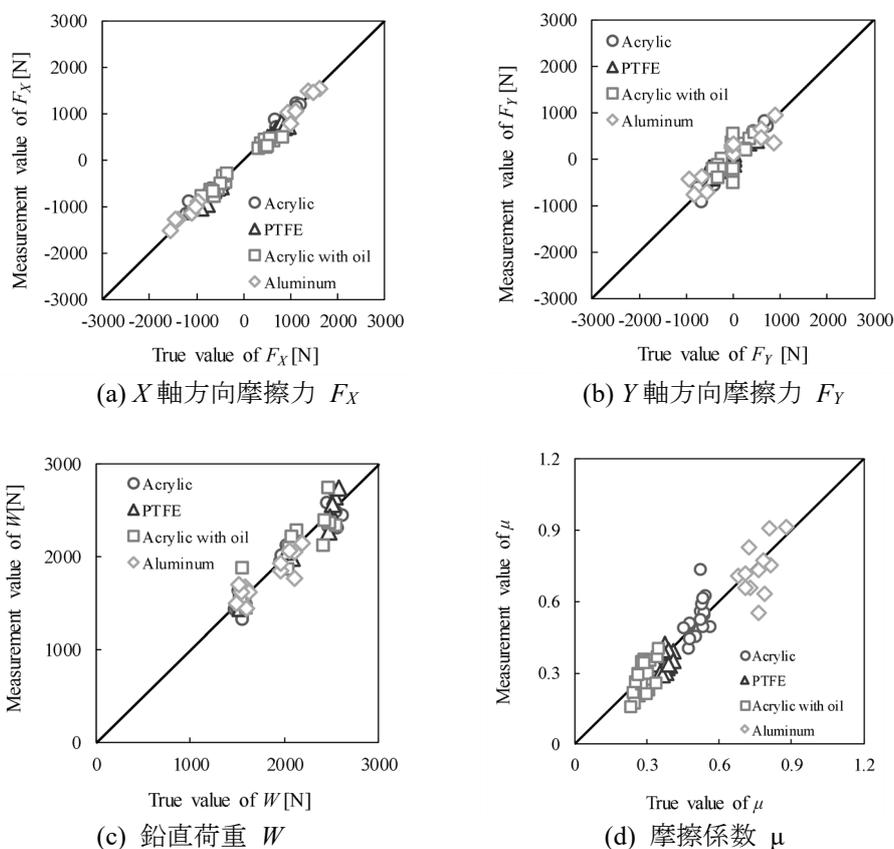


図 4 走行模擬装置による測定結果

図 4(a)、(b)、(c)、(d)より、全体として精度良く鉛直荷重を測定できていることがわかる。 μ の真値と測定値の平均平方二乗誤差は 0.07 である。実際の自動車の走行路面におけるすべり摩擦

係数は、乾燥アスファルトで0.5～1.0、濡れたアスファルトで0.3～0.9、雪路で0.2～0.5、凍結路で0.1～0.2程度であり、以上の結果はこれらの路面を識別することを目的とすれば、良好な精度で測定が行えている。

なお、以上の測定値はタイヤが空転している完全スリップ状態での結果である。そこで、図5に示す、タイヤに対して相対速度を発生させ、スリップ率を調整可能とする機構を図2の装置に加え、種々の条件で測定を行った。結果を図6に示す。図6に示すように完全スリップ状態のみならず、幅広い範囲で測定値は真値によく一致していることがわかる。

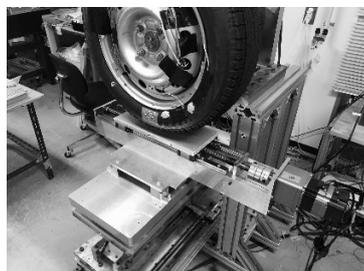


図5 スリップ率調整機構

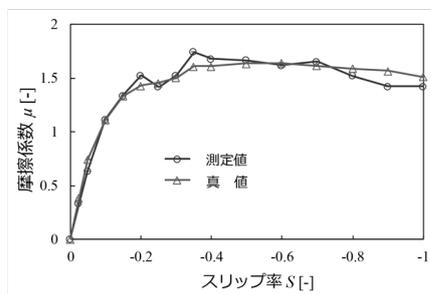


図6 スリップ率調整機構

(6) 実車走行による摩擦係数測定実験

以上で確立したタイヤ側面ひずみによる路面摩擦係数測定法の妥当性を実車走行実験において確認する。車両には図7に示すように小型普通自動車を用いた。同車両のタイヤの側面に生じるひずみと作用力との関係を走行模擬装置で測定し、式(1)の実験定数を決定した。さらに、同タイヤを実験車両に取り付け、写真に示す、ひずみの測定が可能な無線送受信機を取り付け、一輪のタイヤ側面に生じるひずみを走行時に測定可能とした。

測定結果を図8に示す。図8は図7の車両にて構内アスファルト路面を直進走行して測定した鉛直荷重、タイヤ周方向の摩擦力、これらの結果から求めた摩擦係数のタイヤの回転に対する変化を示している。鉛直荷重は4kN前後となっており、車重、搭載機器などの重量から、一輪に作用する荷重として妥当な値となっている。摩擦力は加減速で変化し、加速時には正、減速時には負となっている。また、定速走行時には、タイヤは、ほぼ転がり摩擦状態となるため、摩擦力は0kN近傍の値となっており、路面摩擦係数は、加減速時で0.3～0.4、低速時に0近傍となっている。さらに、湿潤路、雪路では、乾燥路に比べて摩擦係数が減少することも確認している。

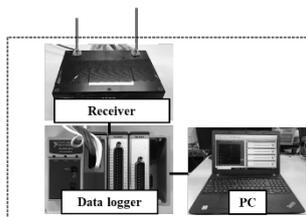


図7 実験車両および測定系

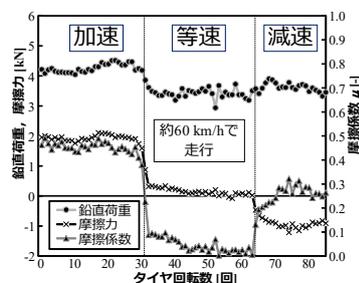


図8 実車測定結果

以上の結果より、実車走行時における路面摩擦係数の真値が不明なため、定性的ではあるが、妥当な結果が得られており、提案する測定方法の有用性が確認された。今後は、車両のシミュレーションなどを用い、測定精度の定量的な確認、また、測定結果の車両走行制御への応用を行う。

<引用文献>

- ① ABS の効果に関する研究, 加来他, 日本交通科学協議会誌, 1(1), 78-81(2001)
- ② 走りやささえるタイヤの秘密, 酒井, 裳華房, 93, 78-81(2000)
- ③ 例えば Estimation of vehicle sideslip angle and tire-road friction coefficient based on magnetometer with GPS, J.H. Yoon et.al, Int.J.of Automotive Tech., 17(3), 427-435. (2016)
- ④ 例えば Rubber-based strain sensor fabricated using photolithography for intelligent tires, R. Matsuzaki・T. Keating・A. Todoroki・N. Hiraoka, Sensor and Actuators, A148, 1-9. (2008)
- ⑤ Development of a tactile sensor to measure tire friction coefficients in arbitrary directions, T.Ise・M.Higuchi・H.Tachiya, International Journal of Automation Technology, 7(3) pp. 359-366. (2013)

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 1件）

1. 著者名 Ise T., Higuchi M., Suzuki Y., Tachiya H.	4. 巻 57
2. 論文標題 Measurement on Friction Coefficients of Tire Grounding Surface in Arbitrary Directions under High-Load	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Experimental Mechanics	6. 最初と最後の頁 1383 ~ 1393
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s11340-017-0309-8	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 立矢 宏、伊勢 大成、樋口 理宏、藤城 慶治	4. 巻 84
2. 論文標題 トレッド内部の変形を利用したタイヤと接地面間の摩擦係数測定	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本機械学会論文集	6. 最初と最後の頁 1 ~ 14
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1299/transjsme.17-00435	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 笹野 智彦、伊勢 大成、樋口 理宏、鈴木 陽介、佐藤 正人、立矢 宏	4. 巻 85
2. 論文標題 タイヤ側面ひずみを用いた路面摩擦係数の測定に関する基礎的研究	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本機械学会論文集	6. 最初と最後の頁 1 ~ 19
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） DOI:10.1299/transjsme.18-00402	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3件（うち招待講演 0件／うち国際学会 0件）

1. 発表者名 笹野 智彦，七澤 裕也，立矢 宏，樋口 理宏，伊勢 大成
2. 発表標題 タイヤ側面ひずみを用いた路面摩擦係数測定に関する研究
3. 学会等名 日本機械学会M&M2018材料力学カンファレンス
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 笹野 智彦, 立矢 宏, 樋口 理宏, 伊勢 大勢, 佐藤 正人, 福田 麻莉乃
2. 発表標題 タイヤ側面のひずみ計測による路面摩擦係数の測定に関する研究
3. 学会等名 日本機械学会M&M2017 材料力学カンファレンス
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 岩井 秀磨, 笹野 智彦, 伊勢 大成, 立矢 宏, 樋口 理宏, 鈴木 陽介
2. 発表標題 種々の条件下におけるタイヤ側面ひずみと作用荷重との関係
3. 学会等名 日本機械学会M&M2019 材料力学カンファレンス
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計2件

産業財産権の名称 路面摩擦係数の推定方法、推定システム及び推定プログラム	発明者 立矢 宏, 近藤康弘	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、2018-002174	出願年 2018年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 路面摩擦係数の推定方法、推定システム及び推定プログラム	発明者 立矢 宏, 樋口理宏, 近藤康弘	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、2018-002175	出願年 2018年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

<p>インテリジェントタイヤ http://da.ms.t.kanazawa-u.ac.jp/rdlab/researches/%e3%82%a4%e3%83%b3%e3%83%86%e3%83%aa%e3%82%b8%e3%82%a7%e3%83%b3%e3%83%88%e3%82%bf%e3%82%a4%e3%83%a4/ インテリジェントタイヤおよび&#12187;&#12175;模擬システムの開発 http://da.ms.t.kanazawa-u.ac.jp/lab/images/research/theme/2017/TireSensor.svg インテリジェントタイヤによる 自動車の先進運転支援システムの開発 http://da.ms.t.kanazawa-u.ac.jp/rdlab/intelligent-tire-and-driving-assist/</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	樋口 理宏 (HIGUCHI Masahiro) (50455185)	金沢大学・フロンティア工学系・准教授 (13301)	
研究分担者	鈴木 陽介 (SUZUKI Yosuke) (20582331)	金沢大学・フロンティア工学系・助教 (13301)	
研究分担者	小塚 裕明 (Hiroaki Kozuka) (80707589)	金沢大学・フロンティア工学系・助教 (13301)	
研究分担者	伊勢 大成 (ISE Taisei) (20734594)	国際高等専門学校・国際理工学科・講師 (53302)	