

# タイヤの電気容量変化と同調回路を用いた ひずみ無線パッシブモニタリング\*

松崎亮介<sup>\*1</sup>, 轟章<sup>\*2</sup>  
小林英男<sup>\*2</sup>, 島村佳伸<sup>\*2</sup>

## Passive Wireless Strain Monitoring of Tire using Capacitance change with Tuning Circuit

Ryosuke MATSUZAKI<sup>\*3</sup>, Akira TODOROKI  
Hideo KOBAYASHI and Yoshinobu SHIMAMURA

<sup>\*3</sup> Department of Mechanical Sciences, and Engineering, Tokyo Institute of Technology,  
2-12-1, O-okayama, Meguro-ku, Tokyo, 152-8552 Japan

Reliability of automobiles is increasingly demanded. To prevent burst of tires, smart tires are currently under development. Most of the smart tires have integrated or attached sensors to measure deformation or internal pressure of tires during a long period of service. The embedded sensor enables highly precise measurement of road surface friction, and the precise friction measurements make more efficient anti-lock braking system (ABS). In a previous study, the authors proposed a new wireless strain monitoring method that adopts the tire itself as a sensor, with an oscillator circuit. This method is very simple and useful, but it requires a battery to activate the oscillator circuit. In the present study, the previous method for wireless tire monitoring is improved to produce a passive wireless sensor. A specimen made from a commercially available tire is connected to a tuning circuit comprising an inductance and a capacitance as a condenser. The proposed method enables us to measure an applied strain of a specimen wirelessly, without any power supply from outside. This new passive wireless method is applied to a specimen and an applied strain is measured. As a result, the method is experimentally proved to be effective for the passive wireless strain monitoring of tires.

**Key Words:** Reliability, Automobile, Sensor, Smart Tire, Passive Sensor, Wireless, Strain Monitoring, Electrical Capacitance, Tuning Circuit

### 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<sup>(1)-(6)</sup>。Pohlら<sup>(1)</sup>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することで、ABS(Anti-lock Braking System)の効率を向上させ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)や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向上を可能にすると考えられて

いる。さらにGavine<sup>(2)</sup>はスマートタイヤによりタイヤトレッドのはく離を早期発見すること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、センサシステムに次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り有線でのセンサ接続が困難であるため、無線モニタリングが必要となる。タイヤゴムは柔軟材料であり、剛性の高いセンサははく離するため、センサとタイヤゴムとの弾性係数の差異は小さくしなければならない。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。さらに、タイヤ・モジュールでは、バッテリーのコストと寿命が課題となるため、バッテリーレスである無線パッシブセンサの開発が必要となる。

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、ひずみゲージ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

\*平成 年 月 日受付

\*1 学生員, 東京工業大学大学院

(〒152-8852 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

E-mail: rmatsuza@ginza.mes.titech.ac.jp

\*2 正員, 東京工業大学工学部

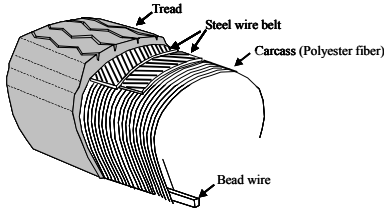


Fig. 1 Inner structure of a steel-wire-reinforced radial tire.

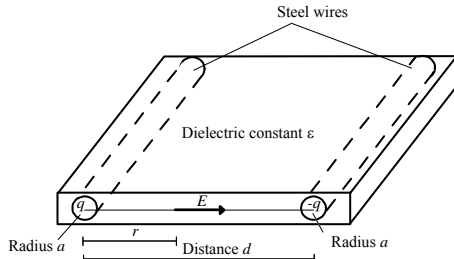


Fig. 2 Condenser model of a steel wire belt of a tire.

はく離してしまう。MEMS (Microelectromechanical System) を用いたひずみセンサ<sup>9)</sup>はセンサとタイヤゴム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<sup>3)</sup>は測定装置が高価であるため、モニタリングシステムも高価になってしまう。

著者らの研究<sup>10)</sup>で、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、変形時の容量変化と発振回路を利用してひずみを測定する新しいひずみ測定方法が市販タイヤに適用可能であることを実証した。しかし、試作したセンサは、電源が必要なアクティブセンサであり、バッテリーの寿命・環境への影響、センサの重量増加などに問題があった。そこで、電磁誘導を利用した無線パッシブ型センサ<sup>11)</sup>を試作したが、無線区間が短く、また、動的な測定が困難であり実際の自動車に適用する際に課題となる。

本研究では、無線通信方法として電磁誘導ではなく電波を利用した無線パッシブモニタリングを提案する。一般乗用車用ラジアルタイヤのベルト部分を同調回路の電気容量として使用し、ひずみによる電気容量の変化と同調周波数の変化を利用した、外部電源不要の無線パッシブ型ひずみモニタリングシステムを試作した。さらに、提案したシステムを市販ラジアルタイヤから切り出したタイヤ試験片に適用し、実現可能性を実験的に検討した。

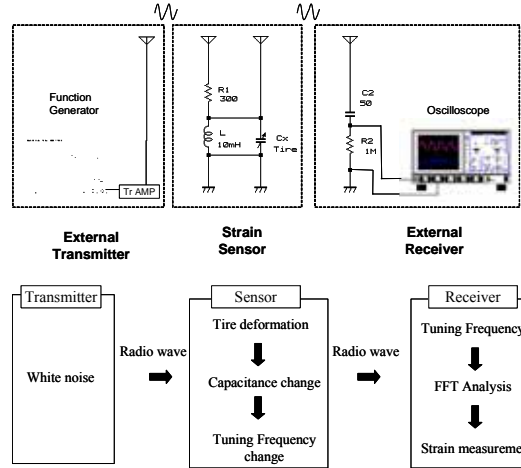


Fig. 3 Schematic image of the wireless passive strain-measurement system.

## 2. モニタリングシステム

乗用車用の市販ラジアルタイヤの内部構造を図1に示す。カーカスとトレッドの間には、トレッド幅に近い幅からなるベルトが設けられ、タイヤ半径方向への圧縮により周方向の剛性を保っている。ここでベルトは、誘電性母材である合成ゴムが導電性物質である金属ワイヤで強化された構造である FRR (Fiber Reinforced Rubber) 複合材料となっており、コード角度(周方向に対してなす角)  $\pm 20^\circ$  前後で折り重ねたものの2枚をカーカスの上に積層している。

ここで、導電性材料であるスチールワイヤと誘電性材料である合成ゴムからなるタイヤベルト部の構造は、図2に示す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。スチールワイヤ半径  $a$ 、ワイヤ間隔  $d$  のスチールワイヤに単位長さ当たりそれぞれ  $q$ 、 $-q$  の電荷が存在する時、導線の中心から  $r$  の点の電界  $E_r$  はガウスの法則により次式となる。

$$E_r = \frac{q}{2\pi\epsilon r} + \frac{q}{2\pi\epsilon(d-r)} \quad (1)$$

ここで、 $\epsilon$  はタイヤゴムの誘電率であり、スチールワイヤの位置関係には影響されない。スチールワイヤ間の電位差  $V$  は

$$V = -\int_{d-a}^a E_r dr = \frac{q}{\pi\epsilon} \ln \frac{d-a}{a} \quad (2)$$

したがって、単位長さあたりのスチールワイヤ間静電容量  $C$  は次式となる。

$$C = \frac{q}{V} = \frac{\pi\epsilon}{\ln \frac{d-a}{a}} \approx \frac{\pi\epsilon}{\ln \frac{d}{a}} \quad (3)$$



Fig. 4 Appearance of the tuning circuit.

この構造に引張りひずみが負荷されると、電極間隔  $d$  が変化する．この電極間隔  $d$  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．本研究では ABS 向上を目的としたタイヤのスリップ検知に適するタイヤ周方向ひずみを測定対象としている．タイヤトレッドの変形は、ベルト部を変形させるため、ベルト部のひずみを測定することでトレッドのひずみを測定することが可能となる．この手法では、新たにセンサを埋め込む必要がなく、センサとタイヤ間の剛性の差異に起因するセンサのはく離問題を引き起こさない．

使用するモニタリングシステムは図 3 に示すように外部送信機、同調回路を内蔵したひずみセンサ、外部受信機から構成されている．ここで、同調回路とは、多数の周波数の中から指定する周波数のみを次の回路へと流す働きをしており、バンドパス・フィルタの一種である．本研究で用いた同調回路は図 4 に示すようなパッシブ・バンドパス・フィルタであり、受動素子であるコンデンサ  $C_x$  とコイル  $L$  から構成された LC 共振回路となっている．そのため、ひずみセンサにはバッテリーを必要とせず、バッテリー搭載に起因する寿命、温度耐性、環境、重量に関する課題を解決し、センサの小型、軽量化も可能となる．

ここで、ひずみセンサ内の LC 並列共振回路のインピーダンス  $Z$  は次式となる．

$$Z = \frac{1}{j\left(\omega C_x - \frac{1}{\omega L}\right)} \quad (4)$$

ここで  $\omega$  は角振動数であり、周波数  $f$  を用いて次式で表される．

$$\omega = 2\pi f \quad (5)$$

式(4)右辺の分母がゼロになるような角振動数  $\omega$  でインピーダンス  $Z$  は最大となり同調されるため、同調周波数  $f_i$  は次式となる．

$$f_i = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_x}} \quad (6)$$

同調回路内のコンデンサ  $C_x$  としてタイヤベルト部の電気容量を利用することで、タイヤ変形による電気

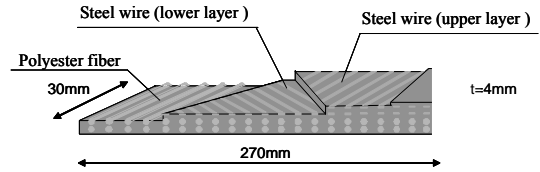


Fig. 5 Tire specimen configuration.

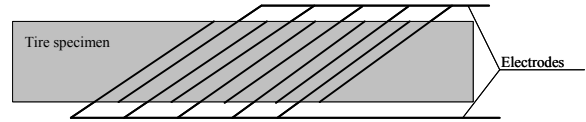


Fig. 6 Interdigital electrodes ( $N_d=10$ ).

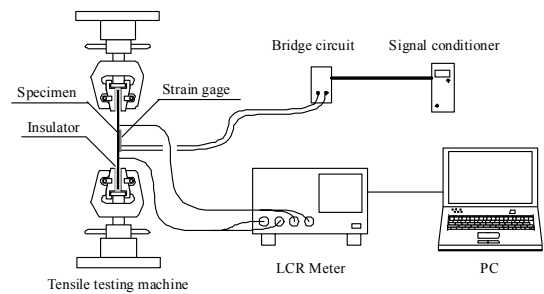


Fig. 7 Experimental set-up for capacitance measurement.

容量変化を同調周波数  $f_i$  の変化に変換する．

測定方法は図 3 に示すように、まず外部送信機からセンサに向けて、スペクトル密度がすべての周波数で一定である雑音（白色雑音）電波を送信する．ひずみセンサの受信アンテナで受信した白色雑音は、内部の同調回路で同調周波数  $f_i$  に同調され送信アンテナより送信される．外部受信機で受信した同調波形には、外部送信機からの白色雑音によるノイズを含むため、周波数解析により同調周波数  $f_i$  を決定する．

### 3. 実タイヤスチールベルト部の測定

**3.1 実験方法** 使用する試験片は図 5 に示すようなスチールラジアルタイヤから切り出した長さ 270 mm、幅 30 mm、厚さ 4 mm の矩形タイヤ試験片である．ここで、スチールワイヤの直径は 1 mm、ワイヤ同士の間隔は 4 mm である．内部のスチールワイヤを電極として利用し、ワイヤ間の電気容量を測定する．また試験片裏面中央にひずみゲージを貼り付け、ひずみを測定する．

タイヤ試験片内部には、ポリエステルファイバーを含むカーカス層（2 層）と、スチールワイヤを含むベルト層（2 層）がある．タイヤ試験片がひずみセンサとしての分解能を向上させるためには、引張負荷に伴う電気容量変化が大きいことが求められる．そこで電気容量を増加させる方法として、ベルト上層のスチールワイヤを利用し、二つの電極がかみ合うように交

互に配置した楕型電極（電極数  $N_d=10$ ）を作成した（図 6 参照）。

さらに電極数  $N_d$  を大きくすることで電気容量変化の大きいセンサを作成することが可能であるが、センサが巨大化するため  $N_d$  が 10 までという制限を付けた。電極配置方法による電気容量変化への影響については参考文献(11)で詳しく述べており、ここでは省略する。

実験装置は図 7 に示すように、引張試験機、LCRメータ、PC から構成されている。引張試験は変位速度 1 mm/min、変位 3 mm で引張負荷・除荷を連続的に実施し、タイヤ試験片電極間の電気容量を測定周波数 100 kHz で測定した。また 1 Hz から 100 kHz までの試験片電気容量、インピーダンス位相角の周波数応答特性を測定した。なお使用した LCR メータの最大測定周波数は 100 kHz である。

**3.2 実験結果** 引張負荷・除荷に伴うタイヤ試験片の電気容量変化を測定した結果を図 8 に示す。図中の横軸はひずみゲージで測定した負荷ひずみの値、縦軸は負荷（印）・除荷（印）時の電気容量である。図より、ひずみの増加に伴い電気容量は 170 pF から 260 pF 程度まで増加している。これは図 9 に示すようにワイヤが負荷方向に対して小さい角度（20 度）で斜めに配置されているため、引張ひずみでワイヤ間隔が縮小するためである。ここで、タイヤにかかるひずみは最大で 3000  $\mu$  程度であり、図 8 よりひずみ 3000  $\mu$  まで電気容量が変化することが確認できる。

また、負荷・除荷時の電気容量変化の曲線にはヒステリシスがあり、同じひずみに対して除荷時は負荷時よりも大きな電気容量値となっている。

ゴムの変形には金属の場合と異なり、加えられた運動エネルギーの一部は熱エネルギーに変換されることに起因するヒステリシスロス（変形損失）があり、タイヤゴムの荷重と変位の関係は、除荷時で負荷時より荷重が減少（ひずみが増加）するようなヒステリシス曲線となる。しかし、ひずみゲージを貼付すると、ひずみゲージ周辺はひずみゲージ固定用の接着剤のため固化しており、ゴム特有の変形特性が失われている。つまり、実際のタイヤの除荷時にはヒステリシス特性から、ひずみゲージで測定したひずみよりも大きなひずみが生じていると考えられる。図 8 の除荷時のひずみもひずみゲージで測定しているため、実際のひずみよりも小さく測定されたと考えられる。

周波数応答特性の実験結果を図 10 に示す。図中横軸は測定周波数、縦軸は電気容量（印）と位相角（印）である。図より測定周波数が高くなるのに伴

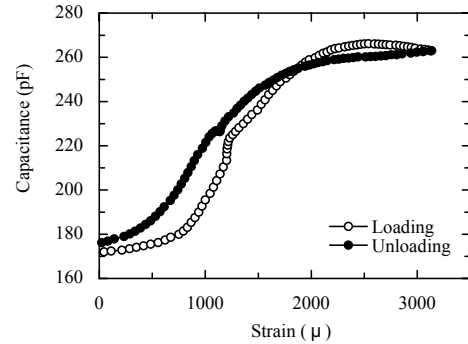


Fig. 8 Measured capacitance change during loading-unloading.

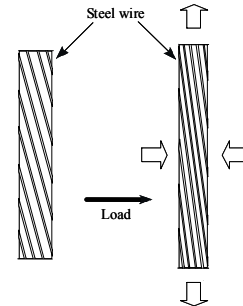


Fig. 9 Spacing decrease with the increase of tensile load.

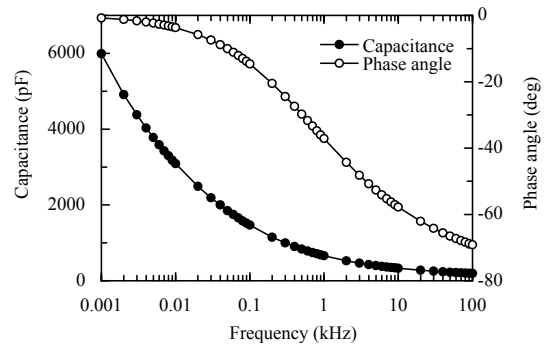


Fig. 10 Frequency response of the capacitance and phase angle of the tire specimen (upper layer).

い、電気容量は減少し、位相角は  $-90^\circ$  に近づく。測定周波数が 100 kHz 程度と高い範囲では、タイヤ試験片は電気容量としてモデル化可能であることを明らかにした。タイヤ試験片の電気容量の周波数依存性は、有極性高分子誘電率の周波数依存性<sup>(12)</sup>に起因するものと考えられる。

以上より、タイヤベルト部の電気容量は負荷ひずみに伴い変化するため、タイヤベルト部自体をセンサとして使用可能であることを明らかにした。

#### 4. 静的引張試験

**4.1 実験方法** 同調回路を用いた無線パッシブ型センサシステムの有効性を確認するため、タイヤ試験片の引張負荷・除荷による同調周波数の変化を測定する。使用する試験片は電気容量測定時に使用した試



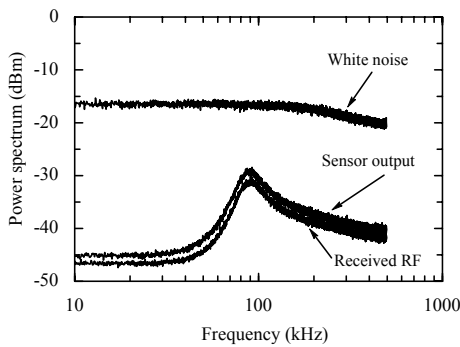


Fig. 11 Measured power spectrum of white noise, sensor output and received RF.

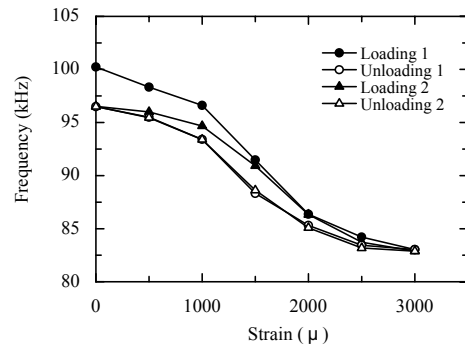


Fig. 12 Measured relationships between strain and tuning frequency change of wireless passive sensor.

験片（図 5 参照）と同一である．ベルト上層にあるスチールワイヤを利用して，電極数  $N_d = 10$  の櫛型電極を組み，センサ回路のコンデンサ  $C_x$  として利用した．ひずみセンサ回路内のコイルはインダクタンス  $L$  が 10 mH のマイクロインダクタを使用した．

引張試験は負荷・除荷を変位速度 1 mm/min，変位 3 mm で 2 回ずつ実施した．

**4.2 実験結果と考察** まず，無負荷時の外部送信機送信波形の FFT 結果，センサ送信波形の FFT（高速フーリエ変換：Fast Fourier Transform）結果，受信機受信波形の FFT 結果を図 11 にまとめて示す．横軸は周波数，縦軸はパワースペクトルである．図中の上にある白色雑音を送信パワースペクトルであり，500 kHz 程度までの周波数域でスペクトルが一定の白色雑音を送信されていることがわかる．図中の下の曲線がひずみセンサ出力波形のパワースペクトルと受信機受信波形のパワースペクトルである．受信波形パワースペクトルを見ると同調周波数  $f_i$  (100 kHz) でピークをとっている．

次に，図 12 にタイヤ試験片を引張負荷（1 回目：印，2 回目：印）・除荷（1 回目：印，2 回目：印）した結果を示す．ここで，縦軸は FFT によるパワースペクトルのピークから求めた同調周波数  $f_i$  であり，横軸はひずみである．図より，ひずみの増加に伴い同調周波数  $f_i$  は減少していることがわかる．これはひずみの増加に伴い電気容量  $C_x$  が増加するため，式(6)で表される同調周波数  $f_i$  は減少した．

以上より同調回路を利用したパッシブセンサが，タイヤ試験片の静的負荷によるひずみ測定に有効であることを実証した．

## 5. 繰り返し荷重試験

**5.1 周波数解析** 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．このため，走行中のタイヤのひずみをリアルタイムで測定するには，高速な測定が必要となる．

同調周波数  $f_i$  を動的に測定するためには，高速 AD 変換を用いて PC 上でリアルタイムに周波数解析する必要がある．周波数解析として一般的なものは FFT と MEM（最大エントロピー法：Maximum Entropy Method）である．しかし，通常の FFT では定常性を仮定しているため，時間により変化する信号  $x(t)$  をフーリエ変換し得られたスペクトル  $X(\omega)$  は周波数の関数であり，時間の情報は失われている．信号の周波数の時間的変化を解析する手法として短時間フーリエ変換（STFT：Short-time Fourier Transform）がある．STFT では，スペクトルの時間的変化を求めるために，信号の一部を，窓関数（Window Function）を用いて切り出し，この窓をずらしながら，その区間の信号のスペクトルを次々に解析する．一般に，STFT では周波数分解能と時間分解能を両立させることができない欠点を持つ．

一方，MEM は短いデータ長からスペクトルを求める際に特に有効な手法であり，窓関数などの処理が不要で，もとのデータをそのまま使える利点がある．また，MEM はスペクトルピーク（極）を使用し，多項式でスペクトルピークを当てはめることができるため，本研究のようなスペクトルピークにおける周波数（同調周波数）を求める手法としては有効である．また，FFT と比較するとスペクトルの分解能が高い・信号の周期に対してデータ長が短くてもスペクトル推定が出来る・雑音に対して比較的強いなどの特徴がある．

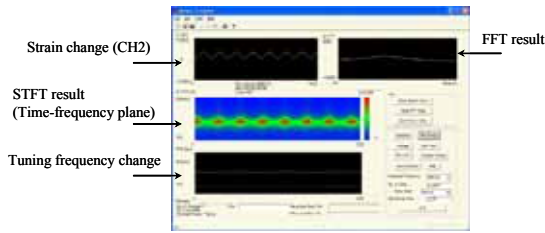


Fig. 13 Developed software for spectrum monitoring.

Table 1 Specification of the software.

Sampling Frequency of Voltage	1 - 500Hz
Frequency Range	0 - 250Hz
Method of Spectra Analysis	FFT, MEM
Calculation time of tuning frequency	- 100Hz

MEMの演算回数は $N$ (データ点数)と $M$ (極の個数)の積に比例する。 $M$ は対象スペクトルのピーク数の数倍程度でよく、本研究でのスペクトルピーク数は理想的には同調周波数における一つであるため $M=2\sim 5$ 程度となる。

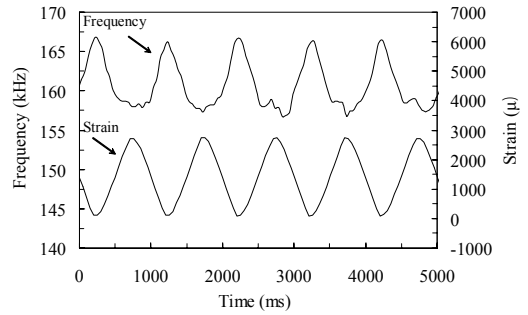
同調周波数 $f_t$ 測定用に自作したソフトウェアを図13に、仕様を表1に示す。周波数解析手法は、STFTとMEMから選択可能とした。同調周波数の演算時間は100Hz程度であり、10Hz程度のひずみ変化まで追従可能である。

**5.2 実験方法** 電気油圧式試験機(MTS10ton)を用いて、試験片の引張負荷・除荷(変位3mm)を変位周波数0.5, 1, 5, 10 Hzで繰り返し荷重試験を実施した。ひずみセンサ回路内のコイルのインダクタンス $L$ は4.7mHとした。

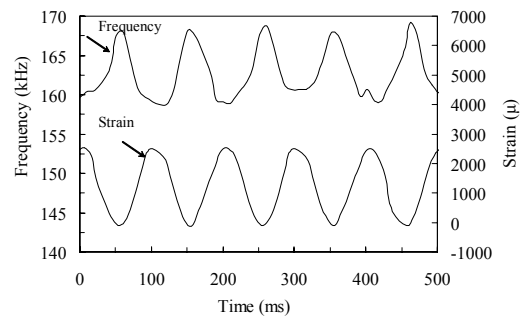
同調周波数 $f_t$ の測定は前節に示した測定用ソフトウェアを使用し、MEMを用いて測定した。STFTを用いた測定では、サンプリング周波数は高いが、同調周波数以外のピークを測定したノイズを含みやすい。

繰り返し荷重試験を実施していると、ひずみゲージが容易に破損してしまう。そこで、静的引張試験より得られている試験機の変位とひずみの関係を用いて、試験機の変位から間接的に試験片のひずみを算出した。

**5.3 実験結果と考察** 変位周波数が1 Hz, 10 Hzのときの繰り返し荷重試験から得た、同調周波数 $f_t$ 、ひずみの変化を図14(a), (b)に示す。横軸は時間、左側の縦軸はセンサの同調周波数 $f_t$ 、右側の縦軸は試験機変位から算出した試験片のひずみを示している。図14(a), (b)より、引張ひずみが負荷されるに伴いタイヤを用いた同調回路の同調周波数 $f_t$ が減少していることがわかる。これは図12の静的試験結果と一致する。



(a) Stroke frequency: 1 Hz



(b) Stroke frequency: 10 Hz

Fig. 14 Measured tuning frequency change of passive wireless sensor and strain change.

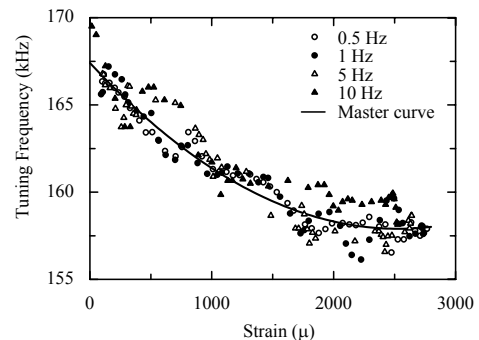


Fig. 15 Measured relationships between tuning frequency and strain.

図14(b)より変位周波数が10 Hzにおいても同調周波数はひずみに対応して変化しており、動的なひずみ測定が可能であることを実証した。ひずみが2500~3000 $\mu$ 付近で同調周波数の波形に乱れが生じているが、これは図8に示したように、このひずみ域で電気容量が飽和しているためである。

また、変位周波数が0.5 Hz, 1 Hz, 5 Hz, 10 Hzにおける同調周波数 $f_t$ とひずみの関係を図15に示す。図15は図14に示すようなひずみと同調周波数変化を3周期分取り出し、ひずみと同調周波数の関係を示したものである。横軸は負荷ひずみ、縦軸は同調周波数である。図より一定変位周波数の繰り返し荷重下において

も、また変位周波数が 0.5-10Hz と変化しても、ひずみと同調周波数の関係は一定である。また、図 15 の結果から同調周波数とひずみの関係を示すマスターカーブが得られる。

## 6. 結 言

一般乗用車用スチールラジアルタイヤのスチールベルト部電気容量を用いて、タイヤ自体をセンサとする手法を提案した。この手法では、新たにセンサを埋め込む必要がなくセンサとタイヤ間の剛性の差異に起因するセンサのはく離問題を引き起こさない。まず、タイヤベルト部内のスチールワイヤを利用した櫛型電極を組み、引張ひずみ負荷に伴う電気容量変化を測定した。さらに、タイヤベルト部を電気容量として、パッシブ型ひずみセンサ（同調回路）に接続し、静的引張試験、繰り返し荷重試験を実施し、センサの実現可能性を実験的に検討した。以上から得られた結果は以下のとおりである。

- (1) タイヤベルト部の電気容量変化を用いて、タイヤ自体をセンサとする、新しいタイヤひずみのモニタリング手法を提案した。本手法は付加センサが不要であり、タイヤセンサ間の剛性の差異に起因するセンサのはく離問題を引き起こさない。
- (2) 引張負荷ひずみに伴い、タイヤベルト部内のスチールワイヤ間隔が縮小するため、タイヤベルト部の電気容量は増加する。
- (3) タイヤベルト部を同調回路内の電気容量として使用することで、電源不要の無線パッシブ型モニタリングシステムを試作し、さらにタイヤベルト部の静的引張試験、繰り返し荷重試験を実施し、有効性を実証した。

## 謝 辞

本研究の遂行にあたり、株式会社ブリヂストンの援助を得た。関係各位に謝意を表する。

## 参考文献

- (1) A. Pohl, S. Reinhard, and R. Leonhard, The "Intelligent Tire" Utilizing Passive Saw Sensors—Measurement of Tire

- Friction, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 48-6(1999), 1041-1046.
- (2) A. Gavine, Common sense? The latest in vehicle safety comes courtesy of continental with its potentially life-saving tread deformation sensor, *Tire technol. Int.*, (2001), 32-33.
- (3) M. E. Palmer, C. C. Boyd, J. McManus, S. Meller, Wireless Smart-Tire For Road Friction Measurement and Self State Determination, *43rd AIAA/ASME/ASCE/AHS Struct., Structural Dyn., Mater. Conf.*, (2002-4).
- (4) M. Brandt, V. Bachmann, A. Vogt, M. Fach, K. Mayer, B. Breuer and H. L. Hartnagel, Highly sensitive AlGaAs/GaAs position sensors for measurement of tyre tread deformation, *Electron. Lett.*, 34-8(1998), 760-762.
- (5) K. Mnif, A smart Tire Pressure Monitoring System, *Sensors*, 12-11(2001), 40-46.
- (6) O. Yilmazoglu, M. Brandt, J. Sigmund, E. Genc and H. L. Hartnagel, Integrated InAs/GaSb 3D magnetic field sensors for "the intelligent tire", *Sens. Actuators A*, 94(2001), 59-63.
- (7) T. Umeno T, K. Asano, H. Ohashi, M. Yonetani, T. Naitou and T. Taguchi, Observer based estimation of parameter variations and its application to tire pressure diagnosis, *Control Eng. Pract.*, 9(2001), 639-645.
- (8) N. Persson, S. Ahlqvist, U. Forssell and F. Gustafsson, Low tyre pressure warning system using sensor fusion, *SAE Conf. Proc.*, (1991), 77-79.
- (9) C. Hautamaki, S. Zum, S. C. Mantell and D. L. Polla, Experimental Evaluation of MEMS strain Sensors Embedded in Composite, *J. Microelectromech. Syst.*, 8-3(1999), 272-279.
- (10) 松崎亮介, 轟章, 小林英男, 島村佳伸, タイヤの電気容量変化と共振回路を用いたひずみ無線モニタリング, *複合材料学会誌*, 30-2(2004), 55-62.
- (11) 松崎亮介, 轟章, 小林英男, 島村佳伸, タイヤの電気容量と電磁誘導変化を用いたひずみ無線パッシブモニタリング, *複合材料学会誌*, 30-4(2004), 157-164.
- (12) G. Levita, A. Livi, P. A. Rolla and C. Culicchi, Dielectric monitoring of epoxy cure, *J. of Polymer Sci., Part B*, 34-16(1996), 2731-2737.