

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 5 日現在

機関番号：13301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03933

研究課題名（和文）車の走行路面の摩擦係数を予測可能とする μ -Sモデルの確立と操舵制動制御への応用

研究課題名（英文）Establishment of friction coefficient-slip ratio model that enables prediction of the friction coefficient of a vehicle's driving surface and its application to steering and braking control

研究代表者

立矢 宏 (Tachiya, Hiroshi)

金沢大学・高度モビリティ研究所・教授

研究者番号：10216989

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：タイヤの様々な走行状態での測定を先に製作した装置で行うとともに、インテリジェントタイヤによる測定を高精度化する校正条件を明らかにした。ついで、実車による走行実験で、タイヤ基準角の決定が測定精度に影響する問題点を明らかにし、その補正方法を確立するとともに、タイヤ回転角を用いないインテリジェントタイヤによる高精度な測定方法を確立した。さらに、様々な路面、各種走行条件でタイヤと路面間の速度差を表す指標であるスリップ率と、路面摩擦係数との関係を明らかにして、これらの関係を実験式で表し、同式を用いれば路面摩擦係数の予測が可能となり、さらに、車両制御に応用すれば制動距離の短縮が図れることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

車の安全性を高めるため、路面と車の唯一の接点であるタイヤを用いて路面摩擦係数を測定する試みは多数なされてきたが、高価な装置、複雑な測定が必要であった。これに対し、本研究の成果によれば、安価なセンサで実時間での測定が可能となる。また、同成果によって、車の走行状態と路面摩擦係数との関係を明らかにすることができ、さらに、同結果を応用することで制動制御性能の向上も図れる。以上の成果は、車の走行安全性を高め、交通事故などの削減に大きく寄与する。また、高齢化、人手不足などから、自動運転の普及が期待されているが、本成果は様々な状況での自動運転の実現に貢献するものであり、生活環境の維持、高品質化にも貢献する。

研究成果の概要（英文）：Measurements of tire behaviors under various conditions were performed with the previously fabricated equipment, and calibration conditions that improve the measurements accuracy with intelligent tires were clarified. Then, actual driving experiments have revealed the problem of the determination of the tire reference angle affecting the measurement accuracy, and a correction method for this problem has been established. Additionally, a highly accurate measurement method using intelligent tires without using the tire rotation angle. Furthermore, the relationship between the coefficient of road friction and the slip rate, which is an index of the speed difference between the tires and the road surface on various road surfaces and under various driving conditions, was clarified. Obtained relationships were expressed in experimental formulas. The results show that the relationship between the coefficient of road friction and the braking distance can be predicted by using this equation.

研究分野：モビリティ

キーワード：タイヤ インテリジェントタイヤ 路面摩擦係数 スリップ率 ブレーキングスティフネス ADAS 制動制御

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

自動車の走行安全性を高める装備として ABS(Antilock Brake System)や自動ブレーキシステムなど、先進運転支援システム(ADAS)の普及が進んでいる。しかし、これらのシステムは、路面の状況によっては効果を十分に発揮できない。その主な原因は、現在の自動車が走行中に路面のすべりやすさを測定することが難しく、路面の状況をシステムの入力に用いられないためであり、現状、ADASは主に乾燥路を対象として構築されているからである。

自動車が走行中に路面のすべりやすさを表す路面摩擦係数を測定し、ADASの入力として用いることができれば、ABS、自動ブレーキなど、操舵制動制御による安全性能を飛躍的に向上できる。また、測定した路面情報の車両間共有を行うことで運転者への注意喚起が行え、交通事故の防止にも寄与できる。さらに、近年、自動運転の普及が期待されているが、自動車の操舵や制動を様々な天候における道路環境下で安定して行うためには路面摩擦係数の測定が必須になる。

そのため、路面摩擦係数の検知に関する研究は盛んに行われており、それらは大きく2つに分類される。1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する方法であるが、車両、タイヤなどの精密なモデルを必要とし、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1つは、自動車が路面と唯一接するタイヤにセンサを装着し、摩擦状態を検知する方法であり、多数検討されている。これらは前者に比べ、路面状態を直接、詳細に測定でき、路面摩擦係数の測定も期待できる。しかし、タイヤへのセンサの取り付けが難しく、また、タイヤ接地面に作用する荷重とセンサの出力との関係の同定も容易でない。さらに、路面の摩擦係数を測定するのみでは、車両の操舵制動制御の性能を向上させるには不十分である。自動車の定常走行時には、タイヤ接地面と路面間のすべり、すなわち、タイヤと路面間の相対速度はわずかであり、制動または駆動時にタイヤと接地面間の速度差が生じた場合に、その速度差に相関して路面摩擦係数が変化する。安全な操舵制動制御を行うには、このようなタイヤと路面間の速度差に応じて変化する路面摩擦係数の変化傾向を、わずかな走行から検知して、さらに、予測することが必要である。しかし、このような測定および推定を実車走行時に行う技術は未だ開発されていない状況であったことが研究開始当時の背景である。

2. 研究の目的

そこで本研究では、先に製作した装置を用い、室内にて様々な条件でタイヤの走行実験を行うとともに、得られる結果から、これまでに開発した路面摩擦係数の測定が可能なインテリジェントタイヤの測定の高精度化、安定化を実現し、さらに、同タイヤを用いた実車走行実験により、タイヤと接地面間の速度差を表す指標であるスリップ率と、路面摩擦係数 μ との関係を明らかにして、これらの関係を実験式で表すとともに、ADASなどへの応用方法を提案する。

3. 研究の方法

先に、タイヤのサイドウォールに生じるひずみから路面摩擦係数を測定可能な方法を提案し、その妥当性を示した。同方法はそれまで主流であったタイヤ底面の情報を利用する方法に比べて、センサの剥離、断線などが生じにくく、安定した測定が行えた。しかし、高速な測定では耐久性は必ずしも十分でなかった。そこで、ホイールのリムのひずみから路面摩擦係数を測定する方法を検討し、その有用性を確認した。本研究では、まず、ホイールのリムに生じるひずみから、自動車の様々な走行状況において路面摩擦係数を安定して測定する方法を確立する。つぎに、タイヤに作用する荷重が測定可能な試験バスを用いて精度の保証された測定装置と、インテリジェントタイヤによる測定結果を比較して妥当性を検討する。次に、各種路面で実走行時における路面摩擦係数の測定を行う。次に、得られた測定結果から路面摩擦係数 μ とスリップ率 S との関係を求め、インテリジェントタイヤで同関係の測定が可能であることを確認するとともに、 $\mu - S$ 関係を表す実験式を確立する。さらに、同実験式を用いた制御による車両走行シミュレーションを行い、その有用性を示す。

4. 研究成果

(1) ホイールリムのひずみによる路面摩擦係数の測定

図1左に示すように、比較的規格化がなされているホイールのリム部分のひずみを測定することとした。同箇所が生じるひずみと、タイヤ接地面に作用する荷重との関係を開発した図2に示すタイヤ走行模擬装置で測定した。図2の装置は、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軸方向の荷重を測定可能なフォースプレート、タイヤの方向を変える円弧状ルールで構成している。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、 X 軸方向に水平移動させることができる。

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、タイヤに鉛直荷重 F_z 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 X 軸方向に水平移動させることで、タイヤと接地面間の相対速度を調整できる。また、円弧ルールにそってタイヤの方向を変化させることで摩擦力 F_y の影響を調整する。パラレル式負荷装置、タイヤ駆動部は、質量が約1.5tの普通自動車を4本のタイヤで支持することを想定し、最大4000N程度の摩擦力および鉛直荷重を負荷可能である。タイヤの最大周速度は約3.0km/h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。

図2の装置による実験により、ホイールに生じるひずみと、接地面荷重との関係が以下の線形式で表されることを確認した。

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

$\varepsilon(\alpha)$ は、図1右に示すように回転角 α の位置でホイールに生じるひずみであり、 $k(\alpha)$ 、 $l(\alpha)$ 、 $m(\alpha)$ 、 $n(\alpha)$ は実験定数である。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 F_Z 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 F_Z で除すことで路面摩擦係数 μ を算出する。

本研究では、図2の装置が、タイヤと接地面間の相対速度を調整でき、さらに、接地面を種々変更可能であることを利用して、良好な実験定数を得るための校正条件を検討した。すなわち、次式で表されるタイヤと接地面間の相対速度変化率を表すスリップ率 S 、スリップ率 S に対する路面摩擦係数 μ の最大値が異なる路面で校正を行い、それらの結果から、実際の走行条件に近い S が $\pm 10\%$ 程度の範囲で、 μ の最大値が 1.0 程度となる接地面で校正を行うことで精度の良い実験式が得られることを確認した。

$$\begin{cases} \text{駆動時：} S = [(V_V - V_W) / V_W] \times 100 \\ \text{制動時：} S = [(V_V - V_W) / V_V] \times 100 \end{cases} \quad (2)$$

V_V : 車体速度, V_W : タイヤ周速度

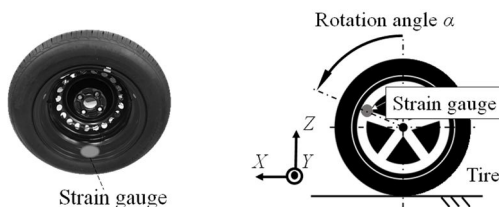


図1 ひずみの測定位置

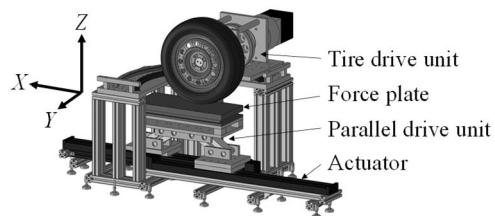


図2 タイヤ走行模擬装置

(2) テストバスによる測定精度確認実験

従来、タイヤサイドウォールの変形などを利用したインテリジェントタイヤの検証を、実車走行実験で行い、その妥当性をシミュレーション 特定条件での真値が測定可能な装置による結果、静的な荷重測定の結果からのみ検証していた。今回、図3に示すテストバス を利用させていただき、インテリジェントタイヤの検証を行った。同バスは、試験用のタイヤを取り付け可能で、同タイヤに作用する鉛直荷重、駆動、制動などを制御できる。さらに、取り付けたタイヤに作用する3軸方向の並進力と回転力が測定可能である。

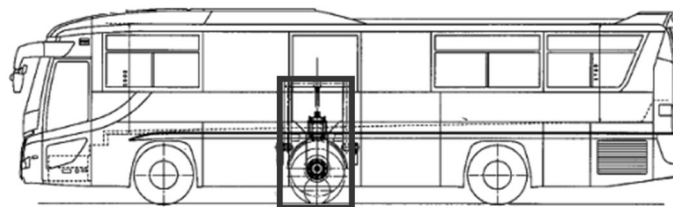
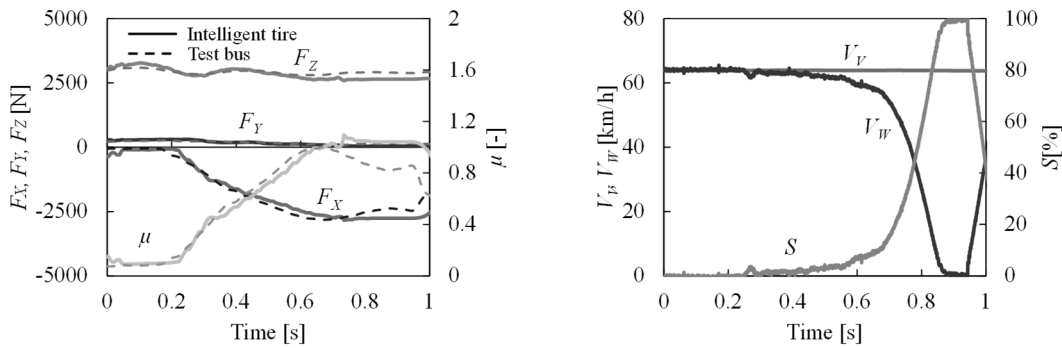


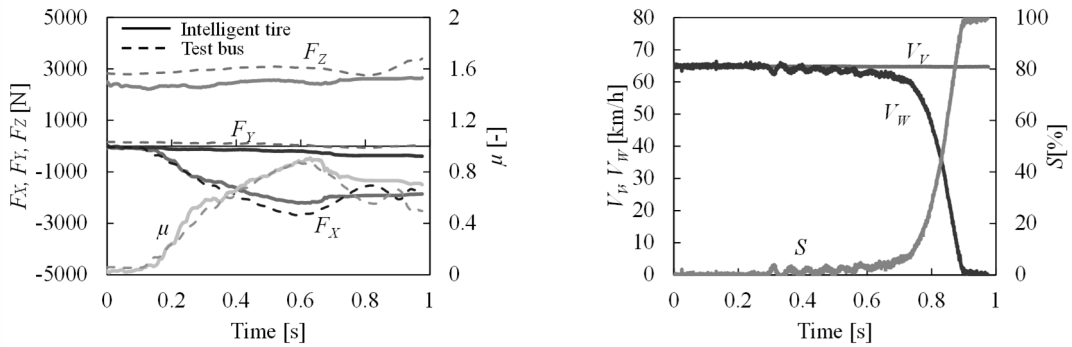
図3 テストバスによるインテリジェントタイヤの測定実験

同バスにて、時速約 65 km/h 走行時にインテリジェントタイヤの制動を行い、タイヤに作用する力、路面摩擦係数の測定を行った。実験は、路面を乾燥路、湿潤路、凍結路を模したバサルトル路それぞれにおいて、直進走行で実施した。インテリジェントタイヤに作用する鉛直荷重は約 3 kN とした。なお、タイヤのサイズは 175 65 R14、種類はノーマルタイヤである。

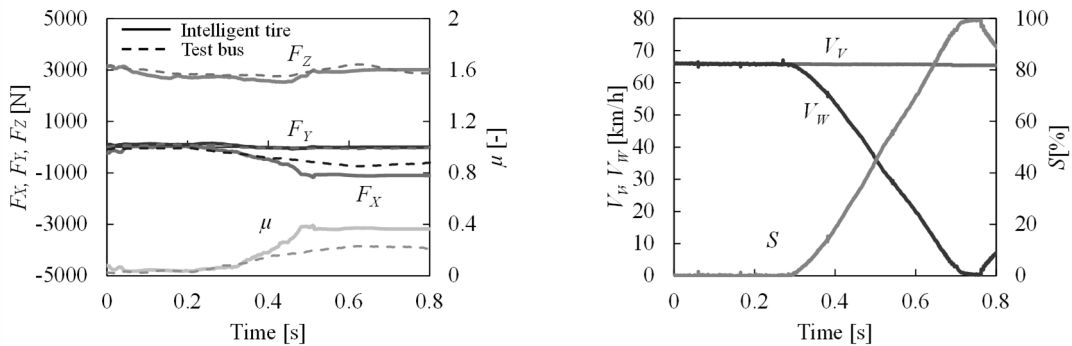
路面が乾燥路、湿潤路およびバサルトル路での測定結果を図4(a)、(b)および(c)に示す。なお、図4の左側がタイヤに作用する3軸方向の接地荷重、同荷重から求めた路面摩擦係数の時間に対する変化であり、右側が測定時の車体速度 V_V 、タイヤ周速度 V_W 、およびこれらの値から式(2)より求めたスリップ率 S の時間に対する変化である。なお、左側の図において実線がインテリジェントタイヤによる測定結果、破線がテストバスで測定した真値とする結果である。



(a) 乾燥路



(b) 湿潤路



(c) バサルト路

図4 接地荷重, 路面摩擦係数測定値(左列), 車体速度, タイヤ周速度, スリップ率(右列)

図4(a)~(c)の左側の図に示すように, いずれの路面においてもインテリジェントタイヤによる測定値は, テストバスによる測定値とほぼ一致している. 乾燥路, 湿潤路, バサルト路の順で, 路面摩擦係数は減少しており, 路面のすべりやすさを捉えられている.

なお, 誤差の主な原因としては, タイヤ回転角 α の測定精度が上げられる. 式(1)に示すように, 本研究で用いる実験式の係数はタイヤ回転角 α によって変化する. よって, タイヤ回転角 α の測定精度が, インテリジェントタイヤによる測定結果に大きく影響する.

今回は, テストバスの車輪速センサの値, タイヤのサイドウォールに生じるひずみの変化等を利用したが, 今後, より安定した測定方法を検討する.

(3) 路面摩擦係数 μ とスリップ率 S との関係の測定および車両制御への応用

以上で得られた結果から, 路面摩擦係数とスリップ率の関係, すなわち $\mu - S$ 関係を求める. 図5および6にテストバスおよびインテリジェントタイヤの測定装置で得られた乾燥路, 湿潤路, バサルト路での $\mu - S$ 関係をそれぞれ示す. インテリジェントタイヤによる $\mu - S$ 関係は真値とするテストバスでの結果とよく一致している. テストバスの測定機は高価, 高重量であり, 普通車への積載は困難であるが, 開発したインテリジェントタイヤは低コストで, 軽量, 小形な測定系で構成されるため, 普通自動車への搭載が可能である.

以上の結果から, 普通自動車で走行中に $\mu - S$ 関係を測定したとして, その結果から ABS の制御を調整することを試みた. 通常の ABS は乾燥路を想定しており, タイヤのロックを防ぐとともに, 路面摩擦係数が最大になるとされているスリップ率が約 20% 付近となるように制御を行っている. これに対し, 車両シミュレーションソフトを用いて得られた $\mu - S$ 関係を用い, 各路面で図6に丸枠で示す μ が最大となるスリップ率を目標に制御を行った. シミュレーションソフトには Carsim を用い, 試験に用いたタイヤサイズに適合した普通自動車で行った走行シミュレーション

ョンを行った。結果を図7に示す。乾燥路,湿潤路では大きな差は無いが,路面摩擦係数が低い,凍結路を模したバサルト路では,制動距離が約10m低減され,大きな効果が期待できることがわかる。

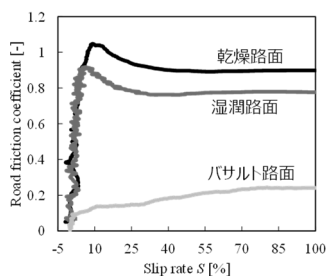


図5 テストバスでの μ - S 関係

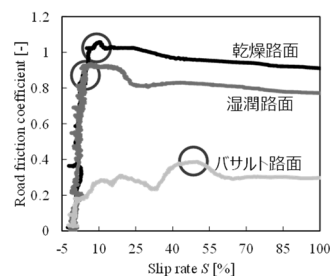


図6 インテリジェントタイヤでの μ - S 関係

ついで,制動制御に大きく影響する μ - S 関係の0から5%程度における傾き,すなわち,ブレーキングスティフネスをインテリジェントタイヤの測定結果より線形近似して求めた結果を図7に示す。点線,破線および長破線はそれぞれ,乾燥路,湿潤路およびバサルト路での値を示している。図7に示すようにブレーキングスティフネスは,乾燥路,湿潤路およびバサルト路において,それぞれ0.19,0.18および0.03程度となった。

乾燥路,湿潤路のブレーキングスティフネスの差は小さく,バサルト路では,他の路面に比べて顕著に小さい。乾燥路,湿潤路の差が少ない原因は,タイヤが比較的高性能で十分な水はけ能力を持っているため,実験での水量では,スリップ率が低い範囲では差が生じにくかったと考えられる。一方,バサルト路ではブレーキングスティフネスの値が顕著に小さいことから,乾燥路などを対象としたADASでは対応が困難なことがわかる。

今回は,比較的新しいタイヤを用いたため,乾燥路,湿潤路で差が生じない結果となったが,タイヤのトレッド表面の摩耗が進むにつれて,その差は顕著になると考えられる。また,低 μ 路であるバサルト路面では図8に示すように乾燥路,湿潤路と比べて顕著にブレーキングスティフネスの値が低くなる。これらの値は,インテリジェントタイヤを用いれば,自動車が増速してスリップ率が高い状態にいたる前に測定可能である。よって,走行初期にインテリジェントタイヤで路面のすべりやすさを検知し,制動力の調整,制動距離などを予測することが期待できる。今後,これらの結果の車両操舵制動制御への応用を図っていく。

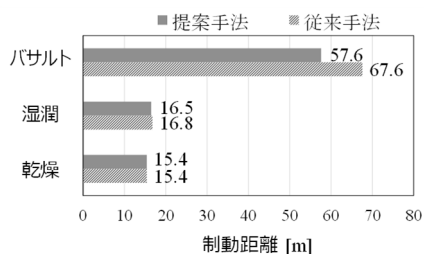


図7 テストバスでの μ - S 関係

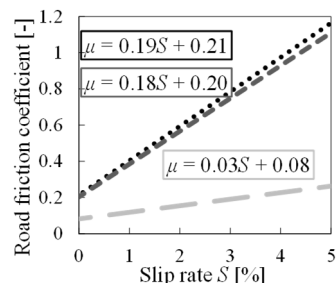


図8 インテリジェントタイヤでの μ - S 関係

<引用文献>

Feng, Y., Chen, H., Zhao, H. and Zhou, H., Road tire friction coefficient estimation for four wheel drive electric vehicle based on moving optimal estimation strategy, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 139(2020), 106416., <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2019.106416>.

Shao, L., Jin, C., Lex, C. and Eichberger, A., Robust road friction estimation during vehicle steering, Vehicle System Dynamics, Vol. 57, No. 4(2019), pp. 493–519.

Yunta, J., Garcia-Pozuelo, D., Diaz V. and Olatunbosun O., Influence of camber angle on tire tread behavior by an on-board strain-based system for intelligent tires, Journal of the International Measurement Confederation 2019; 145: pp. 631–639. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.05.105>.

Mendoza-Petit, M.F., Garcia-Pozuelo, D., Diaz, V. and Olatunbosun, O., A Strain-based method to tire parameters for intelligent tires under complex maneuvering operations, Sensors, Vol.19, No.13 (2019), 2973. doi:10.3390/s19132973.

笹野智彦,伊勢大成,樋口理宏,鈴木陽介,佐藤正人,立矢宏,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,日本機械学会論文集, Vol.85, No877(2019), DOI: 10.1299/transjsme.18-00402.

横井大亮,上野雄一,据え切り操舵力解析用タイヤモデルの開発,自動車技術会論文集, Vol.46, No.6 (2015), pp. 1087–1092.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1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 笹野 智彦、立矢 宏、樋口 理宏、鈴木 陽介、伊勢 大成、七澤 裕也	4. 巻 21
2. 論文標題 ホイールの変形を利用したタイヤ接地面作用荷重の測定に関する基礎的検討	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 実験力学	6. 最初と最後の頁 331 ~ 337
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.11395/jjsem.21.331	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 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 2件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 泉谷 祐樹, 松元 風樹, 鈴木 陽介, 樋口 理宏, 立矢 宏
2. 発表標題 インテリジェントタイヤによる 路面摩擦係数のリアルタイム測定
3. 学会等名 日本機械学会 M&M 2022 材料力学カンファレンス
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 戸嶋 恒太, 岡 廉一郎, 小坂橋 尚樹, 鈴木 陽介, 樋口 理宏, 立矢 宏
2. 発表標題 サイドウォールの変形を用いた路面摩擦係数の測定
3. 学会等名 日本機械学会M&M2021材料力学カンファレンス
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岡 廉一郎, 戸嶋 恒太, 小坂橋 尚樹, 鈴木 陽介, 樋口 理宏, 立矢 宏
2. 発表標題 ホイールの変形を用いた路面摩擦係数の測定
3. 学会等名 日本機械学会M&M2021材料力学カンファレンス
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 立矢 宏
2. 発表標題 路面摩擦係数が測定可能なインテリジェントタイヤの研究
3. 学会等名 自動車技術会第7回タイヤ路面摩擦特性部門委員会（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 立矢 宏
2. 発表標題 タイヤおよびホイールの変形を利用した路面摩擦係数の測定技術
3. 学会等名 自動車技術会 シンポジウム-タイヤ/路面摩擦特性とその周辺技術-（招待講演）
4. 発表年 2024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	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 Yousuke) (20582331)	金沢大学・フロンティア工学系・准教授 (13301)	

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
---------	---------