研究論文

タイヤの電気容量変化と発振回路を用いた ひずみ無線モニタリング

松崎 亮介^{*1}, 轟 章^{*2}, 小林 英男^{*3}, 島村 佳伸^{*4}

(2003 年 6 月 26 日受付)

Wireless Strain Monitoring of Tire Using Capacitance Change with Oscillator

Ryosuke MATSUZAKI,^{*1} Akira TODOROKI,^{*2} Hideo KOBAYASHI^{*3}
and Yoshinobu SHIMAMURA^{*4}

(Received June 26, 2003)

The strain monitoring of automobile tires in-service is quite effective to improve reliability of tires and design tools. The conventional strain gages are cumbersome for the strain measurement of the tires because of their high stiffness and lead wire requirement. In the present study, a new strain measurement system utilize electric capacitance change of steel wire reinforced, low cost wireless sensor built-in tires is proposed and experimentally investigated. A small oscillating circuit in which the capacitor is composed with the rubber and the wire is embedded in the tire, then deformation of the tire causes change of the capacitance makes change of frequency. Measurement of the frequency enables us a remote measuring of the strain of the tire. A rectangular specimen cut from a truck tire is adopted as a specimen. Using the commercially available tire in which sensor embedded, dynamic test is performed and frequency change of the oscillating circuit is measured during the test. As a result, the method is experimentally proved to be effective for the wireless strain monitoring of tires.

1. 緒 言

近年、自動車の安全性向上を目的として、タイヤのひずみや内圧をモニタリングするスマートタイヤが研究されている¹⁻⁷⁾。Pohlら²⁾はSAW (surface acoustic wave) センサをタイヤに設置し、タイヤのトレッド変形から道路表面摩擦を測定しABS (anti-lock braking system) の効率向上が可能であることを示している。またスマートタイヤは駆動時の安定性を向上させるTCS (traction control system)、旋回時の横滑りを制御するVSA (vehicle stability assist) などの車両運動

制御システムの性能や信頼性向上を可能にすると考えられている。さらにGavine⁷⁾はスマートタイヤによりタイヤトレッドのはく離の早期発見が可能であることを示している。

スマートタイヤの必要性は高まっているが、センサシステムに多くの条件が必要となるため十分な対応が取られていない。まずタイヤは回転機器であるため有線でのセンサ接続が困難であり、無線モニタリングが必要となる。また、タイヤゴムは柔軟材料であるため、剛性の高いセンサを埋め込むとタイヤの変形を妨げてしまう。さらに長期間の使用に起因してセンサのはく離を引き起こす。このためセンサとタイヤゴムとの弾性係数の差異は小さくなければならない。またタイヤ自体が高価な製品でないためセンサは安価である必要がある。

多くのセンサはこれらの条件を満たしておらず問題を生じている。例えば従来のひずみゲージなどのセンサは弾性率の差異とゴムとの接着性の悪さから、センサがタイヤからはく離しやすく、大型センサはタイヤ変形に影響を及ぼしてしまう。MEMS (microelectromechanical system) を用いたひずみセンサ⁸⁾はセンサとタイヤゴム

^{*1} 東京工業大学大学院 (152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

Graduate Student, Tokyo Institute of Technology, 2-12-1, O-okayama, Meguro-ku, Tokyo 152-8552, Japan

^{*2~*4} 東京工業大学大学院理工学研究科

Department of Mechanical Sciences and Engineering, Tokyo Institute of Technology

^{*2} 助教授 Associate Professor, ^{*3} 教授 Professor, ^{*4} 助手 Research Associate

間のひずみ伝達が困難であり、さらにセンサ自体の剛性が高く、タイヤへの埋め込みに問題を生じている。また光ファイバーセンサネットワークを利用したスマートタイヤ⁹⁾は各々のセンサを中央演算コンピュータに有線接続する必要がある、高価となってしまう。

以上の背景から、新しいセンサを備えたスマートタイヤの開発が望まれている。そこで本研究ではタイヤ自体またはタイヤと同構造のパッチ型センサを用いて変形時の容量変化を利用してひずみを測定する新しいひずみ測定方法を提案し、タイヤの電気容量変化を用いた無線ひずみモニタリングの可能性について実験的に検討する。

2. モニタリングシステム

本研究では Fig. 1 に示すトラックタイヤから切り出したタイヤ試験片をセンサとして用いる。タイヤ試験片は母材である合成ゴムにスチールワイヤが埋め込まれている構造をしている。負荷によるタイヤ試験片の変形は、タイヤ試験片内に埋め込まれたスチールワイヤの間隔の変化に変換される。

導電性であるスチールワイヤと誘電性である合成ゴムからなるタイヤ試験片の構造は、Fig. 2 のようにスチールワイヤを電極とした対向2電極構造であり、コンデンサとしてモデル化できる。母材の長さ方向に対して一組の導電性物質が直交方向に配置されている場合、コンデンサの電気容量は式(1)で表される。

$$C = \epsilon \frac{S}{d} \quad (1)$$

ここで、 C は電気容量、 ϵ は誘電率、 S は対向する電極面積、 d は電極間隔である。この構造に引張りひずみが負荷されると、電極間距離 d が増加するので、電気容量 C は減少する。本研究では、この電極間距離の変化に起因する材料の電気容量変化を利用して、タイヤのひずみ測定を行う。

無線ひずみモニタリングシステムの概略を Fig. 3 に示す。センサ側はタイヤ試験片と CR 発振回路、受信側は受信機、DA コンバータ内蔵周波数カウンタ、PC から構成されている。タイヤ試験片の変形による電気容量変化を無線で送信するために、Fig. 4 に示す CR 発振回路を利用した。CR 発振回路中の周波数調整用コンデンサを測定対象であるタイヤ試験片材料で置き換えており、発振周波数 f_{osc} は式(2)で決定される¹⁰⁾。

$$f_{osc} = \frac{1}{2.2CR} \quad (2)$$

ここで、 R は抵抗、 C はタイヤ試験片電気容量である。タイヤ試験片をコンデンサとして CR 発振回路に接

Fig. 1 Tire specimen.

Fig. 2 Condenser model of a steel wire belt of a tire.

Fig. 3 Schematic image of the wireless strain measurement system.

Fig. 4 CR oscillating circuit.

Fig. 5 Specimen configuration.

続すれば、タイヤ試験のひずみ変化は電気容量変化を経て発振周波数変化に変換し無線送信される。受信機により受信した発振周波数変化は周波数カウンタで周波数値を測定し、DA コンバータを介して電圧変化に変換され PC でモニタリングされる。

無線通信を利用する場合、ノイズの影響が問題になる。ノイズは信号の振幅に対して大きな影響を及ぼすが、このシステムではひずみが周波数に変換されるため、ノイズに対して非常に強い特性を持っている。また、本システムでは従来型ひずみゲージのようにタイヤ試験片をパッチ型センサとしてタイヤに取り付ける。このためセンサとタイヤゴムの弾性係数の差異がなく、長期使用によるセンサのはく離を防ぎ、またタイヤ変形に影響を及ぼさない理想のセンサとなる。

3. 実験方法

3.1 試験片

使用した試験片は Fig. 5 に示すようなトラックタイヤから切り出した長さ 250 mm、幅 30 mm、厚さ 3 mm の矩形タイヤ試験片である。また、ゴム内部のスチールワイヤの直径は 1 mm、ワイヤ同士の距離は 2.5 mm である。タイヤ試験片の側端から 5 mm までの表面ゴスをグラインダーで除去しスチールワイヤを露出させリード線をハンダ付けした。またひずみを測定するために試験片中央部にゴム用ひずみゲージを貼付した。

3.2 電極配置最適化

タイヤ試験片のひずみセンサとしての分解能を向上させるためには、引張負荷により電気容量が大きく変化することが求められる。そこで電気容量変化が大きくなるような電極配置を決める。

タイヤ試験片の電気容量測定装置を Fig. 6 に示す。装置は試験片にひずみを負荷する引張試験機（島津製オートグラフ AG-1）、電気容量測定のための LCR メータ（日置電気製 HIOKI3522 LCR HiTESTER）、ひずみ測

Fig. 6 Experimental set-up for capacitance measurement.

定用ブリッジ回路およびシグナルコンディショナー（共和電業製 CDA-700A）から構成されている。

実験は、電極間隔を変化させ負荷による電気容量変化を LCR メータで測定し行う。引張試験機の変位速度は 0.5 mm/min の変位制御で試験を実施した。変位が最大 6 mm になるまでひずみを負荷し、その後連続的に変位が 0 mm まで除荷した。初期電極間隔を 20, 46, 70 mm に変化させて電気容量変化を測定した。ここで、初期電極間隔中には複数本のスチールワイヤが埋まっており、初期電極間隔の最大値は試験片の長さの制限から 70 mm である。

3.3 自己温度補償

タイヤは走行中に表面温度が上昇し、タイヤ試験片の電気容量、CR 発振回路中の抵抗 R 、CMOS 特性等は変化するため、発振周波数は変化する。そこで負の温度係数を持つ NTC サーミスタ（negative temperature coefficient thermistor）を利用して CR 発振回路全体の自己温度補償を目的とする実験を行った。

試験装置は恒温器（ISUZU Drying Oven kosmos）、LCR メータ（日置電機製 HIOKI3522 LCR HiTESTER）、を使用した。試験はタイヤ試験片、CR 発振回路を恒温器に入れ発振周波数の温度特性を測定した。

3.4 静的測定

構築したひずみ無線モニタリングシステムを利用し、タイヤ試験片の無線ひずみモニタリングが可能であることを、静的試験を実施し検証する。

試験装置は Fig. 7 に示すように電気油圧式引張試験機（MTS 10ton）、タイヤ試験片、CR 発振回路、受信機、周波数カウンタ、PC から構成されている。ここで、無線通信距離は 1 m である。引張試験は変位速度 1 mm/min の変位制御で変位を 6 mm とし、負荷・除荷を実施し、ひずみによる発振周波数の変化を測定した。

Fig. 7 Experimental set-up for wireless test.

Fig. 8 Attached sensor.

Table 1 PIC Frequency counter.

Gate time	1 ms
Sampling rate	500 Hz
Frequency resolution	8 kHz
Max measurable frequency	18 kHz
DA converter resolution	10 bit
Power source	± 5 V

Table 2 Tire configuration.

Tire width	175 mm
Oblateness	70%
Structure	Radial
Diameter of rim	14 inch
Road index	475 kg
Max speed	180 km/h

Fig. 9 Dynamic tire testing machine.

3.5 動的測定

タイヤの半径を 30 cm とすると 60 km/h で走行中のタイヤの回転周波数は 8.8 Hz となり、タイヤゴムの変位周波数も同様に高速となる。このひずみ変化に追従した高速測定が必要となるため、米国マイクロチップ社が開発した PIC を使用し、高速測定が可能な DA コンバータ内蔵の周波数カウンタを製作した。製作した周波数カウンタの仕様・性能を Table 1 に示す。

試験は繰り返し荷重による引張負荷・除荷を実施し、動的なひずみモニタリングが可能であることを検討する。試験装置は静的測定の際に使用した装置 (Fig. 7) と同様である。引張試験はタイヤ試験片に変位周波数が 1, 10 Hz で、6 mm の変位を三角波形で負荷・除荷を実施し、ひずみによる発振周波数の変化を測定した。

3.6 センサ実装試験

本研究で提案しているひずみ測定システムを用いて市

販タイヤのひずみをモニタリングする試験を行った。使用した市販タイヤの形状を Table 2 に示す。これまで使用したタイヤ試験片をパッチ型センサとして市販タイヤに実装し、ひずみによる発振周波数変化を測定する。センサの実装は Fig. 8 に示すようにタイヤ内側に接着した。タイヤ試験片は市販の瞬間接着剤 (シアノアクリレート 100%) で、CR 発振回路は 2 液混合型常温硬化エポキシでタイヤ内側に接着した。さらに、並列してひずみゲージを取り付けリファレンスとしてひずみを取得可能にした。

試験装置はブリヂストン社の協力により Fig. 9 に示す動的タイヤ試験機を使用した。CR 発振回路からの出力とひずみの測定は有線で行い、ひずみを取得するためのブリッジボックス、シグナルコンディショナー、周波数カウンタ、PC から構成されている。ここでタイヤ内部圧力は一般的な条件である 200 kPa とした。試験は、タイヤをドラムとの接触点から 48.5 mm ドラム側へ移動し接地圧力を負荷させ、ドラムを回転させ実施した。

ドラム移動量は一般的には 40 mm 程度であるが、ひずみ変化の測定を容易にするため、やや大きな値に設定した。ドラム表面は金属板でできており理想路面を仮定している。

4. 実験結果および考察

4.1 電極配置最適化

初期電極間隔が 70 mm のタイヤ試験片の電気容量とひずみの関係を Fig. 10 に示す。ひずみの増加にともない電気容量が減少することがわかる。これは Fig. 11 に示すように引張によって電極であるスチールワイヤ間隔が拡大するためである。負荷・除荷による電気容量変化を比較するとヒステリシスが見られるが、これはタイヤゴムの運動エネルギーの一部が熱エネルギーに変換されることに起因すると考えられる。

さらに初期電極間隔が 20, 46, 70 mm のときの負荷による電気容量の変化を Fig. 12 に示す。初期電極間隔が

Fig. 10 Measured capacitance change during loading-unloading.

Fig. 11 Spacing increase with the increase of tensile load.

広がるほど電気容量の変化は増大することがわかる。タイヤ試験片長さの制限から初期電極間隔の最大値は 70 mm であるため、初期電極間隔として 70 mm を採用した。

4.2 自己温度補償

タイヤ試験片、CR 発振回路の温度上昇による発振周波数の変化を Fig. 13 中の△印に示す。縦軸は 40°C における発振周波数を基準とした値 f_t/f_{40} である。ここで f_t は t °C における発振周波数、 f_{40} は 40°C における発振周波数である。横軸は恒温器内蔵温度計により測定した温度を示している。タイヤ（トレッド）温度は、30 分の慣らし走行時間で 40°C 以上となり、走行中のタイヤ温度は 70°C 程度まで上昇する¹⁾。本研究では走行中の温度変化に対する安定性を求めているので、40°C から 70°C までを自己温度補償の対象温度域とし、40°C を基準温度として設定した。

Fig. 13 より温度上昇にともない発振周波数は減少し

Fig. 12 Measured capacitance change of various distance.

Fig. 13 Temperature compensating by thermistor.

Fig. 14 CR oscillation with thermistor.

ており、発振周波数変化を利用したひずみ測定に誤差が生じてしまう。このためCR発振回路に自己温度補償機構を組み込む必要があることがわかる。発振周波数は温度上昇により減少するため、式(2)から温度上昇により、抵抗 R が減少することで発振周波数の減少は抑えられる。そこでFig. 14に示すように抵抗が減少するNTCサーミスタを抵抗に直列に接続すると、発振周波数 f_{osc} は式(3)で示され、発振周波数の温度による変化を小さくすることが可能になると考えられる。

$$f_{osc} = \frac{1}{2.2C(R + R_{th})} \quad (3)$$

ここで R_{th} はNTCサーミスタの抵抗である。使用するNTCサーミスタとして、発振周波数の温度特性、式(3)、NTCサーミスタの温度特性を考慮し抵抗値が3.0 k Ω (at 25 $^{\circ}$ C) のものを選択した。

使用する3.0 k Ω のNTCサーミスタ抵抗の温度特性をFig. 15に示す。3.0 k Ω のNTCサーミスタの温度特性と式(3)から計算したCR発振回路の周波数変化の理論曲線をFig. 13の3.0 k Ω (Calculation)に示す。また実際にNTCサーミスタを接続したCR発振回路を使用した発振周波数の温度特性をFig. 13の3.0 k Ω (Experiment)に示す。図よりサーミスタを用いることによって温度に対する周波数変化が減少していることがわかる。また実験値は理論値に近い値をとっており、実験の妥当性を明らかにした。

以上よりNTCサーミスタを使用することによりCR発振回路の自己温度補償が可能であることを明らかにした。

4.3 静的試験

静的負荷による発振周波数とひずみの関係をFig. 16に示す。縦軸は発振周波数変化率($\Delta f/f$)である。ここで発振周波数変化率とは、無負荷時の発振周波数 f に対する発振周波数変化 Δf の比率である。発振周波数絶対値は変動しやすいが、発振周波数変化率は安定している

Fig. 15 Resistance/temperature characteristics of thermistor.

Fig. 16 Measured frequency change during loading-unloading ($f=11.5$ MHz).

ため周波数変化率で表示した。図より、ひずみの増加とともに発振周波数は増加していることがわかる。CR発振回路の発振周波数は式(3)で示され、ひずみによりタイヤ試験片の電気容量が減少するため発振周波数は増大したと考える。また、負荷・除荷において発振周波数のヒステリシスがみられる。これは電気容量のヒステリシスに起因していると考えられる。

4.4 動的試験

変位周波数1, 10 Hzにおける発振周波数とひずみの時間変化をFig. 17, 18に示す。縦軸は第1軸が発振周波数変化率、第2軸がひずみ、横軸は時間を示している。変位周波数10 Hzにおいても発振周波数はひずみに追従して変化しておりPIC周波数カウンタ、DAコンバータを利用したモニタリングシステムにより高速ひずみ無線モニタリング可能であることを実験的に明らかにした。

Fig. 17 Measured frequency change (Stroke frequency: 1 Hz, $f = 12.6$ MHz).

Fig. 19 Measured frequency change during wheel rotation ($f = 3.74$ MHz).

Fig. 18 Measured frequency change (Stroke frequency: 10 Hz, $f = 12.6$ MHz).

4.5 センサ実装試験

市販タイヤにセンサを適用し、動的タイヤ試験機を用いて動的試験を実施した結果を Fig. 19 に示す。

Fig. 19 よりひずみに追従し発振周波数変化率が変化していることがわかる。ひずみに対して、発振周波数変化率のずれが若干あるが、これはひずみゲージ接着位置とセンサ接着位置が一致していないことが原因と考える。また、周波数変化率の値はこれまでの試験と一致しないが、これは発振安定化のためタイヤ試験片と並列に 5 pF コンデンサを挿入しているためである。また、今回実験したタイヤの回転周波数は 0.03 Hz と低速であるが、高速回転時の回路信頼性が向上すれば、高速ひずみ変化に追従した測定が可能になると考える。

図より引張によりひずみが増大する前後にひずみが負となる圧縮域があることがわかる。これは接地面に近いタイヤは Fig. 20 のような力が働き、接地する前に圧縮、接地するところで引張、再び接地面から離れるところで

Fig. 20 Tread deformation.

圧縮が働いたためである。

以上のセンサ実装試験より、ひずみに対応した発振周波数変化の測定が可能であることを示し、電気容量変化を用いたひずみ測定は市販タイヤに適用可能であることを明らかにした。

5. 結 言

タイヤのひずみ無線モニタリング手法として、電気容量の変化から発振周波数を変化させる測定方法を提案し、タイヤ試験片の電気容量変化の測定から最適な電極配置について検討した。またひずみモニタリングシステムを構築し、高速に変形するタイヤのひずみモニタリングの可能性を検証した。さらに提案システムを市販タイヤに適用し、システムの有効性を検証した。

以上より得られた結果を以下に示す。

(1) タイヤの無線モニタリング手法として、CR 発振回路を利用して電気容量変化を発振周波数に変換する測定方法を提案した。

(2) タイヤ試験片の電気容量と負荷ひずみの関係から電極配置の最適化を行った。

(3) サーミスタ素子を利用した CR 発振回路の自己温度補償が可能であることを実証した。

(4) CR 発振器・受信機・PIC 周波数カウンタ・DA コンバータ・PC からなるモニタリングシステムを構築し、変位周波数 10 Hz においてタイヤの無線ひずみモニタリングが可能であることを実証した。

(5) 電気容量変化を用いたひずみモニタリング方法は実際のタイヤに適用可能であることを実証した。

参 考 文 献

- 1) M. Brandt, V. Bachmann, A. Vogt, M. Fach, K. Mayer, B. Breuer & H.L. Hartnagel : *Electron. Lett.*, **34**, 8 (1998), 760-762.
- 2) A. Pohl, R. Steindl & L. Reindl : *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, **48**, 6 (1999), 1041-1046.
- 3) K. Mnif : *Sensors*, **18**, 11 (2001), 40-46.
- 4) O. Yilmazoglu, M. Brandt, J. Sigmund, E. Genc & H.L. Hartnagel : *Sensors Actuators A*, **94** (2001), 59-63.
- 5) T. Umeno, K. Asano, H. Ohashi, M. Yonetani, T. Naitou & T. Taguchi : *Control Eng. Pract.*, **9** (2001), 639-645.
- 6) N. Persson, S. Ahlqvist, U. Forssell & F. Gustafsson : SAE Conf. Proc. (2001), pp. 77-79.
- 7) A. Gavine : *Tire Technol. Int.*, September (2001), 32-33.
- 8) C. Hautamaki, S. Zurn, S.C. Mantell & D.L. Polla : *J. Microelectromech. Syst.*, **8** (1999), 272-279.
- 9) M.E. Palmer, C.C. Boyd, J. McManus & S. Meller : Proceeding of 43rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, AIAA (2002), AIAA 2002-1548.
- 10) 稲葉 保 : 発振回路の設計と応用, CQ 出版社, 東京 (1993), p. 66.
- 11) 酒井秀男 : タイヤ工学 (第2版), グランプリ出版, 東京 (1990), pp. 149-152.