

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 3 日現在

機関番号：13301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560158

研究課題名(和文) 自動車の走行安全性を高めるタイヤ接地面の摩擦状態測定用触覚センサの開発

研究課題名(英文) Development of a tactile sensor that can measure frictional conditions between tires and roads in order to improve driving safety of cars

研究代表者

立矢 宏 (TACHIYA, Hiroshi)

金沢大学・機械工学系・教授

研究者番号：10216989

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円、(間接経費) 1,260,000円

研究成果の概要(和文)：鉛直荷重，摩擦荷重と，摩擦荷重の方向が同時に測定可能な簡便な触覚センサを提案し，同センサをタイヤに取り付け，路面の摩擦係数を測定することを試みた．そのために，タイヤに任意方向の高荷重を負荷可能な走行模擬装置を開発した．同装置を用いて，センサを装着したタイヤを用い，摩擦係数測定実験を行った結果，タイヤの変形の影響を考慮することで，高荷重下において，広い範囲の摩擦係数を精度よく測定可能であることを確認した．

研究成果の概要(英文)：The present study proposed a simple tactile sensor that can measure vertical load, frictional load and its direction simultaneously and tried to equip a tire with the proposed sensor so as to measure the frictional coefficient of road. In order to confirm the availability of the sensor, a simple driving simulator that can apply high-load to a tire in arbitrary direction were developed. By using the simulator, the study has measured the frictional coefficients of various surfaces by using the tire equipped with the tactile sensor. As a result, it has been confirmed that the sensor can measure wide range of frictional coefficients under high-load by considering the deformation of the tire.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・設計工学・機械機能要素・トライボロジー

キーワード：触覚センサ インテリジェントタイヤ 摩擦係数 走行安全性 走行模擬装置

1. 研究開始当初の背景

ABS など車の安全技術の普及が著しいが、現状では路面状況に適した走行制御が必ずしも行えず、制動距離が延びるなどかえって危険な場合もある。その主な原因は路面の摩擦係数を測定できていないことにある。走行時に路面の摩擦係数がわかれば、最も効果的な制動・操舵などの運転支援や、危険物を察知した時の自動停止などが様々な路面状況で適切に行える。そこで、タイヤに取り付け走行時に路面の摩擦係数を測定可能とするセンサの開発が多数試みられている。しかし、いずれも複雑な構造のセンサ、付帯設備などを必要とし、実用化は困難な状況であった。

2. 研究の目的

本研究では車の事故防止技術の発展を目指し、走行時のタイヤ接地路面のすべり摩擦係数が測定可能な触覚センサを開発することを目的とした。そのために、まず、小型かつ構造が単純で、廉価でありながら、接触面に生ずる鉛直力、摩擦力とその方向が同時に測定可能な触覚センサを開発することとした。次に、同センサを取り付けたタイヤに対して、走行時を模擬した任意方向の高負荷を与えられる装置の開発を目指した。さらに、同装置を用いて提案するセンサを取り付けたタイヤで実験を行い、摩擦係数の測定方法を確立し、その実用性を明らかにすることを目的とした。

3. 研究の方法

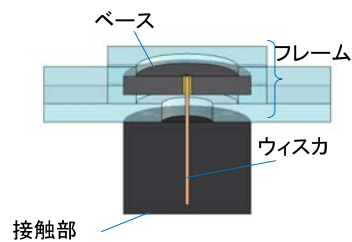
(1) カンチレバーを利用した、鉛直荷重と、摩擦力および摩擦力の方向が測定可能な簡易構造の触覚センサを検討した。同センサに関して、カンチレバー先端に作用する荷重と、出力の関係を数値解析、実験により明らかにして、鉛直荷重、摩擦力とその方向を求める方法の確立を行った。

(2) 提案する触覚センサをタイヤに取り付け、実際の車の走行に近い状態で、摩擦係数が測定可能であることを確認するため、タイヤに任意方向の高負荷を与え、走行状態を模擬可能な実験装置の開発を行った。

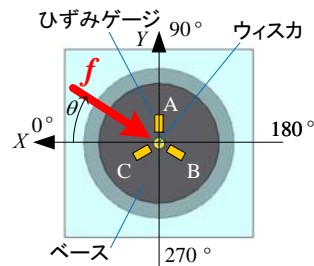
(3) 開発したタイヤ走行模擬装置を用い、センサを取り付けたタイヤに任意方向の高負荷を与え、走行時のスリップ状態を模擬し、各種路面で摩擦係数の測定実験を行い、提案するセンサの有用性を確認した。

4. 研究成果

(1) 鉛直荷重と、摩擦力および摩擦力の方向が測定できる簡易な触覚センサとして、図1に示すようにウイスカと呼ぶカンチレバーを、ベースとする弾性平板に取り付け、その先端に円筒状のゴムを接触部として取り付ける構造を提案した。ベースには、3枚のひずみゲージを、ウイスカ取り付け位置を中心とする円周上に半径方向のひずみを測定可能となるように  $120^\circ$  おきに貼付している。

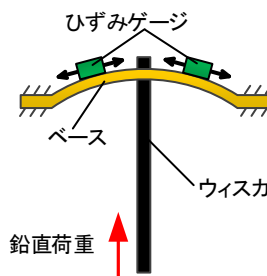


(a) 断面図

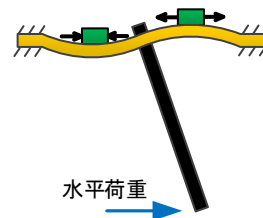


(b) 上面図

図1 触覚センサ



(a) 垂直荷重に対する変形



(b) 水平荷重に対する変形

図2 ベースの変形概略

側面から見た概略である図2に示すように、接触部に作用する鉛直荷重に対してベースは図2(a)に示すとおり凸状に変形し、ひずみゲージ貼付部には引っ張りのひずみが生ずる。また、水平荷重に対してベースは図2(b)に示すとおりS字状に変化し、一方のひずみゲージ貼付部には引張、他方には圧縮のひずみが発生する。実際には、接触部に鉛直荷重および摩擦力が同時に作用するため、ひずみゲージ貼付部のひずみは以上の変形を重ね合わせた結果となる。よって、各ひずみゲージで検知されるひずみの値から、接触部に作用する鉛直荷重および摩擦荷重の値をそれぞれ推定し得る。また、摩擦力の負荷方向により、各ひずみゲージ貼付部で生ずるひずみの大きさは変化する。そこで、3箇所

みを測定し、各箇所のひずみの値の相対的な関係を利用することで、水平荷重の負荷方向を検知し得ると考えた。実際に、ウイスカの先端に水平荷重を加え、その方向  $\theta$  を変化させ、ひずみゲージ A, B および C に生ずるひずみ  $\varepsilon_{sA}$ ,  $\varepsilon_{sB}$  および  $\varepsilon_{sC}$  を測定したところ、図 3 に示すように負荷方向  $\theta$  に対し正弦波形状に変化することを確認した。また、振幅の中心値はウイスカ先端に作用する鉛直荷重  $w$  に比例して増加し、振幅の大きさは摩擦力に相当する水平荷重  $f$  に比例して増加した。

以上の結果から、鉛直荷重  $w$ 、摩擦力  $f$ 、摩擦方向  $\theta$  とセンサ出力  $\varepsilon_{si}$  の関係の近似式として式(1)を提案した。なお、式中の  $a_i, b_i, k_i, l_i, \phi_i$  は校正実験によりあらかじめ決定する定数である。

$$\varepsilon_{si} = G_i \sin(\theta + \phi_i) + H_i \quad (i=A, B, C) \quad (1)$$

ただし

$$G_i = k_i f + a_i, \quad H_i = l_i w + b_i$$

センサによる測定時には、各ひずみゲージにより検知するひずみ  $\varepsilon_{sA}, \varepsilon_{sB}, \varepsilon_{sC}$  を式(1)に代入し、ニュートン法などの数値解法を利用して鉛直荷重  $w$ 、摩擦力  $f$ 、摩擦方向  $\theta$  を算出する。さらに、 $f$  を  $w$  で除することで摩擦係数  $\mu$  を求める。

以上のようにして、摩擦係数を求めるために、まず、校正実験を行い  $a_i, b_i, k_i, l_i, \phi_i$  を決定する。図 4 に校正装置の概略を示す。タイヤから一部を切り出し周囲のトレッドを切除した試験片にセンサを取り付け、これをロードセルの先端に取り付ける。センサ接触部は  $X, Z$  方向に可動するテーブル上面に接触させる。鉛直荷重  $w$  の負荷は、押し付け力により調整し、摩擦力の負荷はテーブルを  $X$  軸方向に一定速度で移動することにより行う。

鉛直荷重  $w$  を 5, 10, 15, 20N とし、負荷方向  $\theta$  を  $0 \sim 360$ deg の範囲で  $45$ deg ごとに変更し、タイヤ片に摩擦を負荷する。このときのセンサ出力およびロードセル出力を測定する。

以上の結果において、図 3 と同様に正弦波形状となったひずみゲージ A, B, C の出力波形から、その振幅および中心値と、摩擦力および鉛直荷重の関係を求めた。これらに対し最小二乗法による線形近似を行い、表 1 のように実験定数を決定した。同値を用いて、摩擦係数が既知である複数の対象面で測定実験を行い、式(1)および表 1 の実験定数の妥当性を確認した。

(2) 図 5 に示すようにタイヤに装着した状態での荷重の値や方向に関して実車に近い条件で測定を行うために、図 6 に示す、高荷重や様々な方向への摩擦力が負荷可能な実験装置を開発した。装置は、タイヤに鉛直荷重および接地面内の摩擦力を負荷する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、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する。

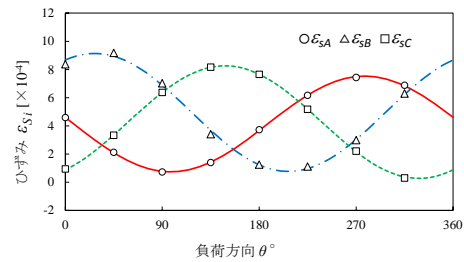


図 3 水平荷重の方向に対するひずみ

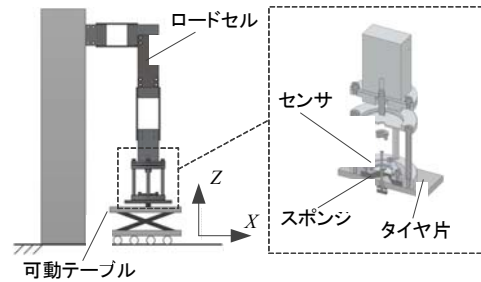


図 4 校正実験装置

表 1 実験定数値

$i$	$G_i = k_i \cdot w + a_i$		$\phi_i$ [deg]	$H_i = l_i \cdot f + b_i$	
	$k_i$ [ $\times 10^4$ /N]	$a_i$ [ $\times 10^{-4}$ ]		$l_i$ [ $\times 10^3$ /N]	$b_i$ [ $\times 10^{-4}$ ]
A	0.156	-0.245	171.9	0.216	-0.266
B	0.191	-0.247	63.2	0.258	-0.259
C	0.183	-0.265	302.6	0.230	-0.452

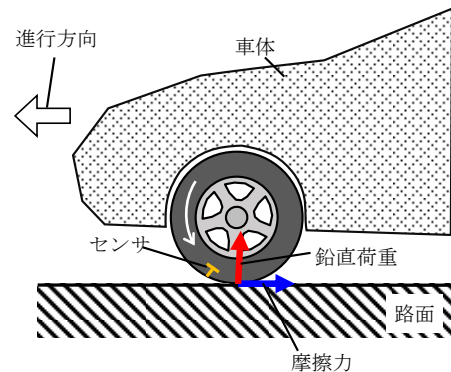


図 5 センサの車への取り付け

タイヤ内部には、図 1 のセンサを、図 1(b) に示す  $90^\circ$  方向が車の進行方向となるように取り付け、スリップ時の摩擦係数を測定する。

パラレルメカニズム式負荷装置は 2 自由度平面 8 節機構であり、図 7(a) に示すように 2 つの可動子の距離を縮めることで負荷装置上部が上昇する。負荷装置上部の上昇により、フォースプレートの天板をタイヤに押し付け鉛直荷重を負荷する。また、図 7(b) に示すように 2 つの可動子の距離を一定に保ちながら移動することで、負荷装置上部が水平移動する。鉛直荷重を負荷した状態で負荷装置上部を水平移動することで、タイヤに天板上で相対的に横滑りを生じさせ、回転軸方向の摩擦力をタイヤ接地面に負荷する。さらに、鉛直荷重を負荷した状態でタイヤを回転させることで、タイヤは天板上を滑りながら回転し、タイヤ回転周方向の摩擦力を負荷可能で

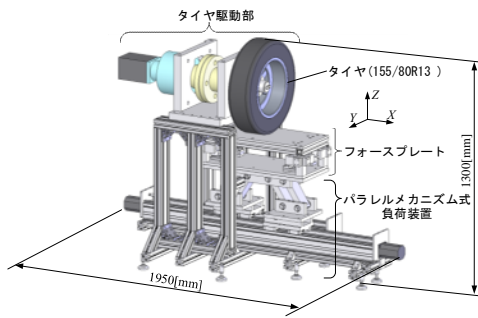
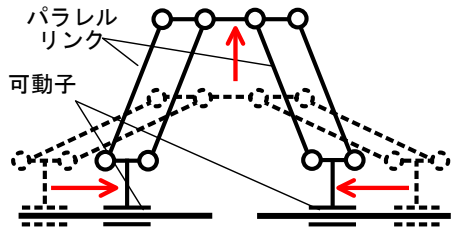
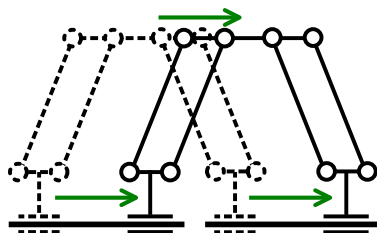


図6 タイヤ走行模擬実験装置



(a) 鉛直荷重負荷状態



(b) 水平荷重負荷状態

図7 パラレルメカニズム式負荷装置

ある。したがって、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作用力を調整することで、タイヤ接地面の任意方向に摩擦力を負荷可能である。

パラレルメカニズム式負荷装置、タイヤ駆動部は、小型自動車 1t を 4 本のタイヤで支持することを想定し、最大 2500N の鉛直荷重を負荷可能な仕様とした。

(3) タイヤにセンサを図 8 に示すように取り付け、図 6 の装置を用いて摩擦係数の測定実験を行う。予備実験の結果、センサ接触部の先端面、すなわち接触面とタイヤのトレッド表面とが同じ高さである場合、車両本体の荷重がタイヤに作用時に、センサに過大な負荷が発生することを確認した。すなわち、接触面は、図 9 に示すように、トレッド表面からタイヤの内側へ若干量引き込むことが望ましい。この値を引き込み量と呼び、その適切な値を検討した結果、本実験の範囲では引き込み量を 1 mm とすれば安定して測定を行えることを確認した。

以上の条件でセンサをタイヤに取り付け、実際の車両における使用を模擬した摩擦係数の推定実験を行った。実験条件は、摩擦速

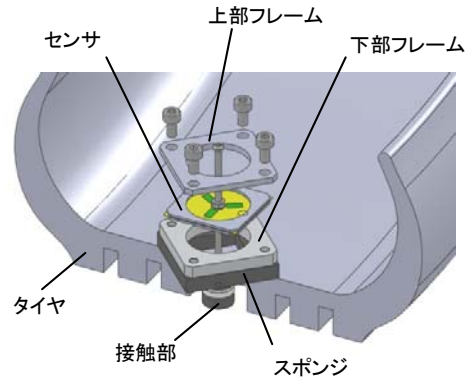


図8 タイヤへのセンサ装着方法

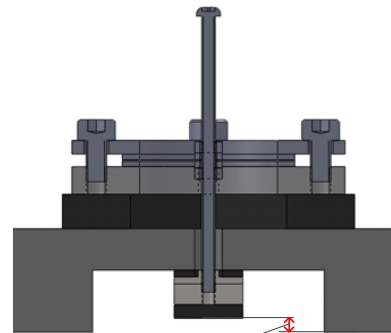


図9 センサの引き込み量



図10 路面摩擦係数測定実験

度を 30[mm/s]、摩擦方向を 15[deg]刻みに 45 ~ 135, 225 ~ 315[deg]の範囲で変化させ、鉛直荷重は 2500[N]とした。摩擦面は、高 $\mu$ 路、中 $\mu$ 路、低 $\mu$ 路として、アルミ板、POM板、テフロン板の3路面を用いた。実験の様子を図 10 に示す。

摩擦係数 $\mu_s$ の測定結果を図 11 に $\Delta$ で示す。エラーバーは標準偏差である。図 11 に示すように測定値は真値を大きく上回り、ばらつきも大きい。また、図 12 に示すように、摩擦力の負荷方向により測定値が変動する。

この原因として、タイヤの変形により、ベース部に生ずるひずみの影響が考えられる。そこで、センサの接触部を取り外して同じ実験を行い、ベースの変形のみにより発生している鉛直荷重および摩擦力の値を求めた。結果を図 13 に示す。

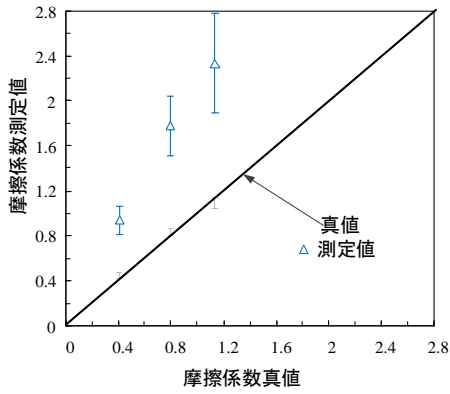


図 11 摩擦係数の測定結果

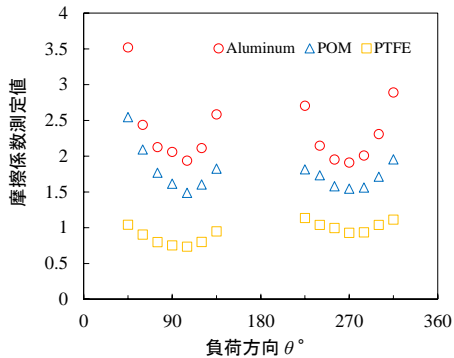
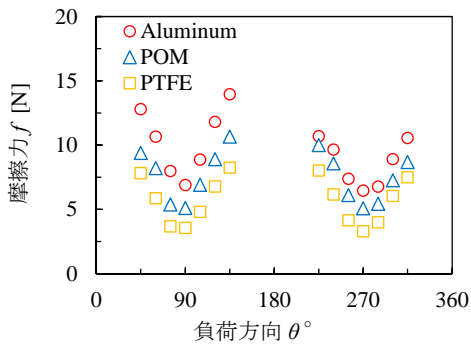
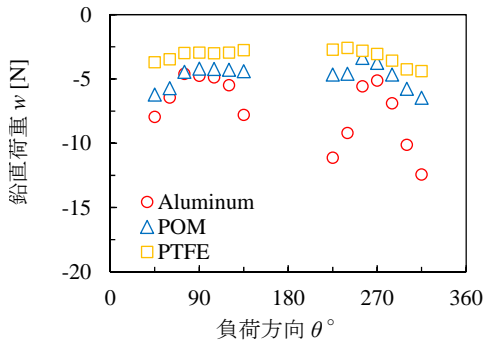


図 12 負荷方向に対する測定値の変化



(a) 摩擦力



(b) 鉛直荷重

図 13 タイヤ変形のみによる影響

表 2 補正式の実験定数

$\alpha$	$p$	$q$	$r$ °	$s$
0.30	0.19	2.14	-125.4	-0.47

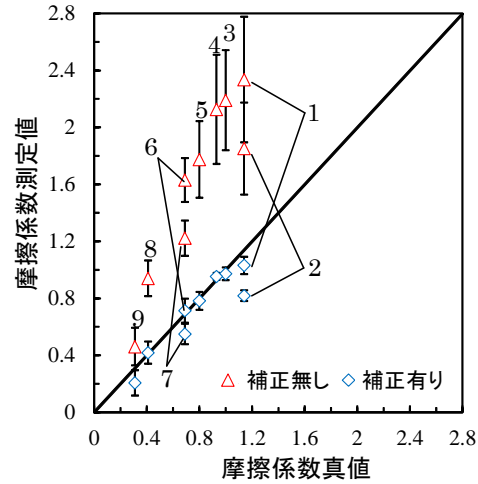


図 14 補正を用いた摩擦係数測定結果

表 3 摩擦係数測定結果

No.	対象面	真値	補正無し		補正有り	
			平均	$\sigma$	平均	$\sigma$
1	Aluminum	1.14	2.34	0.44	1.03	0.06
2	Acrylic	1.14	1.85	0.32	0.82	0.04
3	PVC	1.00	2.19	0.35	0.97	0.05
4	ABS	0.93	2.13	0.38	0.95	0.03
5	POM	0.80	1.77	0.27	0.78	0.06
6	UHPE	0.69	1.63	0.15	0.71	0.08
7	Paper tape	0.69	1.22	0.12	0.55	0.07
8	PTFE	0.41	0.94	0.13	0.42	0.08
9	Al with oil	0.31	0.46	0.13	0.21	0.09

以上の結果より、摩擦係数の測定時にはタイヤの変形による影響を補正する必要がある。そこで、タイヤの変形は鉛直荷重  $w$ 、摩擦力  $f$  に比例し、また、摩擦力の方向に対して正弦波形状に変動すると考え、それぞれの影響に対する補正量を  $\alpha \cdot w, \beta \cdot f$  として考慮する。 $\alpha$  は定数であり、 $\beta$  は式(3)に示すとおり摩擦力の方向  $\theta$  の関数である。

$$\mu = \frac{f + \beta \cdot f}{w + \alpha \cdot w} \quad (2)$$

$$\beta = p \sin(q\theta + r) + s \quad (3)$$

式(3)の  $p, q, r, s$  は実験定数である。3つの路面での実験結果に対し最小二乗法を適用し、表2のように値を決定した。

式(2)を用いて、図11、12で対象とした接地面も含め、9種類の面を対象にタイヤ走行模擬装置を用い、先述のように摩擦係数の測定実験を行った。結果は図14および表3に示すとおりであり、測定値は真値に十分近く、また、ばらつきもわずかであり、精度の良い結果が得られていることがわかる。

実際の路面の摩擦係数は、乾燥したアスファルトが 0.8~0.9 程度、濡れたアスファルトが 0.4~0.6 程度、雪路が 0.35~0.5 程度、圧雪路が 0.2~0.35 程度、氷結路が 0.2 以下である。提案するセンサは図 14 および表 2 に示すとおり、摩擦係数が 0.3 から 1.1 程度の範囲において、0.1 程度の分解能で測定が行えており、これらの路面を識別する性能を有している。

以上、本研究では単純な構造で鉛直荷重、摩擦力と、その方向が測定可能なセンサを提案し、同センサをタイヤに取り付け、走行時を模擬した実験が可能なパラレルメカニズム式付加装置を用いて、種々の路面で摩擦係数の測定実験を行い、センサ出力の補正を行うことで精度の高い値が得られることを確認した。今後は、タイヤの高速回転時における摩擦係数の測定実験などを行い、センサの実用化を進めていく。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2 件)

① T.Ise・M.Higuchi・H.Tachiya, “Development of a Tactile Sensor to Measure Tire Friction Coefficients in Arbitrary Directions”, International Journal of Automation Technology, 7-3(2013), pp.359-366., 査読有  
<http://www.fujipress.jp/finder/xslt.php?mode=present&inputfile=IJATE000700030015.xml>

② 立矢 宏・杉浦祐希・長瀬博毅・伊勢大成・藤田千陽・澤藤和則, “タイヤ接地路面の摩擦係数測定用触覚センサの基礎的研究”, 日本機械学会論文集 C 編, 78-787(2012), pp.852-862., 査読有  
[https://www.jstage.jst.go.jp/article/kikaic/78/787/78\\_787\\_852/\\_article/-char/ja/](https://www.jstage.jst.go.jp/article/kikaic/78/787/78_787_852/_article/-char/ja/)

[学会発表] (計 5 件)

① 藤城慶治・伊勢大成・立矢 宏・樋口理宏, “路面摩擦係数を検知可能なインテリジェントタイヤ用触覚センサの開発”, 日本機械学会第 14 回機素潤滑設計部門講演会, 2014. 4. 22, 信州松代ロイヤルホテル (長野県)

② 河合勇磨・立矢 宏・伊勢大成・金子龍一・澤藤和則, “走行路面の摩擦係数が測定可能なインテリジェントタイヤの開発”, 日本機械学会北陸信越支部第 50 期総会・講演会, 2013. 3. 9, 福井大学 (福井県)

③ 伊勢大成・立矢 宏・長瀬博毅・荒井 聡・澤藤和則, “路面摩擦係数を検知可能なインテリジェントタイヤの研究”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2012, 2012. 5. 29, アクトシティ浜松 (静岡県)

④ 伊勢大成・立矢 宏・長瀬博毅・荒井 聡・澤藤和則, “摩擦状態を検知可能なインテリジェントタイヤ用触覚センサの開発”, 日本機械学会北陸信越支部第 49 期総会・講演会,

2012. 3. 10, 金沢工業大学 (石川県)

⑤ 長瀬博毅・杉浦祐希・伊勢大成・立矢 宏, “タイヤ接地面の摩擦係数を検知可能な触覚センサの研究”, 日本機械学会 2011 年度年次大会, 2011. 9. 14, 東京工業大学 (東京都) [その他]

ホームページ等

① 機械機能設計研究室ホームページタイヤ用摩擦係数センサの研究 :

<http://ads.w3.kanazawa-u.ac.jp/html/research/robotics.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

立矢 宏 (TACHIYA HIROSHI)

金沢大学・機械工学系・教授

研究者番号 : 10216989

### (2) 研究分担者

宮崎 祐介 (MIYAZAKI YUSUKE)

東京工業大学・情報理工学系・准教授

研究者番号 : 70432135