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

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2017-10-03 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 立矢, 宏, 杉浦, 祐希, 長瀬, 博毅, 伊勢, 大成, 藤田, 千陽, 澤藤, 和則, Tachiya, Hiroshi, Sugiura, Yuki, Nagase, Hiroki, Ise, Taisei, Fujita, Chiharu, Sawafuji, Kazunori メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.24517/00008666

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 International License.

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

立矢　宏[*1]，杉浦　祐希[*2]，長瀬　博毅[*2]
伊勢　大成[*2]，藤田　千陽[*3]，澤藤　和則[*4]

Basic Study for a Tactile Sensor to Measure Tire Friction Coefficients

Hiroshi TACHIYA[*1], Yuki SUGIURA, Hiroki NAGASE,
Taisei ISE, Chiharu FUJITA and Kazunori SAWAFUJI

[*1]Kanazawa University, College of Science and Engineering, School of Mechanical Engineering,
Kakuma-machi, Kanazawa city, Ishikawa, Japan

Sensing devices for intelligent tire that can measure friction coefficient of a road are researched so as to improve the performance of vehicle motion control systems such as ABS (anti-lock braking system). However, previous devices need complicated systems and do not have enough performance. This study proposes a simple tactile sensor that can measure the friction coefficient between a tire and road surface. The sensor is composed of a cantilever called “whisker” that is fixed to a base. The base is an elastic plate, and two strain gauges are attached to its surface. The whisker is passed through the hole opened to the tread of a tire and the sensor is attached to its inner surface. The whisker is covered by a domed rubber; the tip surface is used as the contact part. When the tire slips on a road and the contact part comes in contact with the surface, the vertical load and frictional force are applied to the contact part. Then, whisker is compressed and bended, so that the base is deformed elastically. The induced strains at the base from such deformation are measured by the abovementioned strain gauges. The study proposes the method determining the value of the vertical load and frictional force that acting on the tire from the measured strains and fabricates the prototype tactile sensor to confirm its availability.

Key Words : Measurement, Sensor, Automobile, Intelligent Tire, Tactile Sensor, Friction Coefficient

1. 緒　　言

交通事故防止のため，自動車の操縦性，安定性，安全性の向上を目的とした様々な装置の研究・開発がなされている．なかでも ABS をはじめとした車両運動制御システムが広く普及しているが，現状では走行時の状況に適した制御が必ずしも行えておらず，条件によっては制動距離が延びるなど，かえって危険な場合もある(1)．その主な原因は，走行時におけるタイヤと路面間の摩擦係数を正確に把握できないことにある．

走行時の路面状態を精度よく把握するためには，タイヤにセンサを取り付けて路面状態の計測を可能とする方法が有力である．昨今，このような，接地路面やタイヤの空圧状態など，自動車の走行安全性の向上に有用な情報を測定できるインテリジェントタイヤが大きく注目されている．タイヤの空圧に関しては TPMS(2)が実用化されているが，路面の摩擦係数を測定可能とする方法に関しては現在も国内外で様々な研究が行われている．その多くは, タイヤ内部にセンサを設置してタイヤの変形を測定し路面の摩擦状態を明らかにすることを試みている．例えば，Yilmazoglu ら(3)はタイヤ内部に埋め込んだ磁気センサでタイヤの変形を測定する方法，松崎ら(4)はタイヤ

[*] 原稿受付　2011 年 00 月 00 日
[*1] 正員，金沢大学理工研究域　機械工学系（〒920-1192　石川県金沢市角間町）
[*2] 金沢大学　大学院　自然科学研究科（〃）
[*3] 金沢大学　工学部　機能機械工学科（〃）
[*4] 太平洋工業株式会社　（〒503-2397　岐阜県安八郡神戸町横井 1301 番地 1）
E-mail: tachiya@t.kanazawa-u.ac.jp

内側表面に貼付した銅箔パターンを持つ 2 枚のフレキシブル基板を重ね合わせたセンサを利用して，タイヤのひずみ分布を測定する方法，平岡ら[5]はタイヤ内部に取り付けたカメラによりタイヤ内部のひずみ分布を測定する方法を提案している．しかし，これらの方法では得られたタイヤの変形状態から，路面との摩擦係数の値を推定する必要がある． 精度の高い摩擦係数の測定を実現するためには，タイヤそのものの変形より，接地面に作用する接触力を直接測定する方法が有利であると考えられる．

接触力の測定が可能なセンサとして微少なセンサ素子を多数配置する形式が多く研究されている[6]．しかし，一般に構造が複雑で，負荷に対する出力の線形性が良好でなく，また，複数方向の負荷の同時測定は難しい．複数方向の負荷の測定に関しては，例えば大岡らが光学系を利用し，垂直力とせん断力を精度よく測定可能な触覚センサ[7]を提案している．しかし，同センサは構造が複雑で光源など付帯設備を必要とする．また，複数方向の負荷と変位，さらに，すべりが検出可能で，かつ，廉価なセンサを中本らが提案している[8]が，校正が若干複雑であり，永久磁石を用いているため経年変化なども問題となる．

著者らは先に構造が単純で取り扱いが容易であるとして，平板に弾性棒を取り付け，その先端に作用する力で平板に生ずるひずみから接触面形状を測定する触覚センサ[9][10]を提案した．同センサの平板部分をタイヤ内部に設置し，弾性棒の先端をタイヤ外部に露出すれば，接地面の力を直接作用させ得る．そこで本論文では同センサをタイヤに取り付けて接触面に作用する摩擦力および鉛直荷重を同時に測定する方法を提案するとともに，センサの試作および簡易的なタイヤ回転実験装置の製作を行い，低荷重，一定方向負荷の条件で，提案するセンサの原理による摩擦係数測定の可能性を検討する．

2. 摩擦係数測定用触覚センサの概要

2・1 触覚センサの構造

提案する触覚センサは，図 1 左に示すように，正方形状の金属製フレームに固定した弾性板であるベースの中心に，ウィスカと呼ぶ弾性棒を取り付けた単純な構造である．ベースには 2 枚のひずみゲージ[東京測器:FLG-02]を，長手方向が一直線上となるように，ウィスカ中心に対して約 1 ㎜の距離に対称に貼付する．なお，ベースには正方形状である厚さ 0.3mm の市販のアルミ合金板を，ウィスカには直径 0.5mm の Ni-Ti 合金を使用する．これらの寸法，材質は製作の容易さ，また，予備実験によるひずみゲージの出力の確認により決定した．

触覚センサをタイヤに取り付けた様子を図 1 右に示す．タイヤのトレッド部にはウィスカを通すために直径約 8mm の穴を開け，ひずみゲージの長手方向がタイヤの回転周方向となるように，センサをタイヤ内側表面に取り付ける．なお，触覚センサのフレームとタイヤの間には剛性の差異によるセンサの剥離を防ぐため柔軟なスポンジを挟み市販の接着剤で接着する． ウィスカの先端は直径 13.0 ㎜である半球形状のニトリルゴム[ミスミ:CXBFN-D13-L10]で覆い，その先端を接触部とする．

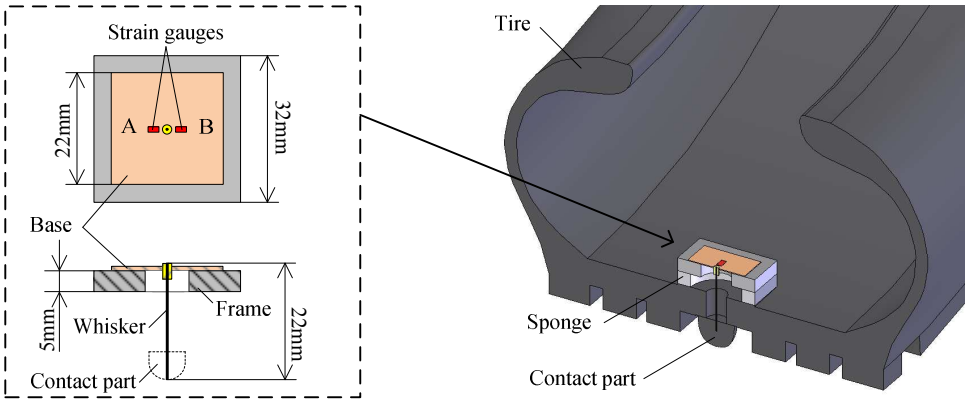


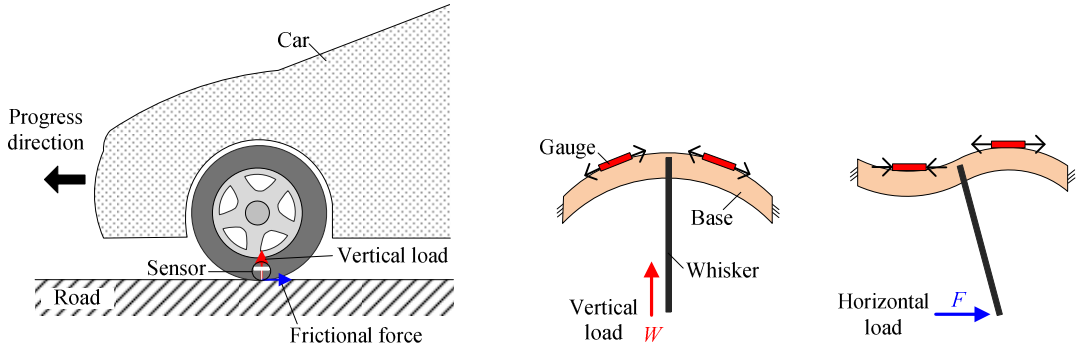
Fig. 1 Proposed tactile sensor

2・2　測定の基礎理論

提案する触覚センサは，図 2(a)に示す車の制動時または急発進時のようにタイヤがスリップしている状態で，センサの接触部が接地し鉛直荷重と摩擦力が作用する場合の測定を対象とする．接触部に鉛直荷重および摩擦力が作用すれば，ウィスカを取り付けたベースに変形が生ずる．この変形をひずみゲージによって測定する．

負荷に対するベースの変形の概略を図 2(b)に示す断面図を用いて説明する．まず，接触部に鉛直荷重が作用すると，ベースは図 2(b)左のようにウィスカ取り付け部を頂点として凸状に変形し，ひずみゲージ貼付部には引張のひずみが発生する．また，接触部に摩擦力が作用するとウィスカには水平荷重が作用し，ベースは図 2(b)右のように，ウィスカ取り付け部が変曲点となるように正弦波形状に変形する．したがって，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と予想される．

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．そこで，2 枚のひずみゲージで測定されるひずみから，以上の異なる変形挙動を考慮し，鉛直荷重と摩擦力の大きさを求め，さらに，摩擦係数を算出する．



(a) Action of the forces at slipping　　(b) Outline of the base deformation

Fig. 2 Method of measuring friction condition

3.　実験による検討

3・1　実験装置

図 1 のように触覚センサを取り付けたタイヤを用いて，図 3 に示す装置で実験を行い，2 枚のひずみゲージから得られるひずみを検討する．実験装置はタイヤ，タイヤに鉛直荷重を負荷するジャッキ，タイヤを回転させるためのモータ，タイヤに加わる負荷を測定可能な，薄い平板の変形を利用した検定済みのフォースプレート[(11)]で構成する．なお，図 3 左に示す，タイヤ内部の触覚センサのひずみゲージの出力線は，タイヤ側面に穴を開けて外部へ取り出す．さらに，タイヤに開けた穴を市販の弾性接着剤で埋め，200kPa で空気を充填する．

タイヤは，ジャッキによりフォースプレートの天板を押し付け鉛直荷重を加えながら回転させて対象面上を滑らせ，スリップなどを想定したすべり摩擦状態を模擬する．ただし，本装置でタイヤに負荷する鉛直荷重は，ジャッキ，モータの仕様などより 500N 以下とする．また，摩擦力の負荷方向はタイヤ回転周方向のみである．

実験時にはセンサの接触部が天板に接触するようにタイヤを約 30 度回転させる．その際に，ひずみゲージの出力線が周囲の構造と干渉しないように配線を行った．また，タイヤの回転に伴う出力線の移動により，ノイズなどが発生しないことを予備実験で確認している．

3・2　実験方法および結果

図 3 の装置による実験結果の例を示す．タイヤに加える鉛直荷重は約 450N，タイヤの回転速度は 1.0rpm，対象面はフォースプレートの天板とした．実験では触覚センサベース部のひずみ，タイヤに加わる鉛直荷重および摩擦力を 50ms ごとに測定した．なお，タイヤに加わる負荷はフォースプレートで測定した．

タイヤに鉛直荷重約 450N を負荷した場合の結果を図 4 に示す．図 4(a)はセンサのベース部に貼付したひずみゲージで測定したひずみ，図 4(b)はフォースプレートで測定したタイヤに作用する負荷の時間に対する変化であり，センサの接触部が対象面に接触している間の結果である．なお，図 4(a)の ε_A および ε_B は，図 1 に示す 2 枚のひずみゲージ A および B による測定値である．

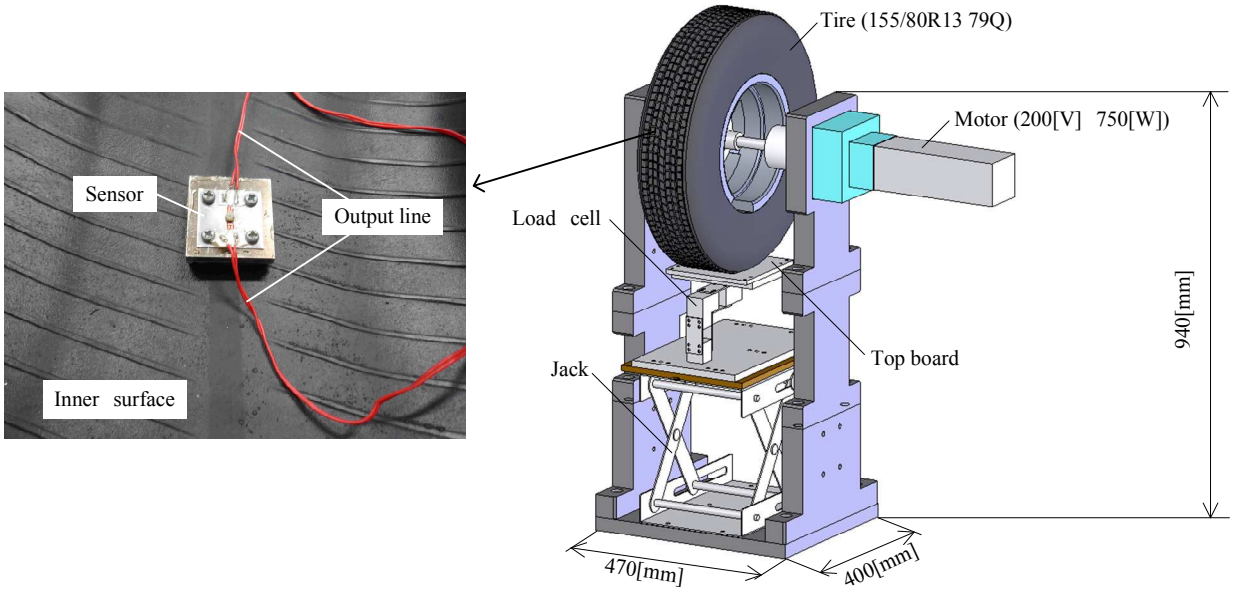
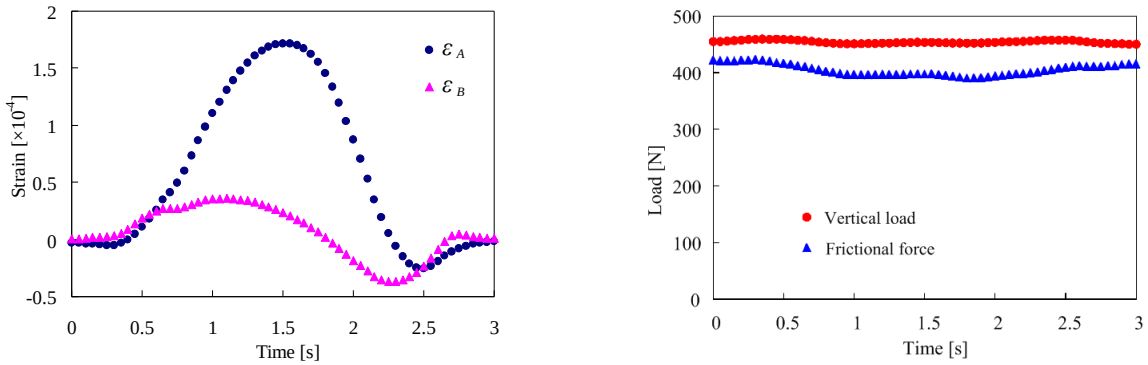


Fig. 3 Experimental apparatus

図 4(a)より，ひずみ ε_A，ε_Bは，接触部が対象面に接触してから離れるまで，時間に対して山なりに変化する．また，図 2(b)で示した鉛直荷重と摩擦力の影響により，2 つのひずみの大きさは互いに異なる．なお，同時刻にタイヤに作用する鉛直荷重および摩擦力は, 図 4(b)に示すロードセルによる測定結果より, おおよそ一定である．

さらに，タイヤに作用する鉛直荷重の大きさを変化させて同様な実験を複数行ったところ，いずれも図 4 と同様の傾向が確認された．以上の結果より，ロードセルによる測定値をタイヤと接地路面の摩擦状態を示す真値として，触覚センサから得られるひずみの測定値より，鉛直荷重および摩擦力を求める実験式を導く．



(a) Changes of the strains with time　　(b) Changes of the loads with time

Fig. 4 Measured results by the experimental apparatus shown in Fig. 3

4. 実験式の検討

4・1 実験装置

3 章で述べたように，図 4(a)に示すひずみは鉛直荷重および摩擦力により生ずるひずみの和である．ひずみの測定値から鉛直荷重および摩擦力をそれぞれ求めるには，ひずみと各負荷の関係を明らかにする必要がある．

これらの関係を簡便に調べるために，タイヤから切り出した図 5 左に示す約 60mm 四方の試験片を用いた実験を行う．試験片には図 1 と同様にして触覚センサを取り付け，タイヤのトレッド部分を，触覚センサの接触部のみが対象面に触れるように，全て切り落としてある．

実験装置は図 5 右に示すように，マニピュレータ，直交する 3 軸方向の負荷が測定可能な検定済みのロードセル，*XY* テーブルで構成する．*XY* テーブルには接触面としてガラス板を設置し，試験片はロードセル先端に取り付ける．なお，ロードセルは図 3 の装置のフォースプレートと同様の原理[11]で負荷を測定する．

同装置はマニピュレータの出力部を上下動することで試験片の接触部に作用する鉛直荷重を調整でき，さらに，鉛直荷重を負荷した状態で *XY* テーブルを水平に移動させることで接触部に摩擦力を負荷する．なお，接触部に加わる負荷はロードセルで測定する．

4・2 実験方法

図 5 の装置を用いて，まず，鉛直荷重のみを約 10～50N の間で 5 通りに変化させ触覚センサの接触部に加え，2 枚のひずみゲージによる測定値の変化を調べる．次に，同じく鉛直荷重を約 10～50N の間で 5 通りに変化させて触覚センサの接触部に加えるとともに，各鉛直荷重下で *XY* テーブルを水平に移動させ摩擦力を負荷する．得られたひずみゲージの測定値から，鉛直荷重のみが負荷されたときの値を除くことで，摩擦力に対する変化を調べる．なお，テーブルの移動速度は 0.25mm･s^{-1}，サンプリング間隔は 100ms とする．

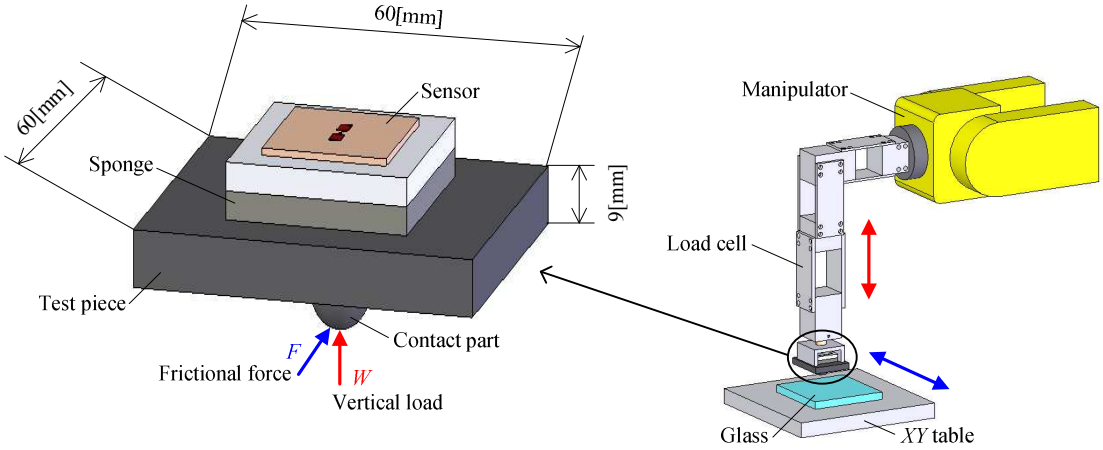


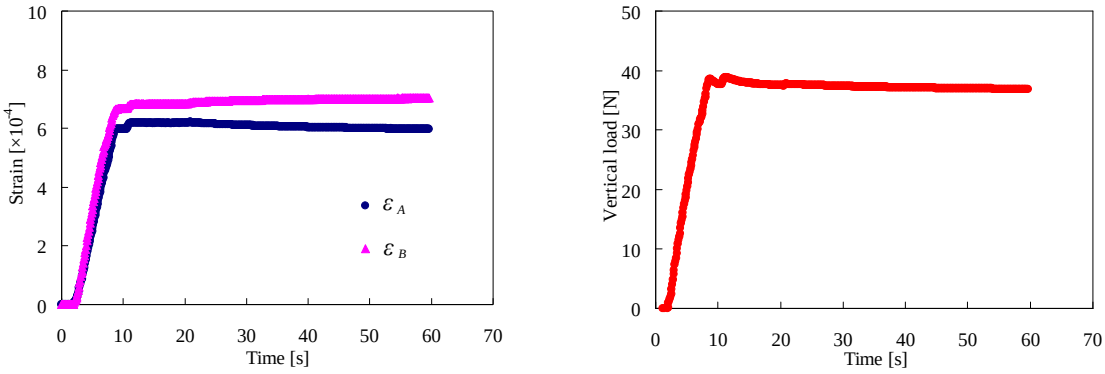
Fig. 5 Preliminary experimental apparatus by using a manipulator

4・3 実験結果および実験式の検討

約 40N までの鉛直荷重のみを加えたときの，ひずみゲージおよびロードセルによる測定結果を例として図 6(a)および(b)に示す．同図より，測定開始から約 2 秒後に接触部がガラスに接触し，約 10 秒後まではマニピュレータ先端の下降に伴い，触覚センサベース部のひずみおよび接触部に加わる鉛直荷重は増加している．その後，マニピュレータを停止すると各測定値はほぼ一定となっている．なお，時間とともに，ひずみの値が若干変化しているが，これは主にひずみゲージの発熱などによる温度変化が原因と考えられる．しかし，本実験では比較的短時間で荷重の測定を行うこと，また，生ずる変化はわずかであることから，その影響は無視することとした．

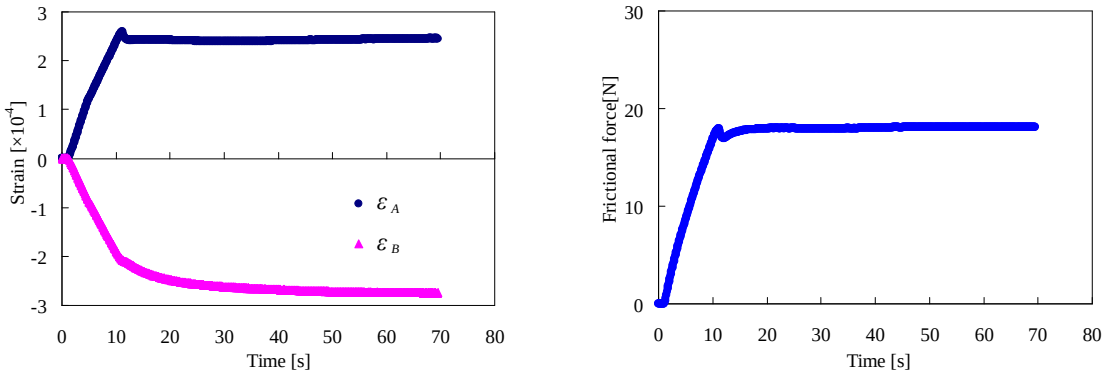
以上のようにして約 40N の一定鉛直荷重を加えた後，上述のように測定値から鉛直荷重の影響を取り除くように，ひずみの測定計で零点調整を行って，さらに，*XY* テーブルを水平に移動させたときのひずみゲージおよびロードセルによる測定結果を図 7(a)および(b)に示す．同図より，測定開始から約 10 秒後まではテーブルの移動に伴

い，センサベース部に生ずるひずみの絶対値および接触部に作用する摩擦力は増加している．その後，接触部が対象面上をすべりはじめると各測定値はほぼ一定となっている．



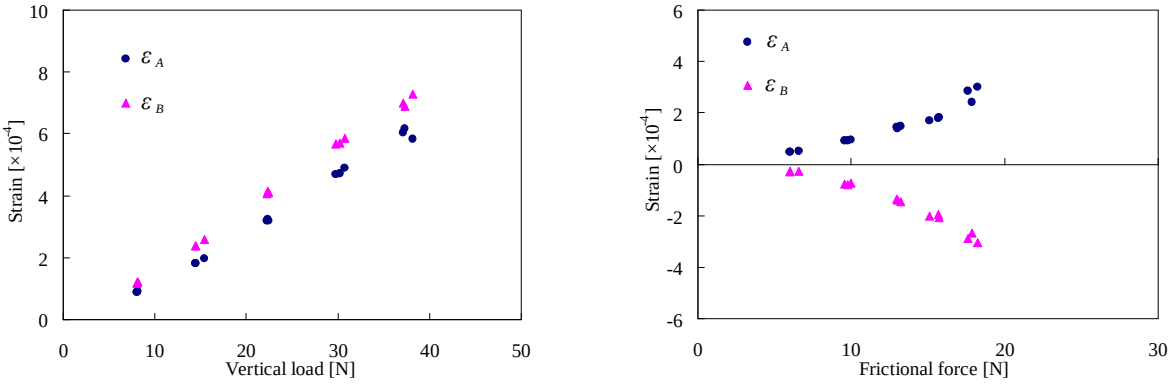
(a) Changes of the strains with time　　(b) Change of the vertical load with time

Fig. 6 Measured results about the vertical force by the experimental apparatus shown in Fig. 5



(a) Changes of the strains with time　　(b) Change of the frictional force with time

Fig. 7 Measured results about the frictional force by the experimental apparatus shown in Fig. 5



(a) Relation between the strains and vertical load　　(b) Relation between the strains and frictional force

Fig. 8 Relations between the strains and loads by experimental apparatus shown in Fig. 5

図 6 および 7 より，ε_Aおよび ε_Bは鉛直荷重に対してともに引張ひずみに，摩擦力に対しては一方が引張，他方が圧縮ひずみとなる．これは，各負荷により図 2(b)に示すような変形がベースに生じるためである．また，以上の傾向は，鉛直荷重および摩擦力の大きさを変化させた場合も同様であった．そこで，全ての実験結果から，ひ

ずみ，鉛直荷重，摩擦力がほぼ一定となる時間内の平均値をそれぞれ算出し，鉛直荷重および摩擦力とひずみの関係を求め，それぞれ図 8(a)および(b)に示す.

図 8(a)に示す結果より，ε_A，ε_Bは鉛直荷重に対して線形に変化し，値も互いにほぼ等しい．また，図 8(b)に示す結果より，摩擦力に対しても ε_A，ε_Bは線形に変化し，互いに正負は異なるが絶対値はおおよそ等しい．これらの結果より，測定したひずみから鉛直荷重および摩擦力を求めるための実験式について検討する．説明のため鉛直荷重を W，摩擦力を F，鉛直荷重により生ずるひずみを ε_{iW}(i=A，B)，摩擦力により生ずるひずみを ε_{iF}(i=A，B)とする．触覚センサのベース部に生ずるひずみ ε_i(i=A，B)が，鉛直荷重および摩擦力それぞれが単独で負荷した場合に生ずるひずみの和であるとして式(1)で表す.

$$\varepsilon_i=\varepsilon_{iW}+\varepsilon_{iF} \tag{1}$$

ここで，ε_A と ε_B の和および差を考える．図 8 より，ε_{AW} と ε_{BW} は互いにほぼ等しく，ε_{AF} および ε_{BF} は正負の関係は逆であるが絶対値がほぼ等しいことから次式が成り立つ.

$$\varepsilon_A+\varepsilon_B=(\varepsilon_{AW}+\varepsilon_{AF})+(\varepsilon_{BW}+\varepsilon_{BF})\fallingdotseq 2\varepsilon_{AW} \tag{2}$$

$$\varepsilon_A-\varepsilon_B=(\varepsilon_{AW}+\varepsilon_{AF})-(\varepsilon_{BW}+\varepsilon_{BF})\fallingdotseq 2\varepsilon_{AF} \tag{3}$$

さらに，図 8 の結果より，鉛直荷重と ε_{AW}，摩擦力と ε_{AF} の関係は，それぞれ線形であることを利用すると，式(2)および(3)より，2 枚のひずみゲージで測定するひずみから接触部に加わる鉛直荷重および摩擦力を求めるための実験式として以下の式(4)および(5)が導かれる．なお，k_i(i=W，F)は比例定数であり，校正実験を行い決定する.

$$W=k_W(\varepsilon_A+\varepsilon_B) \tag{4}$$

$$F=k_F(\varepsilon_A-\varepsilon_B) \tag{5}$$

5. 校正実験と実験式の決定

5・1 実験方法

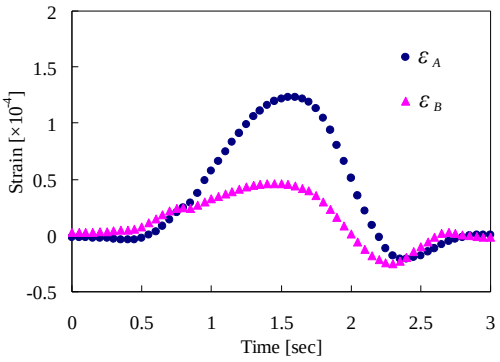
図 3 の装置を用いて，3 章と同様にタイヤを対象面上でスリップさせる実験を行い，4 章で導いた実験式の妥当性および実験式中の定数について検討する. 接触対象面は紙ガムテープを貼付したフォースプレートの天板とし，タイヤの回転速度は 1.0rpm とする．タイヤに負荷する鉛直荷重は約 100～500N の間で 5 通りに変化させ，各荷重下で 1 回ずつ実験を行う．触覚センサおよびロードセルのサンプリング間隔は 50ms とする.

5・2 実験結果

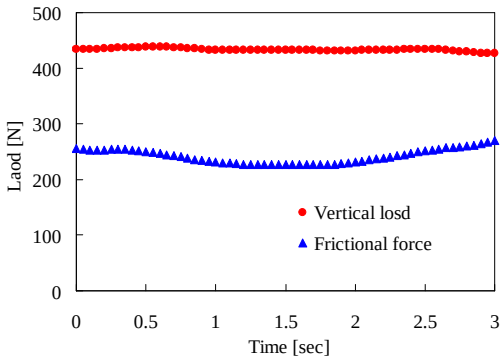
例として鉛直荷重約 500N を負荷したときのセンサベース部に生ずるひずみおよびロードセルによる負荷の測定結果を図 9(a)および(b)に示す. 同図より，ひずみおよび接触部に作用する負荷は図 4 の結果と同様に変化する．なお，他の荷重下でのひずみおよび荷重の時間に対する変化の傾向もほぼ同じである.

図 9(a)に示すひずみの時間変化について，実験開始から約 0.5 秒後に接触部が対象面に接触し，約 2.3 秒後に離れる．さらに，これらの時間の中間である約 1.4 秒後にセンサは最下点に位置し，接触部は対象面に水平に接触する．そこで，同時刻におけるひずみおよび接触部に作用した負荷の値を用いて実験式を検討する.

鉛直荷重を約 100～500N の間で変化させて実験を行い得た結果から，以上のようにひずみと負荷を求め，さらに，ε_A と ε_B の和および差を算出し，鉛直荷重および摩擦力との関係を求め，それぞれ図 10(a)および(b)に示す．図 10 より，それぞれの関係は 4 章と同様にほぼ線形であることが確認される.

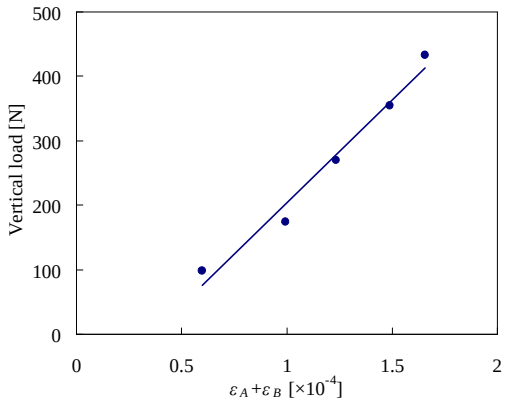


(a) Changes of the strains with time

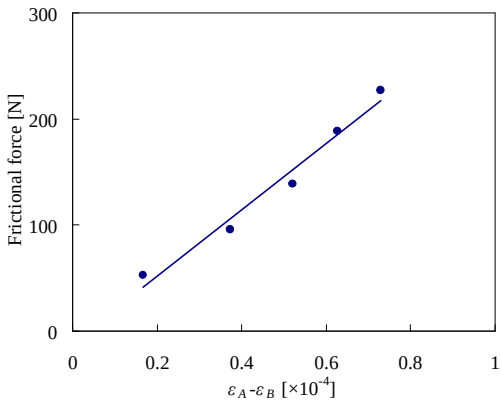


(b) Changes of the loads with time

Fig. 9 Measured results by the experimental apparatus shown in Fig. 3



(a) Relation between the strains and vertical load



(b) Relation between the strains and frictional force

Fig. 10 Relations between the strains and loads by the experimental apparatus shown in Fig. 3

5・3　実験式の決定

図 10 に示す結果より，鉛直荷重および摩擦力を求める実験式中の定数を決定する．ただし，図 10 に示す関係から外挿により求められる，負荷が零のときのひずみは零にならない．これは，２枚のひずみゲージの貼付位置など，センサの製作誤差が主な原因と考えられる．そこで，式(4)および(5)を式(6)および(7)のとおり補正する．k_iおよび l_i(i=W，F)は，図 10(a)および(b)に示す関係を一次近似したときの傾きおよび切片に相当する．これらの値は図 10 の結果より最小二乗法を用いて表 1 に示すとおり決定した．

以上より，2 枚のひずみゲージの測定結果からタイヤに加わる鉛直荷重および摩擦力を求めるための実験式として式(6)～(7)を提案し，表 1 の値を用いて使用する．タイヤと接地面間の摩擦係数は，タイヤが接地面に対してスリップしているとして式(8)により算出する．

$$W=k_W(\varepsilon_A+\varepsilon_B)+l_W \tag{6}$$

$$F=k_F(\varepsilon_A-\varepsilon_B)+l_F \tag{7}$$

$$\mu=F/W \tag{8}$$

Table 1 Values of the constants in Eqs. (6) and (7)

k_W	l_W	k_F	l_F
318.6	-114.86	312.7	-10.67

6. タイヤ接地面の摩擦係数の測定

6・1 実験および測定値の処理方法

図 3 の装置を用い，これまでと同様にタイヤを対象面上でスリップさせ，以上で提案した測定方法により，タイヤに加わる鉛直荷重と摩擦力，さらに，タイヤと対象面間の摩擦係数を求める．タイヤの回転速度は 1.0rpm とし，対象表面は，フォースプレートのアルミ合金天板そのものや，同天板に紙ガムテープを貼付したり，油を塗布したりするなどして摩擦係数を変化させた表 2 に示す 5 種類の水平面Ⅰ～Ⅴとする．なお，表面ⅡとⅣは油量が異なる．タイヤに加える鉛直荷重は約 100～500N の間で変化させる．触覚センサおよびロードセルのサンプリング間隔は 50ms である．以下では提案するセンサの妥当性とともに，5 章において表面Ⅲを対象に導いた式(6), (7)および表 1 の値が他の条件にも適用可能であることを確認する．

Table 2 Measurement error about the frictional coefficients [%]

Surface		Ⅰ [Alumi.]	Ⅱ [Alumi. with oil]	Ⅲ [Paper tape]	Ⅳ [Alumi. with oil]	Ⅴ [Paper tape with oil]
Friction coefficient		0.85	0.65	0.53	0.44	0.15
W [N]	500	8.1	6.7	5.0	13.3	54.6
	400	15.6	4.1	3.3	12.6	75.0
	300	18.6	2.2	3.4	18.4	109.5
	200	17.9	3.3	3.4	7.9	167.2
	100	15.6	6.9	5.6	15.5	771.7

実験結果の例として，タイヤに鉛直荷重約 450N を負荷し，表面Ⅰ上をすべらせた場合の結果について示す．表面Ⅰはアルミ合金製であるフォースプレートの天板そのものであり，測定結果は先に示した 3 章の図 4 である．なお，図 4 の結果を得た実験では，実験開始から約 0.3 秒後から約 2.3 秒後の間で接触部は対象面に接触する．

図 4(a)に示す結果から，接触部が対象面に接触している間の各時間のひずみ ε_A と ε_B を式(6)～(8)に代入して摩擦係数を求め，同時刻にフォースプレートで測定した摩擦係数とともに図 11 に示す．図 11 より，フォースプレートから得られる摩擦係数はおおよそ一定であるのに対して，触覚センサから得られる摩擦係数はタイヤの回転とともに，時間に対して変化することがわかる．

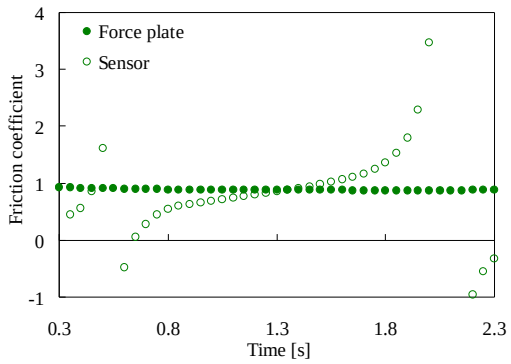


Fig.11 Change of the friction coefficient with time

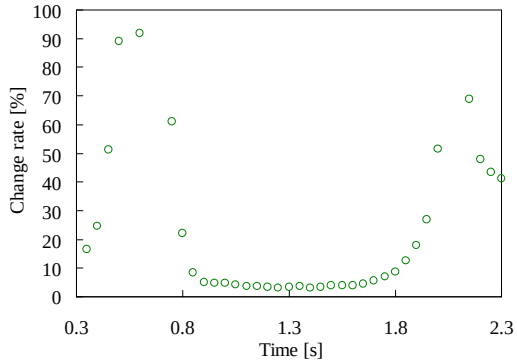


Fig.12 Change rate of the friction coefficient with time

5 章の校正実験ではセンサの接触部が接地面に水平となる時刻の測定値を用いた．しかし，タイヤが実際に回転してすべりながら接地している場合に，そのような瞬間を特定することは容易でない．そこで，本論文では摩擦状態の測定値が比較的安定している範囲で接触部がほぼ水平に接地するとして，同時刻の測定値を利用する．

図 11 に示す結果から，触覚センサから得られる摩擦係数の変化率を各時間で求め図 12 に示す．同図より，接触開始時と終了時において摩擦係数は急激に変化するが，約 0.8 秒から約 1.8 秒の間ように，摩擦係数の変化率が 10%以下と，その変化が比較的安定する期間が存在する．

以上と同様にして触覚センサから得られる摩擦係数の変化率を 6・1 で述べた各条件において求めたところ，接触部が対象面と接触してから離れる間に変化率が 10%以下と安定する期間がいずれの条件でも確認された．そこで，本論文では，各条件において接触部が対象面と接触してから離れる間で，触覚センサより得られる摩擦係数の変化率が 10%以下となる時間内での摩擦係数の平均値を触覚センサの測定値として使用する．

6・2　実験結果

以上の方法を用い，各条件で触覚センサにより摩擦係数を求める．本来ならば，同条件下で複数回の測定を行うべきであるが，接触部が摩耗しやすいため，各面に対して鉛直荷重 W を 100N ずつ変化させ，それぞれの荷重下で 1 回ずつ測定を行った．なお，測定の再現性については後述する．フォースプレートによる測定値は，上述のように各対象面で鉛直荷重を 5 通りに変化させ得られた結果の平均値とする．表 2 に示す摩擦係数はフォースプレートによる測定値であり，これらの値を真値として，触覚センサによる測定値の誤差を算出し同表に示した．

表 2 より，条件によって誤差の大きさは異なるが，対象面Ⅰ～Ⅳの範囲では誤差の最大値が約 20 %，平均値が 10%程度で摩擦係数の測定が可能である．なお，表面Ⅴに対しては，摩擦係数が低く，作用させた鉛直荷重に対して十分な摩擦力が生じず，本論文で用いたセンサでは摩擦係数の測定が困難であった．

次に測定の再現性を確認するため，回転速度 1.0rpm，鉛直荷重約 500N として，以上と同じ 5 種類の表面の摩擦係数を 5 回ずつ測定した結果を図 13 に示す．図 13 は，触覚センサおよびフォースプレートで測定した各対象面の摩擦係数の，5 回の測定値の平均値と 95%の信頼区間を示している．

図 13 より，表 2 の結果と同様に，対象面Ⅰ～Ⅳに対して，触覚センサによる測定値は，フォースプレートの測定値とおおよそ一致し，ばらつきが少なく再現性も高く，測定は良好に行えている．すなわち，提案するセンサの妥当性と，表面Ⅲを対象に導いた実験式が表 2 に示す他の条件でも適用可能であることが確認された．

なお，一般に，タイヤと乾いたアスファルトとの摩擦係数は約 0.8，雪路で約 0.4，氷結路で約 0.2 以下とされている[12]．提案する触覚センサは図 13 に示す結果から，本論文で条件とした比較的低い鉛直荷重下においても摩擦係数が 0.2 から 0.9 の範囲において 0.1 程度の分解能で測定が行えている．実際に本センサを車に使用する場合は，センサの材質，寸法などの検討は必要であるが，さらに大きな荷重がベースに作用し，より大きなひずみが生じ得る．よって，提案する触覚センサにより，さらに高い分解能で測定を行い，以上のような路面状態を識別するための摩擦係数の情報を得られると期待できる．

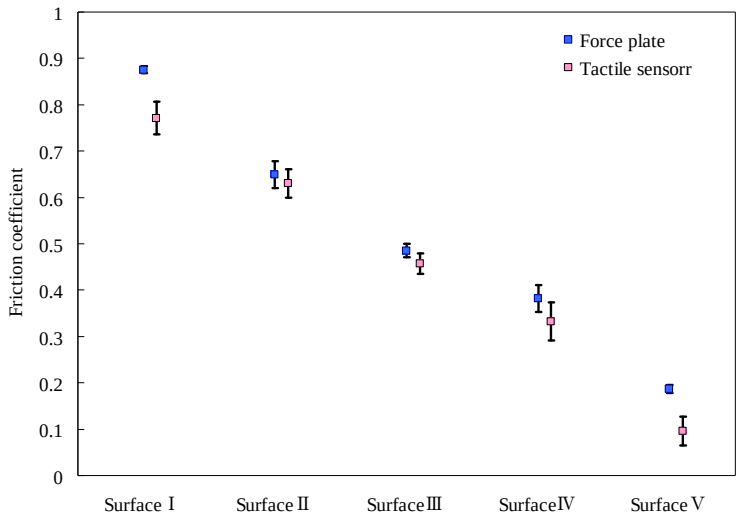


Fig.13 Measured results with vertical load 500N

7.　結　　言

(1)　本論文では，棒状の弾性合金を片持ちばりとして平板に取り付け，弾性合金先端に作用する鉛直および水平方向の荷重を，平板に生ずるひずみから測定する，構造が単純で取り扱いが容易な触覚センサを提案した．

(2) 提案するセンサをタイヤに取り付け，走行時に作用する鉛直荷重および摩擦力の測定へ応用することで，接地面の摩擦係数算出のための情報が得られるインテリジェントタイヤのセンサとして用いることを提案した．

(3) 触覚センサの出力とタイヤに加わる鉛直荷重および摩擦力との関係を明らかにした．さらに，その結果を利用して，触覚センサから摩擦係数を求める実験式を導いた．

(4) 試作した触覚センサを用いて，種々の条件下でタイヤのスリップを模擬した実験を行い，接地面の摩擦係数を測定した．その結果，良好な精度で摩擦係数の測定が行え，提案する触覚センサの有用性が確認された．

今後は，以上の結果に基づき，任意方向の摩擦力が測定可能な触覚センサを提案するとともに，高荷重下で任意方向の負荷をタイヤに作用させられる実験装置を製作して同様に摩擦係数の測定を実施する．また，実際にタイヤへの装着を想定し，出力の無線化，摩擦係数を測定するタイミングの決定方法などを検討していく．

文　　献

(1) 加来照俊，三沢優司，“ABS の効果に関する研究”，日本交通科学協議会誌，Vol. 1, No. 1(2001), pp. 78-81.

(2) 鈴木孝太郎，岩瀬英治，松本潔，下山勲，“圧電発電によって駆動するセンサ情報送信システム”，ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集 2008, 2P1-A22(1)-(4) .

(3) O. Yilmazouglu，M. Brandt，J. Sigmund，E. Genc, H.L. Hartnagel，“Integrated InAs/GaSb 3D magnetic field sensors for the intelligent tire”，*Sensors and Actuators A*，Vol. 94 (2001), pp. 1269-1276.

(4) 松崎亮介，轟章，“電気容量型柔軟センサを用いたタイヤの無線変形計測”，日本機械学会 2007 年度年次大会講演論文集, 2007(6), pp. 229-230.

(5) 平岡直樹，松崎亮介，轟章，“デジタル画像相関法を用いたタイヤの内面ひずみ・面外変位同時計測”，日本機械学会論文集 A 編，Vol. 74, No. 746(2008), pp. 1351-1357.

(6) K. Kim, K. R. Lee, W. H. Kim, K. Park, T. Kim, J. Kim, J. J. Pak, “Polymer-based flexible tactile sensor up to 32×32 arrays integrated with interconnection terminals”, *Sensors and Actuators A*, Vol.156 (2009), pp.284–291.

(7) 大岡昌博，小林弘明，高田純平，三矢保永，“半球型光学式三軸触覚センサの開発”，日本機械学会論文集 C 編，Vol. 74, No. 742 (2008), pp. 1477-1484.

(8) 中本裕之，伍賀正典，武縄悟，貴田恭旭，“磁気抵抗素子とインダクタを用いた磁気式触覚センサ”，日本機械学会論文集 C 編，Vol. 76, No. 766 (2010), pp. 1476-1482.

(9) 山下順広，立矢宏，塚本卓，“ウィスカ形触覚センサを用いたなぞり動作による接触面形状の呈示”，日本機械学会論文集 C 編，Vol. 73, No. 730 (2007), pp. 1786-1793.

(10) 立矢宏，金野誠司，“複数のウィスカを有する触覚センサの基礎的研究”，日本機械学会論文集 C 編，Vol. 66, No. 650 (2000), pp. 3336-3343.

(11) 米山猛，機械設計の基礎知識，初版 (1993), pp. 359-361，日刊工業新聞社.

(12) タイヤなるほど講座，http://www.ohnotire.com/tishiki/tishiki-01-21.html，(2011.12.19).