

研究論文

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

松崎 亮介*¹, 轟 章*², 小林 英男*³, 島村 佳伸*⁴

(2003年7月9日受付)

Passive Wireless Strain Monitoring of Tire Using Capacitance and Electromagnetic Induction Change

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

(Received July 9, 2003)

Strain monitoring of automobile tires in-service is quite effective for improving the reliability of tires and ABS (Anti-lock Braking System). In a previous study, the authors proposed a new wireless strain monitoring method which is adopted in the tire itself as a sensor with an oscillator circuit. This method is simple and useful, but it requires a battery to activate the oscillator circuit. In the present study, a new passive wireless strain measurement system utilizing capacitance change of tires is proposed and experimentally investigated. The system consists of external antennas and strain sensor with an inductance-capacitance (LC) resonant circuit. The wireless system utilizes electromagnetic coupling between two inductors of the antenna and the sensor. This method enables us to use a part of an actual tire as a capacitor of the LC circuit. Deformation of the tire causes a resonant frequency change of the sensor. This resonant frequency change is measured as a change in the phase angle of the antenna by using electromagnetic induction. Tensile tests are performed and the phase angles are simultaneously measured. As a result, the method is experimentally shown to be effective as a passive 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⁾。このスマートタイヤは回転機器であるため、無線モニタリングが不可欠となり、さらに柔軟材料であるタイヤのゴムとの接着性、弾性率の差異に起因する界面応力の問題などがあり、センサ自体の長期の信頼

性が重要な課題である。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。

これに対して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はく離しやすい。MEMS (micro-electro-mechanical system) を用いたひずみセンサ⁸⁾はセンサとタイヤゴム間の接着が困難であり、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る。光ファイバーセンサを利用したスマートタイヤ⁹⁾は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り、高価となってしまう。

著者らの研究¹⁰⁾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、変形時の電気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、外部電源が必要なアクティブセンサであり、長期の使用に関しては問題があった。また、トラック用の特殊タイヤから作成した試験片を用いてい

*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

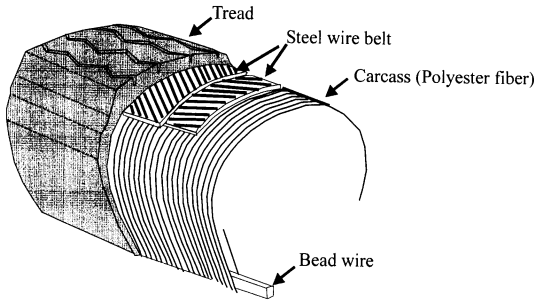


Fig. 1 The inner structure of a steel-wire-reinforced radial tire.

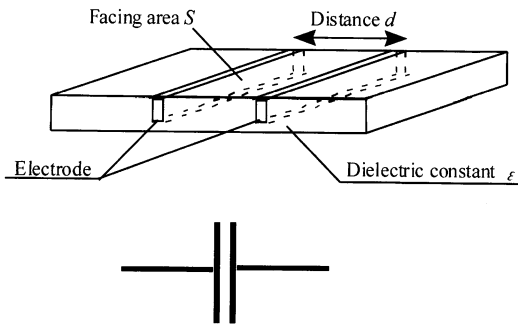


Fig. 2 Condenser model of a steel wire belt of a tire.

ため、乗用車用の実タイヤでの電気容量変化に対して未確認であった。

そこで本研究では、一般乗用車用ラジアルタイヤのベルト部分をセンサとして使用し、ひずみによる電気容量の変化を測定して、これを用いた外部電源なしの無線パッシブセンサを試作した。これをタイヤ試験片に適用し、適用可能性を実験的に検討した。

2. モニタリングシステム

本研究ではセンサとして市販ラジアルタイヤのベルト部を使用する。ラジアルタイヤの内部構造を Fig. 1 に示す。ベルト部は、タイヤ形状を形成するカーカスの上に繊維複合材料アングルプライのように積層されている。ここでタイヤベルトはスチールワイヤで合成ゴムを強化した複合材料となっている。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になる。

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ベルト部の構造は、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

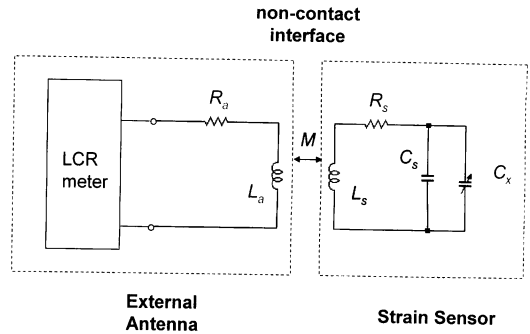


Fig. 3 Circuit model of wireless passive sensor using electromagnetic induction change.

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次式となる。

$$C = \epsilon \frac{S}{d} \tag{1}$$

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。この構造に引張ひずみが負荷されると、電極間隔 d が変化する。本研究では、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。

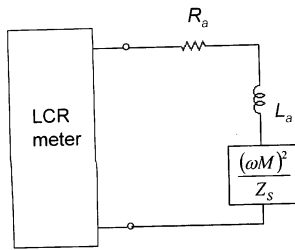
本研究では、無線パッシブひずみセンサシステムとして、Harpster ら¹¹⁾ が提案した無線パッシブ湿度センサシステムで用いられている方法を利用した。センサシステムは Fig. 3 に示すように、外部アンテナと、タイヤベルト部を組み込んだセンサから構成されている。外部アンテナとセンサ間は2つのコイルによる電磁誘導を利用した無線区間となっている。ここで、 L はコイルの自己インダクタンス、 R はコイルの直列抵抗成分、 M は相互インダクタンス、 C はコンデンサ電気容量、 ω は角振動数を表す。また C_x は可変コンデンサの電気容量を表す。ただし、タイヤ試験片を回路に組み込むことで C_x はタイヤ試験片の電気容量を示し、この値はひずみにより変化する。添え字 s はセンサ側、 a はアンテナ側を表す。

センサ側の回路は固定電気容量 C_s 、可変(タイヤ試験片)電気容量 C_x 、コイル L_s からなる LC 共振回路になっている。

ここでセンサ側のインピーダンス $Z_s(\omega)$ は次式となる。

$$Z_s(\omega) = R_s + j \left\{ \omega L_s - \frac{1}{\omega (C_s + C_x)} \right\} \tag{2}$$

これより、共振周波数 f_r は次式となる。



Equivalent Circuit

Fig. 4 Equivalent circuit model of wireless passive sensor.

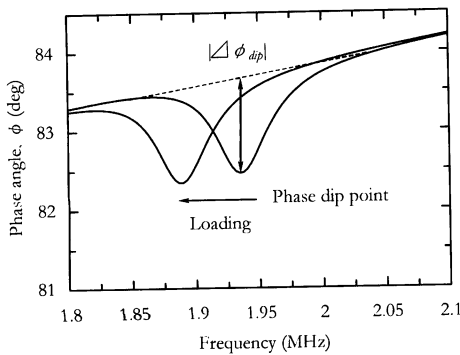


Fig. 5 Shift of phase dip point due to tensile loading of tire.

$$f_r = \frac{1}{2\pi \sqrt{L(C_s + C_x)}} \quad (3)$$

式(3)より、タイヤにひずみが負荷されると電気容量 C_x が変化するため、共振周波数 f_r は変化する。

一方、等価回路は Fig. 4 のように示されるため、アンテナ側から見たインピーダンス $Z_a(\omega)$ は次式となる。

$$Z_a(\omega) = R_a + j\omega L_a + \frac{\omega^2 M^2}{Z_s(\omega)} \quad (4)$$

式(4)よりセンサ側回路の共振周波数 f_r (角振動数 ω_0) におけるインピーダンス $Z_a(\omega_0)$ は次式となる。

$$Z_a(\omega_0) = R_a + j\omega L_a + \frac{\omega^2 M^2}{R} \quad (5)$$

アンテナ側インピーダンス Z_a の位相角 ϕ は、測定周波数がセンサ回路の共振周波数 f_r と一致する点で極小値(ディップ点)を持つ (Fig. 5 参照)。Fig. 5 において、横軸が測定周波数、縦軸が位相角である。つまり、この位相角 ϕ ディップ点の周波数を求めることでセンサ側共振周波数 f_r を求めることができる。共振周波数 f_r は式(3)で表されるため、 f_r を求めることでタイヤ試験

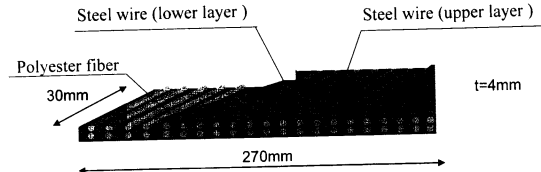


Fig. 6 Specimen configuration.

片電気容量 C_x 、つまりひずみの測定が可能になる。

通常、無線通信方法として電磁誘導を利用する場合、相互インダクタンス M の値がコイル間隔 d_i により変化するため、アンテナ側インピーダンス Z_a が d_i により変化し問題となる。しかしこのセンサシステムでは、位相角 ϕ の急減する点(ディップ点)の周波数を測定するため、相互インダクタンス M の値に依存せず、コイル間隔 d_i による影響を受けない。しかしディップ深さ $|\Delta\phi_{dip}|$ (Fig. 5 参照) は次式のように相互インダクタンス M に依存するため、距離 d_i が増加するとディップ深さ $|\Delta\phi_{dip}|$ は小さくなる。

$$|\Delta\phi_{dip}| = |\angle(R_a + j\omega L_a) - \angle Z(\omega_0)| \cong \tan^{-1} \left(\frac{\omega_0 M^2}{L_a R} \right) \quad (6)$$

また、センサ共振回路の共振の鋭さを表す Q_s (quality factor) は次式となる。

$$Q_s = \frac{1}{R_s} \sqrt{\frac{L_s}{C_s + C_x}} \quad (7)$$

これより、 R_s を小さくするか L_s を大きくすることで Q_s を増加することが可能になる。 Q_s が高いセンサは位相角 ϕ のディップが鋭くなり、ディップ点の周波数測定が容易になるため、 Q_s の高いセンサが求められる。

以上のように、このセンサシステムでは、アンテナ側インピーダンス位相角 ϕ ディップ点の周波数は、相互インダクタンス M に依存せず、センサ側の共振周波数 f_r と等しくなる。

3. 実タイヤスチールベルト部の測定

3.1 実験方法

電気容量変化でひずみを測定する実タイヤ試験には、初期電気容量とひずみによる電気容量変化が大きいことが求められる。そこで求められる特性を得るような電極接続配置を求め、乗用車用タイヤから切り出した引張試験片を作成し、引張試験を実施して、引張りひずみ負荷時の電気容量特性を調査した。

使用した試験片を Fig. 6 に示す。乗用自動車用スチー

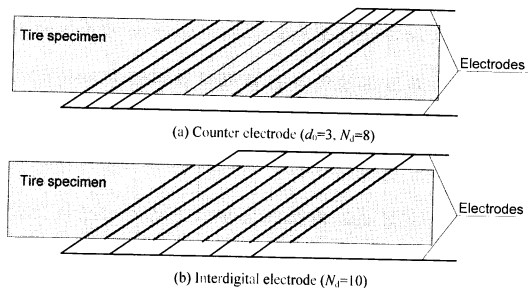


Fig. 7 Electrodes alignment.

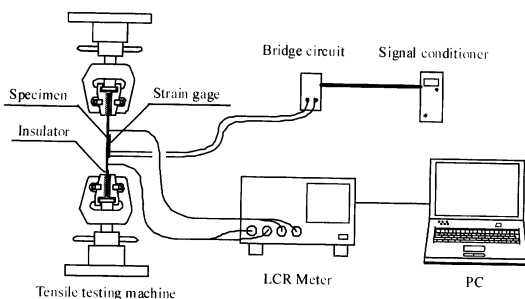


Fig. 8 Experimental set-up for capacitance change measurement.

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 の矩形試験片である。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, ワイヤを含む層が 2 層存在する (Fig. 6 参照)。そこで電極を取り付けるワイヤとして, 上層のワイヤのみを利用する方法 (以後単に上層型), 下層のワイヤのみを利用する方法 (下層型), 上層のワイヤと下層のワイヤを両方利用する方法 (上下層型) の 3 通りについて実験した。

また, 無負荷時の初期電極間隔 d_0 , 使用する電極数 (ワイヤ本数) N_e (Fig. 7 参照) を変化させ, 引張負荷・除荷による電気容量変化を測定した。ここで初期電極間隔 d_0 は隣接ワイヤ間隔 (4 mm) を 1 とした値を用いている。さらに電気容量を増加させる方法として Fig. 7 に示すような櫛型電極を作成し, 電気容量の変化を測定した。

実験装置は Fig. 8 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・除荷を実施し, 電気

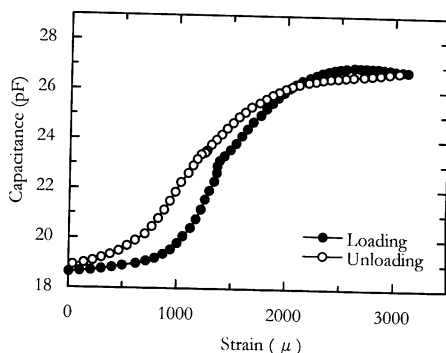


Fig. 9 Capacitance change during loading-unloading (upper layer type).

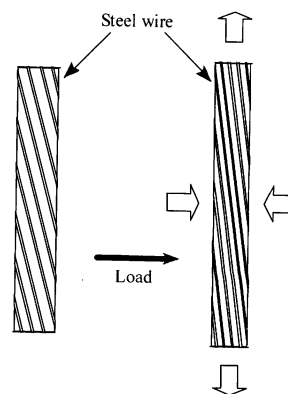


Fig. 10 Schema of spacing decrease with the increase of tensile load.

容量変化を測定周波数 100 kHz で測定した。

3.2 ひずみによる変化

上層型試験片に初期電極間隔 $d_0=1$, 電極数 $N_e=2$ で電極を作成し, 引張負荷・除荷によるタイヤ試験片の電気容量変化を測定した。測定結果を Fig. 9 に示す。図中横軸は負荷ひずみをひずみゲージで測定した値, 縦軸は電気容量である。ひずみの増加に伴い電気容量は増加する。これは Fig. 10 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, ひずみが増加することでワイヤ間隔が縮小するためである。

周波数特性を Fig. 11 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。図に示すように測定周波数が高くなるに伴い, 電気容量は減少し, 位相角 ϕ は -90° に近づく。これらの変化は下層型, 上下層型, 櫛型電極においてもほぼ同様であった。

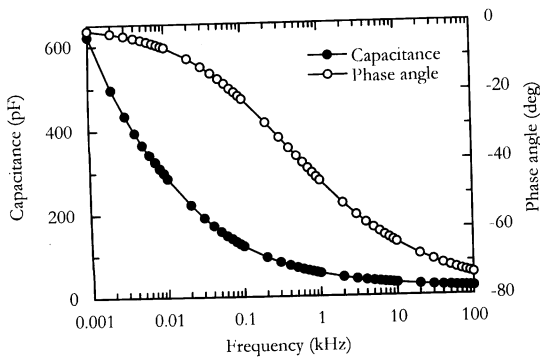


Fig. 11 Frequency response of the capacitance and phase angle of tire (upper layer type).

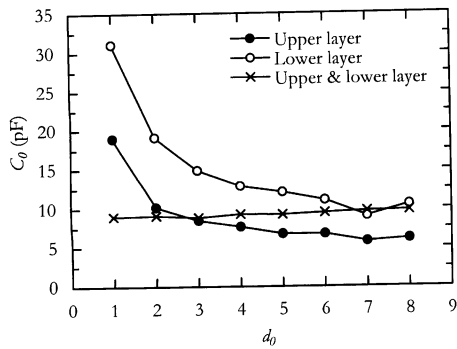


Fig. 12 Relationship between initial capacitance and spacing d_0 for three different types.

3.3 初期電極間隔 d_0 による変化

電極数 $N_d=1$ に固定し、初期電極間隔 d_0 を変化させたときの初期電気容量 C_0 ・電気容量変化 ΔC (ひずみ $3,000 \mu$ を加えたときの変化量) を Fig. 12, 13 に示す。図中において、横軸は初期電極間隔、縦軸は電気容量である。電極位置の3タイプの結果を図中に示している。この図から上層型 (●印)、下層型 (○印) では初期電極間隔 d_0 が增大するにつれ初期電気容量 C_0 、電気容量変化 ΔC は減少することがわかる。また、上層型 (●印) は下層型より初期電気容量 C_0 は小さいが電気容量変化 ΔC は大きいことがわかる。上下層型 (×印) の場合は初期電極間隔 d_0 の影響は認められない。

3.4 電極数 N_d による変化

初期電極間隔 d_0 を 1 に固定し、電極数 N_d を変化させたときの初期電気容量 C_0 ・電気容量変化 ΔC を Fig. 14, 15 に示す。横軸の電極数 N_d を増やすと初期電気容量 C_0 は増加するが、電気容量変化 ΔC は上層型 (●印) で

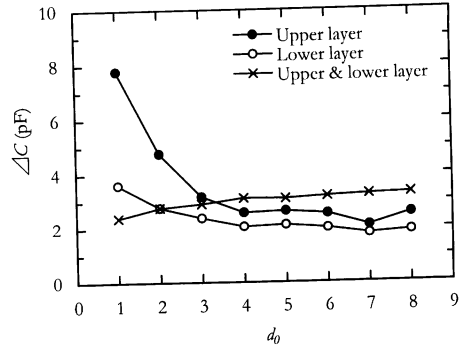


Fig. 13 Relationship between capacitance change and spacing d_0 for three different types.

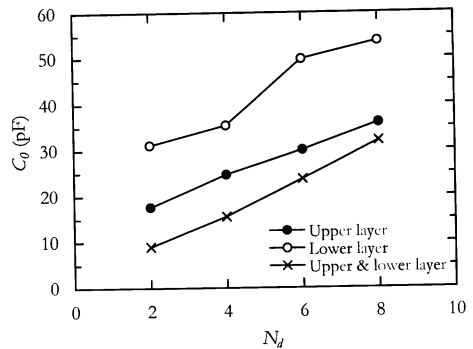


Fig. 14 Relationship between initial capacitance and number of wires N_d for three different types.

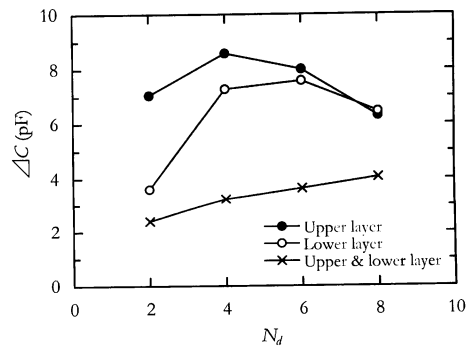


Fig. 15 Relationship between capacitance change and number of wires N_d for three different types.

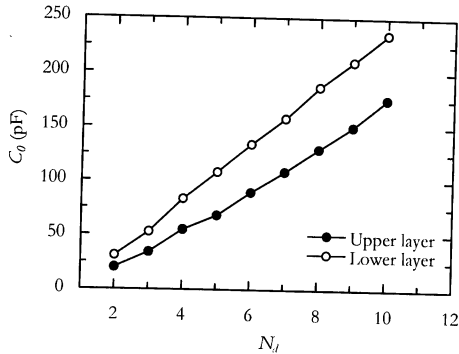


Fig. 16 Relationship between initial capacitance and number of wires N_d for two different types of comb-shaped electrodes.

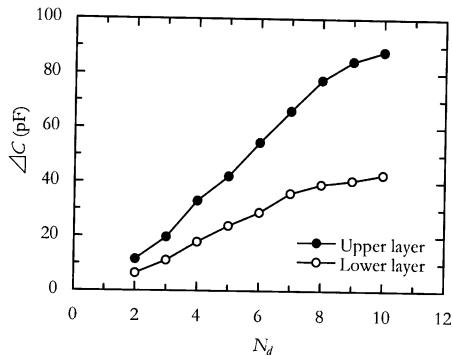


Fig. 17 Relationship between capacitance change and number of wires N_d for two different types of comb-shaped electrodes.

$N_d=4$, 下層型 (○印) で $N_d=6$ のときに最大値を取る。初期電極間隔 d_0 の変化と同様に、上層型 (●印) は下層型より初期電気容量 C_0 は小さいが電気容量変化 ΔC は大きい。

3.5 櫛型電極

櫛型電極の電極数 N_d を変化させたときの初期電気容量 C_0 ・電気容量変化 ΔC を Fig. 16, 17 に示す。ただし上下層型の場合は、構造上櫛型電極が組めないで実施しない。図より電極数 N_d を増やすことで初期電気容量 C_0 と電気容量変化 ΔC は大幅に増加することがわかる。また上層型は下層型と比較して初期電気容量 C_0 は小さいが、電気容量変化 ΔC は 2 倍大きい。

以上より、上層型に櫛型電極 ($N_d=10$) を組むと C_0 , ΔC の大きい電極接続配置が可能になる。さらに N_d を

Table 1 Coil parameters.

	L_n	L_s
Length (mm)	2.69	18.2
Number of windings	5	19
Diameter of coil (mm)	6.56	6.56
Diameter of wire (mm)	0.600	0.600
Measured L (nH)	188	725
Calculated L (nH)	248	670
Resistance (Ω)	0.331	0.214

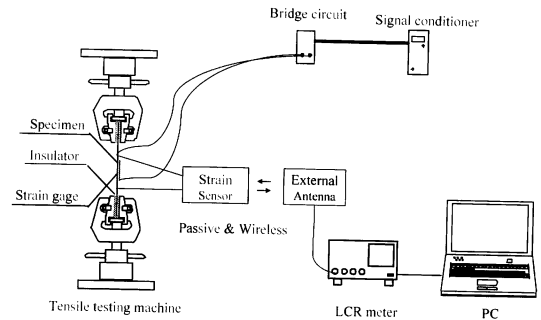


Fig. 18 Experimental set-up for tensile test with wireless passive sensor.

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 程度までしかここでは測定していない。

4. 無線パッシブセンサを用いた引張試験

4.1 実験方法

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・除荷による位相角 ϕ ディップ点周波数の変化を測定した。ここで実験に使用したアンテナ側コイル L_n , センサ側コイル L_s の特性を Table 1 に示す。また C_0 として $0.01 \mu\text{F}$ のコンデンサを使用した。

実験装置を Fig. 18 に示す。実験装置は引張試験機、タイヤ試験片、無線パッシブひずみセンサ、外部アンテナ、LCR メータ、PC から構成されている。LCR メータを使用してアンテナ側インピーダンス位相角 ϕ の周波数特性を測定する。

提案したパッシブセンサは、検知対象として純粋な電気容量を想定している。そこでまず、センサシステムの有効性を確認するため、可変コンデンサとして電気容量成分のみのセラミックコンデンサ 2000 pF , 4000 pF を

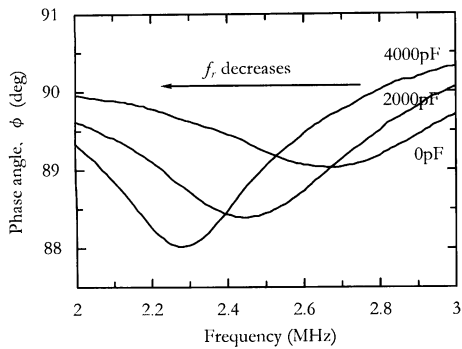


Fig. 19 Phase angle change with capacitance change ($C_x=0$ pF; 2000 pF; 4000 pF).

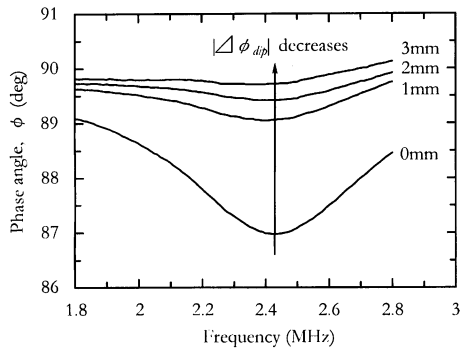


Fig. 20 Phase angle change with distance change ($d_i=0$ mm; 1 mm; 2 mm; 3 mm).

用いて位相角 ϕ の周波数特性を測定した。また、コイル間隔 d_i の影響を調べるため、コイル間隔 d_i を 0 から 3 mm まで変化させ位相角 ϕ の周波数特性を測定した。

次に、タイヤ試験片に上層型で $N_d=10$ の楕型電極を組み、センサ側コンデンサ C_x としてこの楕型電極間電気容量を使用し引張試験を行った。引張試験は変位速度 1 mm/min、変位 6 mm で負荷・除荷を実施した。ここでコイル間隔 d_i は 1 mm とした。

4.2 実験結果と考察

可変コンデンサ C_x として 0 pF, 2000 pF, 4000 pF のコンデンサを使用したときの位相角 ϕ の周波数特性を Fig. 19 に示す。図中横軸は測定周波数、縦軸が位相角である。図より可変コンデンサの C_x の増加に伴い位相角 ϕ ディップ点(急減点)の周波数は減少し、共振周波数値が減少していることがわかる。またコイル間隔 d_i を変化したときの位相角 ϕ の周波数特性を Fig. 20 に示す。コイル間隔 d_i が増加(測定距離が離れること)しても、 $|\Delta\phi_{dip}|$ が小さくなるだけで位相角 ϕ ディップ点の

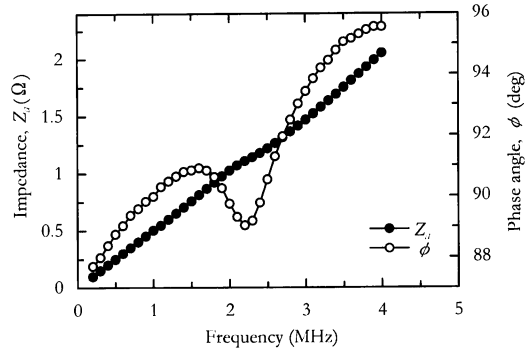


Fig. 21 Z_a and ϕ of antenna impedance of wireless passive sensor using tire as C_x .

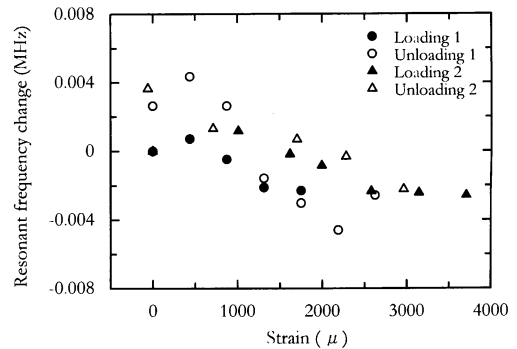


Fig. 22 Relationship between strain and resonant frequency of wireless passive sensor.

周波数は変化していない。ただし、距離の増大に伴いディップ点を正確に求めることが困難になっている。

可変コンデンサとしてタイヤ試験片を利用したときの、無負荷時アンテナ側インピーダンス Z_a 、位相角 ϕ の周波数特性を Fig. 21 に示す。図中横軸は測定周波数、縦軸は測定インピーダンス (●印) と位相角 (○印) である。図よりインピーダンス Z_a は単調増加するが、位相角 ϕ はタイヤとコイルでできた回路の共振周波数 f_r でディップ(急減)しているのがわかる。

タイヤ試験片を引張負荷・除荷した結果を Fig. 22 に示す。なお、この試験は 2 回実施し、1 回目の負荷・除荷を ●印・○印、2 回目の負荷・除荷を ▲印・△印でそれぞれ図に示す。図中横軸は負荷ひずみである。ここで、縦軸の共振周波数 f_r は位相角 ϕ ディップ点の周波数から求めた値である。図より、ひずみの増加に伴い、共振周波数 f_r 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が増加するためである。また、測定デ

ータにややばらつきが見られるが、これは測定機器 (LCR メータ) の性能によるところが大きい。使用した LCR メータの最大測定周波数は 5 MHz と制限されていたため、タイヤ試験片にコンデンサ C_s (0.01 μ F) を並列接続し、共振周波数 f_r を測定周波数範囲内に下げる必要があった。この結果、タイヤ試験片の電気容量変化に伴う共振周波数変化は 4 kHz 程度と小さく、位相角 ϕ ディップ点の周波数変化を精度よく測定するのが困難となり、データにばらつきが生じた。しかし、高周波数域で測定可能なインピーダンスアナライザを使用することで、共振周波数 f_r を下げる必要はなくなり、並列コンデンサ C_s は不要になるため、この問題は改善できると考える。

以上より電磁誘導を利用したパッシブセンサがタイヤ試験片に適用可能であることを実証した。実用上の構成として、センサ回路をタイヤ内部に、外部アンテナを車軸上に設置する予定であるが、この場合、センサと外部アンテナの距離は 300 mm 程度となり、現在可能な無線距離 (コイル間隔 d) 5 mm を大きく上回り問題となっている。今後、無線距離を大きくするために、コイル形状を改善していく必要がある。また、位相角 ϕ ディップ点を測定するのに 2 分程度かかるため、現状では静的なひずみ測定のみ限定されるという問題点がある。高感度高速の測定機器によって将来的には改善されると思われる。

5. 結 言

タイヤ試験片の電気容量変化の測定から、最適な電極接続配置について検討した。またタイヤのひずみ無線モニタリング手法として、電磁誘導を利用した無線パッシ

ブセンサシステムを適用し、センサ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) タイヤ試験片の電気容量特性から、最適な電極接続配置を決定した。
- (2) 電磁誘導を利用した無線パッシブセンサを試作し、タイヤ試験片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** (1999), 1041-1046.
- 3) K. Mnif : *Sensors*, **18** (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.* (1999), 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 : *Proceedings of 43rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*, AIAA (2002), AIAA 2002-1548.
- 10) 松崎亮介, 轟 章, 小林英男, 島村佳伸 : 日本複合材料学会誌, **30**, 2 (2004), 55-62.
- 11) T.J. Harpster, B. Stark & K. Najafi : *Sensors Actuators A*, **95** (2002), 100-107.