

自動車用タイヤのインテリジェント化



東京理科大学 理工学部機械工学科 松崎 亮介

Ryosuke Matsuzaki, Tokyo University of Science

研究背景

2000年 ブリヂストン/ファイアストーンタイヤのリコール



- ✓ タイヤバーストが頻発
- ✓ 空気圧の低下が原因



Tire burst in 2000

TREAD (Transportation recall enhancement, Accountability and Documentation) Act



TPMS (tire pressure monitoring system: タイヤ空気圧監視装置) の装着義務化

TPMS (タイヤ空気圧監視装置)

義務化を受け、既にいくつかのタイヤ空気圧監視装置が開発されている



Clamp-on-rim by SmarTire



Valve attached by Bridgestone



Valve attached by Alps Electronic



Valve-cap-sensor by Tiresentry

TPMS (タイヤ空気圧監視装置)

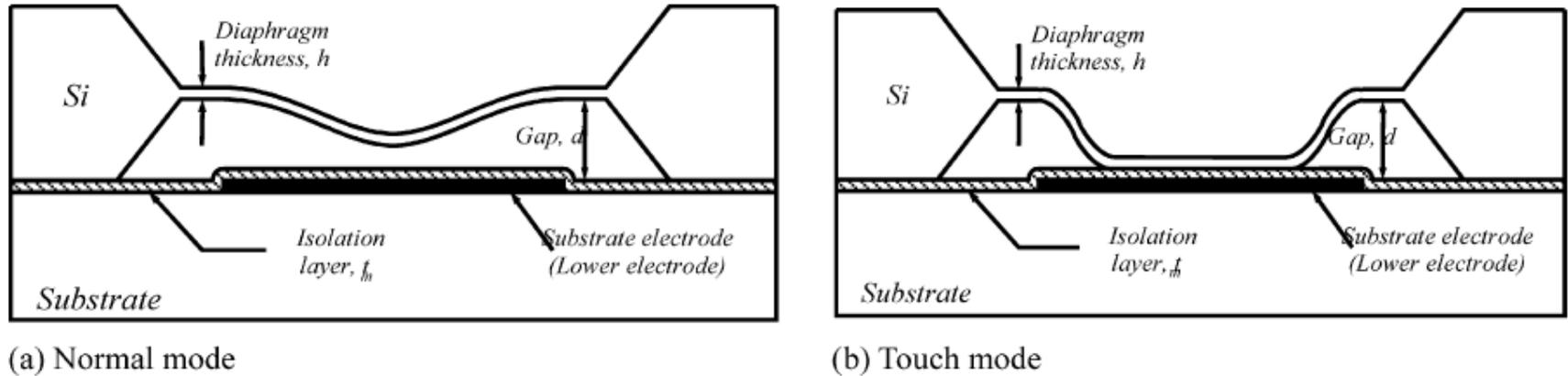


Fig. 5. Structure of a capacitive pressure sensor: (a) normal mode, (b) touch mode.

J.-G. Oh et al. / Sensors and Actuators A 141 (2008) 631–639

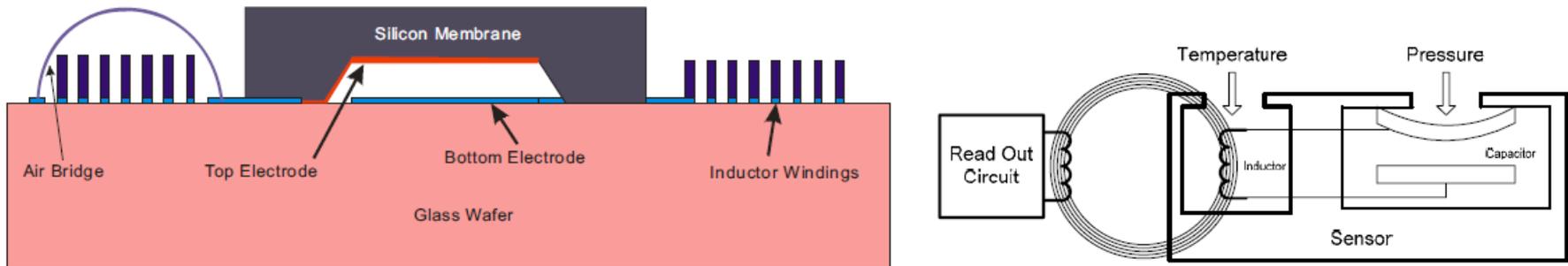


Figure 3. The cross section of the proposed structure for pressure and temperature sensor

タイヤ/路面監視装置

- 空気圧に加えて、種々のセンシングが期待される
- 人身事故の55%以上が雨や雪による路面の摩擦係数低下

(Statistical yearbook 2002 for the federal republic of Germany)

タイヤ/路面監視装置の装備

- 路面情報警告システム(運転手, メンテナンス)
- 車両制動性能の向上



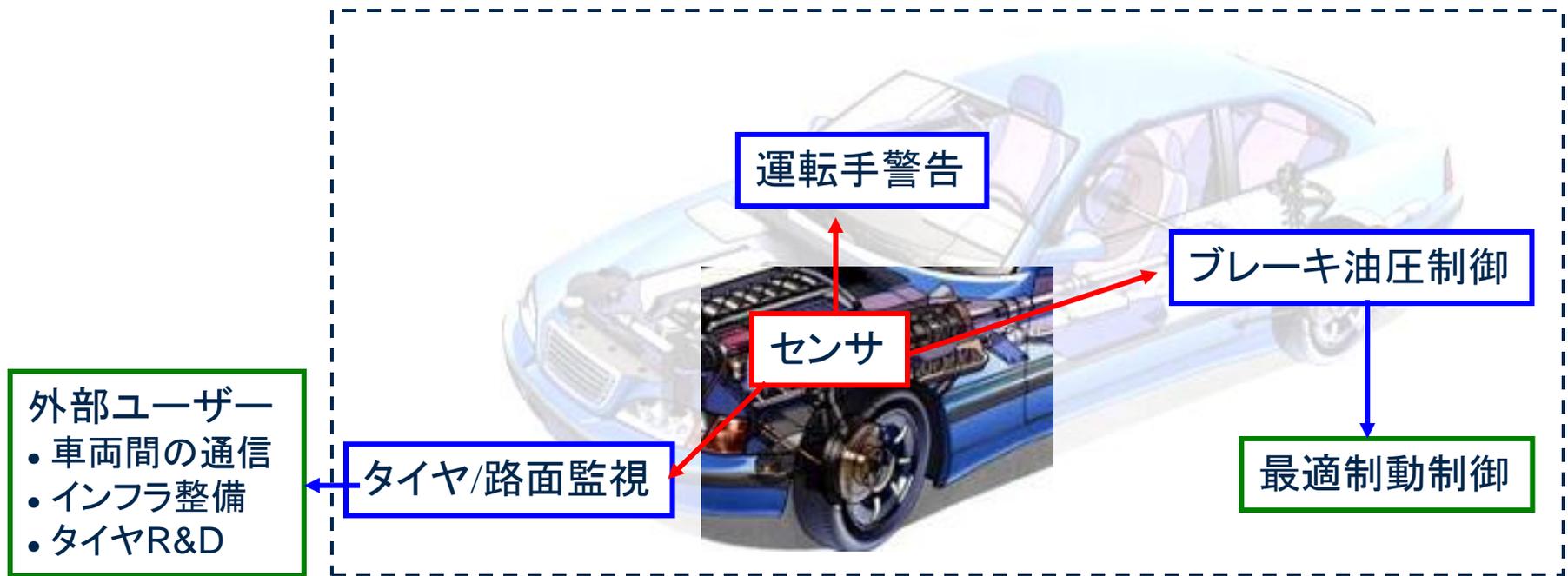
間接的測定(車軸回転数, GPS, ...)では低精度

直接タイヤを監視するシステムが必要(インテリジェントタイヤ)

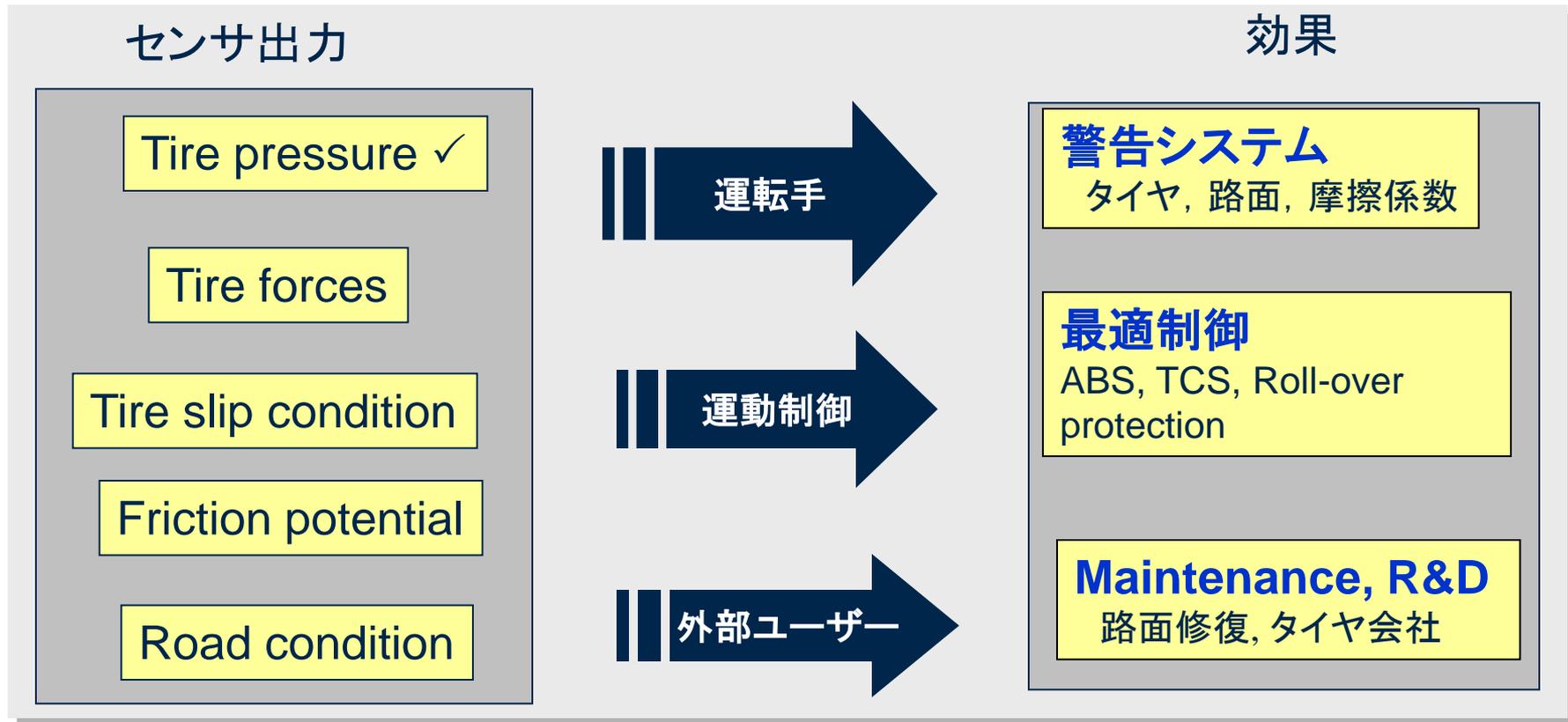
インテリジェントタイヤ

タイヤ/路面状態監視等のため、**空気圧, 温度, ひずみ, 加速度センサ等**をタイヤ内部に搭載

⇒ 最適制動制御, 運転手警告, タイヤ/路面監視



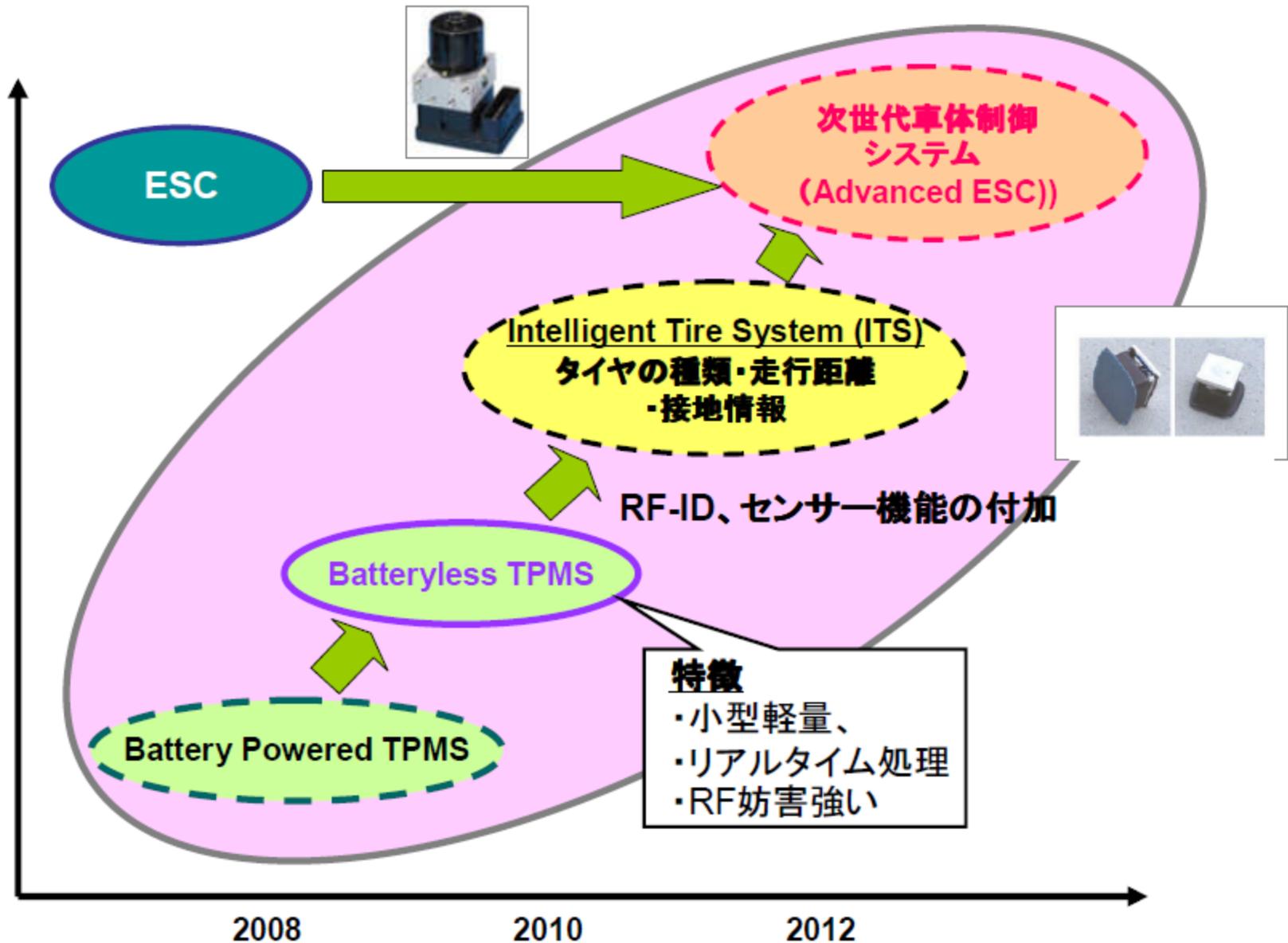
測定データと効果



加速度センサを用いる測定では困難(タイヤの大きさ, 回転速度に依存)

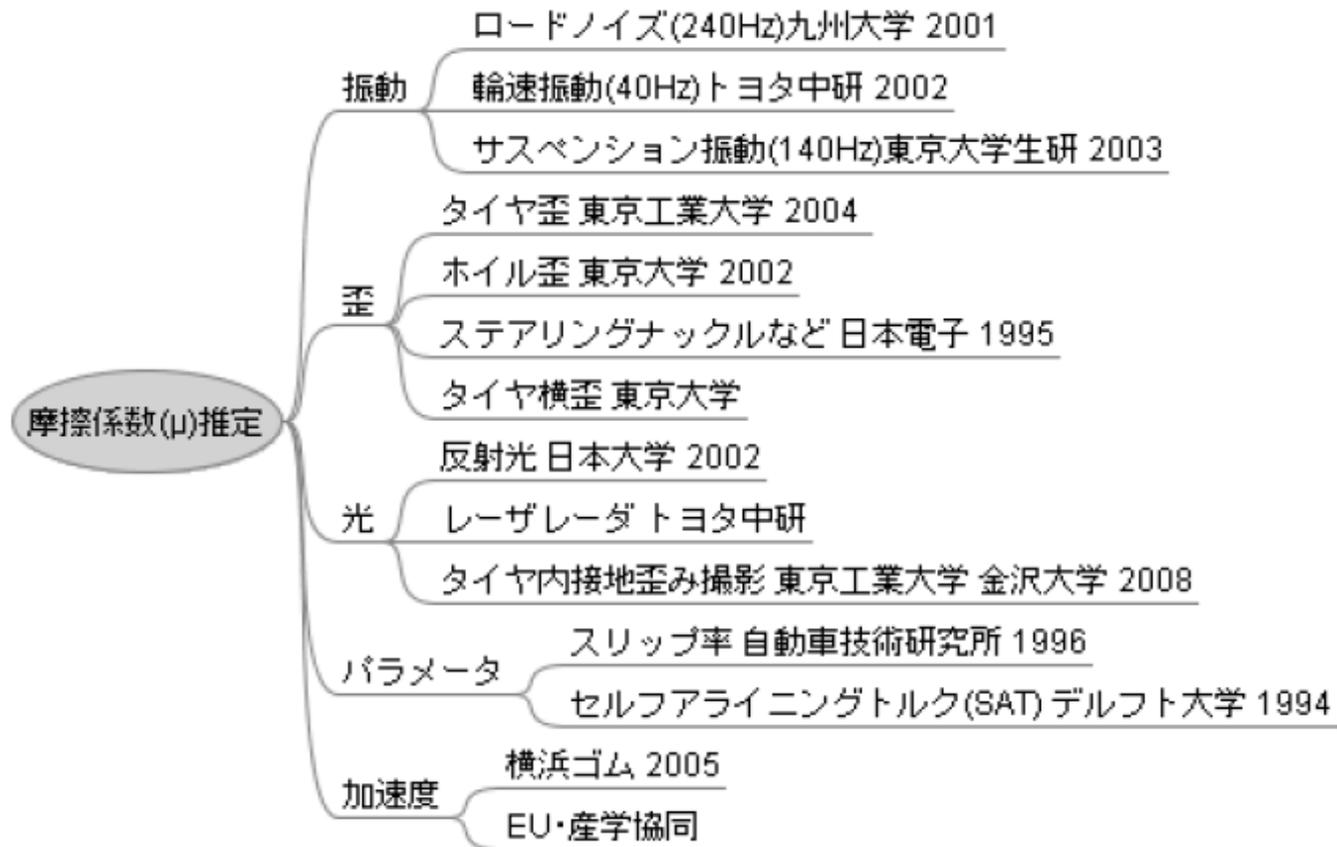
⇒ **タイヤひずみ**から, スリップ比, 摩擦係数を測定する

Development Road Map



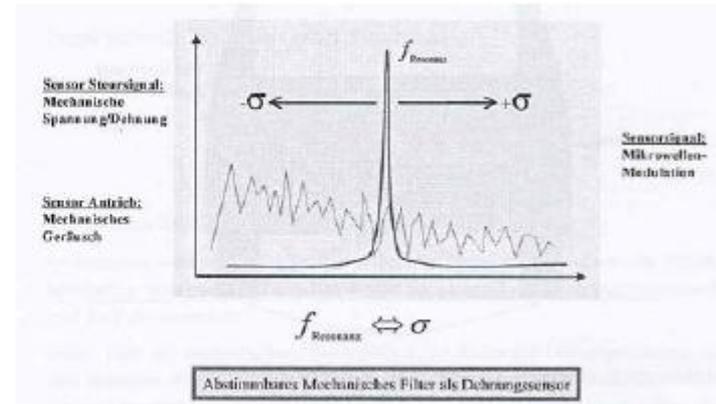
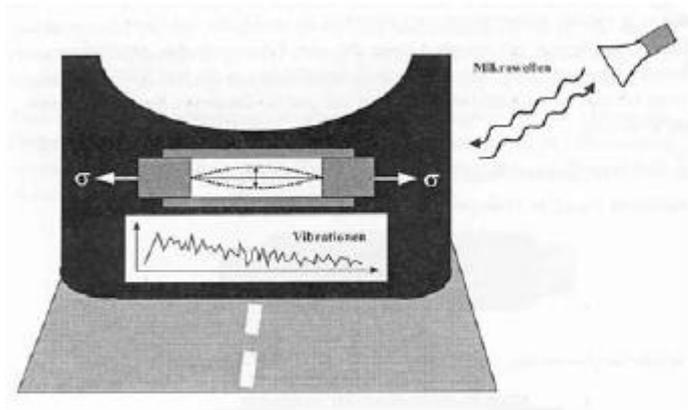
摩擦計測の研究動向(センシング)

研究動向

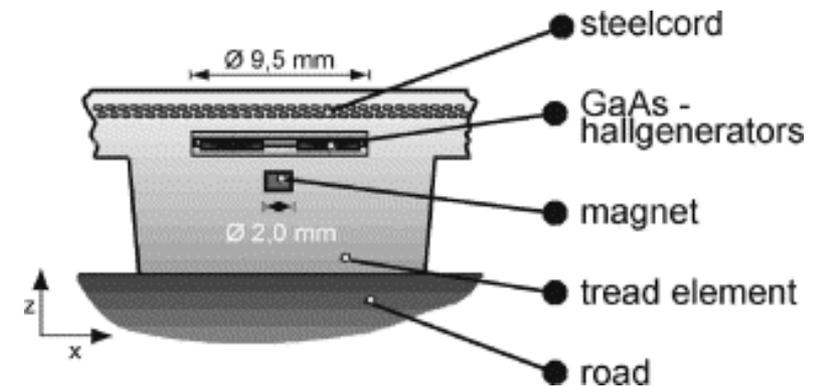
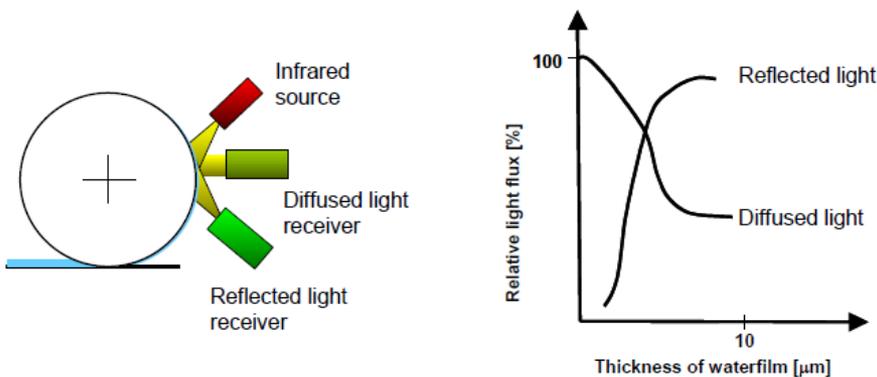


様々なセンシング方法が提案されている。
実際に適用されたシステムはまだ無い。

摩擦計測の研究動向(センシング)



Görich et al., Fortschritt-Berichte VDI Reihe 12 Nr. 181, VDI-Verlag, 2002.



Tyren et al., Fortschritt-Berichte VDI Reihe 12 Nr. 511, VDI Verlag, 2002.

タイヤひずみ測定従来手法

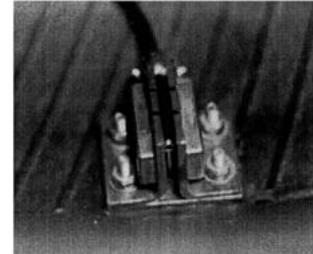
■従来手法

- ひずみゲージ, SAW, MEMS, 光ファイバ, etc.
 - ✓ タイヤゴム (E : 数MPa) と比較して高弾性, 低伸び率
 - ✓ 大型, 高価格, 有線接続
- センサのはく離・破損が生じる
 - ✓ 10^6 回以上の繰り返し荷重
 - ✓ 突起乗り越え時の大変形 (通常はひずみ $\pm 0.3\%$)

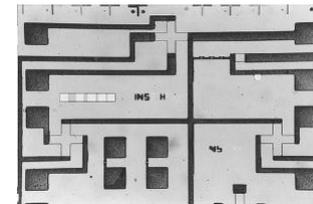


■タイヤひずみセンサに求められる条件

- 低弾性, 大変形に対応, 小型
- 低価格
- 無線測定



SAW tire sensor



MEMS tire sensor

研究目的

問題点

- ✓ タイヤひずみ測定センサが確立していない
- ✓ バッテリーレス無線技術
- ✓ 取得タイヤひずみデータの活用法

目的

- タイヤひずみ測定に適用可能な新しいセンサの開発
- バッテリーレス無線測定システムの開発
- ひずみを利用した車両運動制御, 路面状態警告システムの提案



タイヤひずみ測定を利用した統合車両安全システムの確立

タイヤひずみ測定手法の開発

ひずみセンサ

- パッチ型フレキシブルセンサ
- セルフセンシング

バッテリーレス無線通信方法

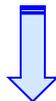
- 電磁誘導を用いたパッシブ無線
- 同調回路を用いたパッシブ無線



ひずみを利用した最適制動制御，路面状態警告システムの提案

Capacitive rubber-based sensor

従来型センサ(箔ひずみゲージ, SAW, 光ファイバ, PZT, PVDF,...)
高剛性 → 異材界面端部での応力特異性(はく離, 変形干渉)
低破断ひずみ → 突発的大入力
無線システムへの接続性



タイヤと同等の力学的特性 (E , ν , 線膨張係数)

- 大ひずみ対応, タイヤ変形を妨げない
- 長期運用(10^6 回)でセンサ特性の変化小

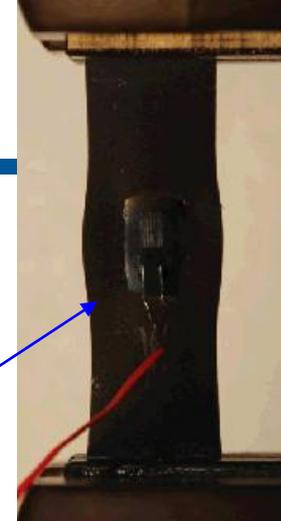
無線測定に適した電気容量型

- Lift-offフォトリソグラフィーを利用したAu楕型電極の作成

将来的には, タイヤに直接センサ描画可能

- DirectWrite thermal spray等
- センサ貼付なし・応力集中なし

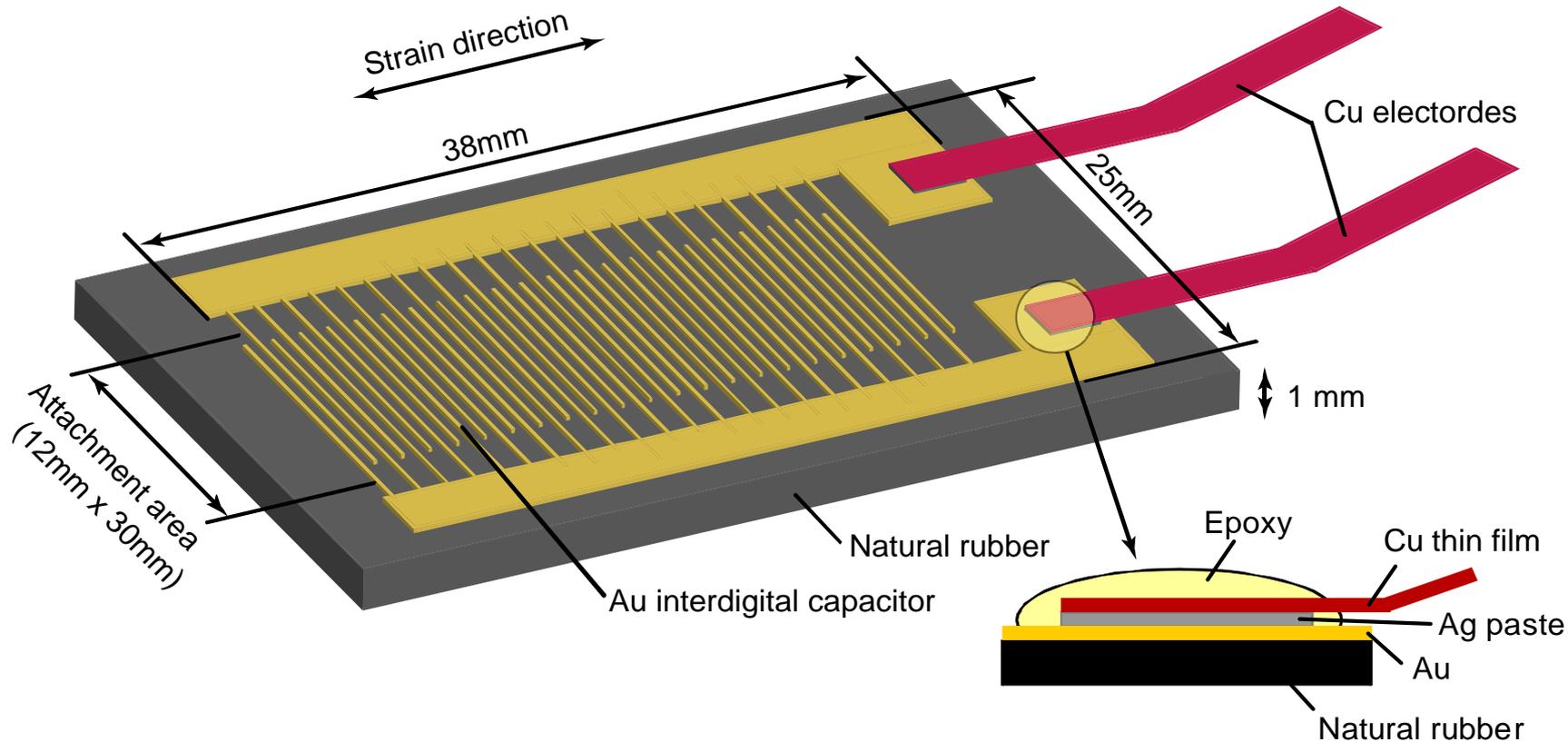
ゴムの変形を妨げる



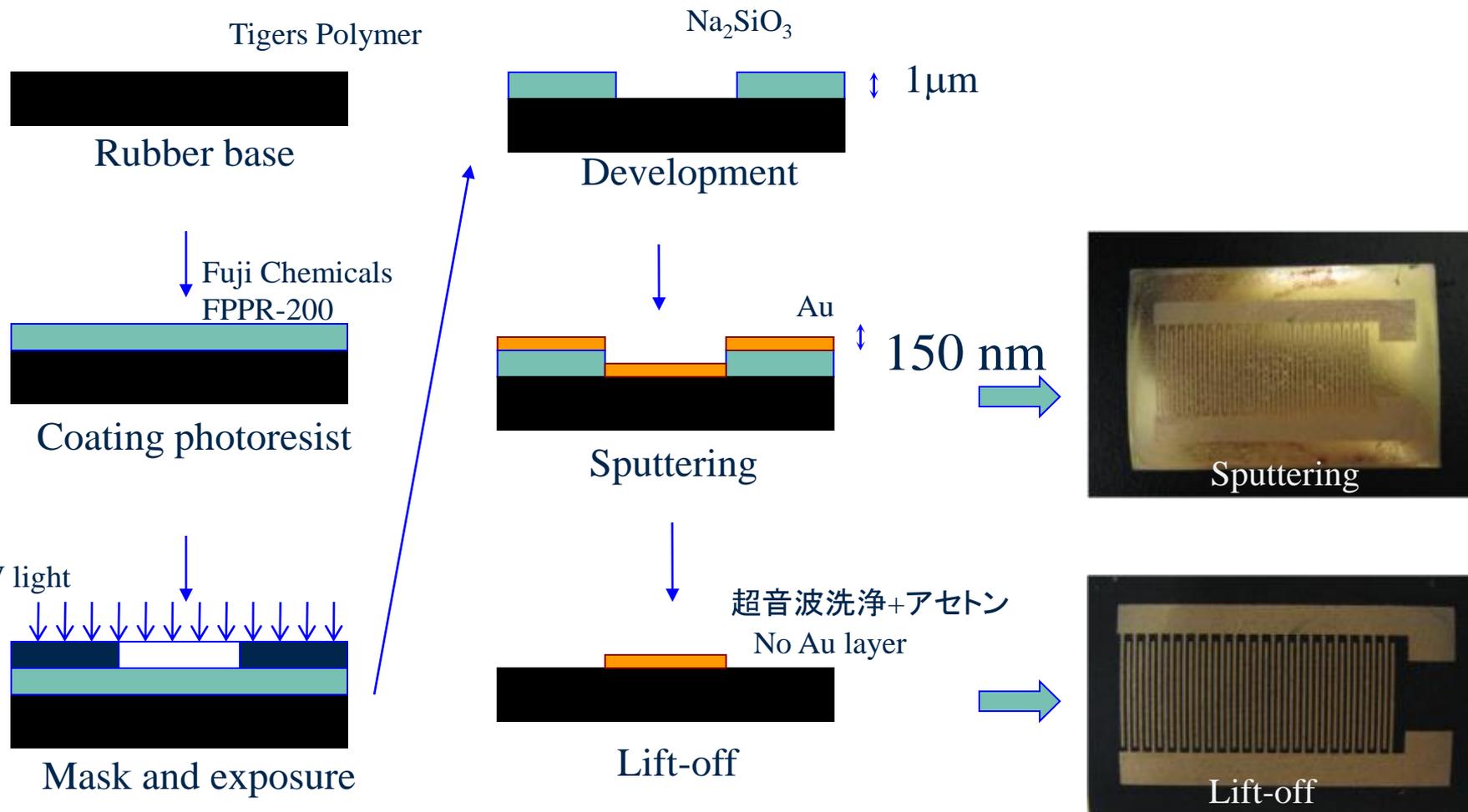
従来
大ひずみゲージ

Rubber-based sensor for intelligent tires

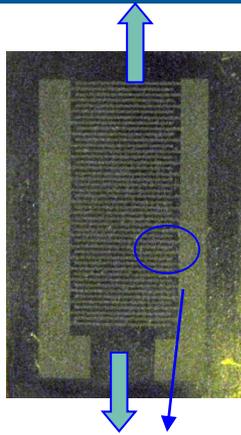
- 天然ゴムベースパッチ型
- タイヤゴムベースも作成済み



センサ作製プロセス

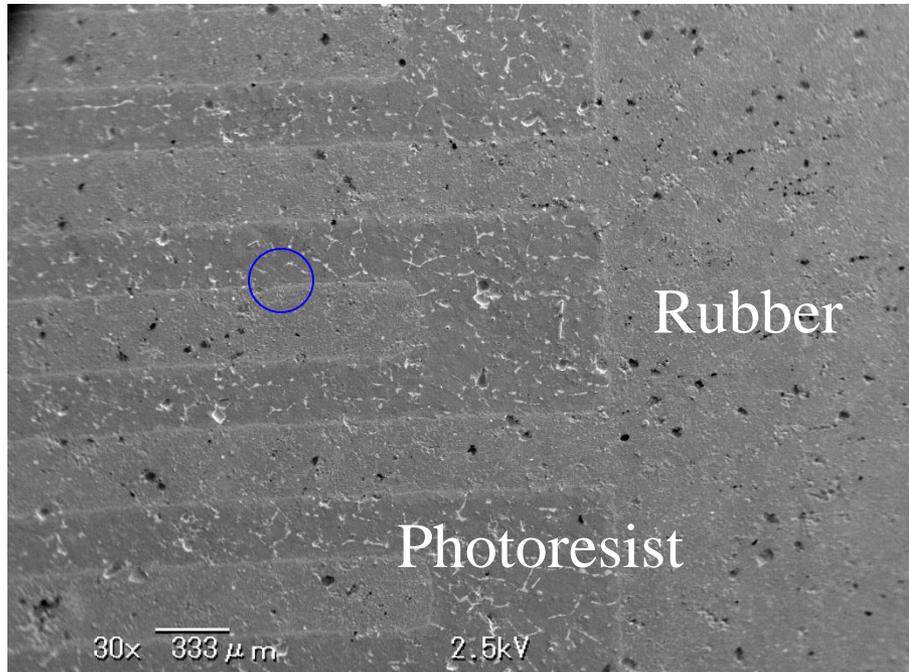


Photoresist coating observation

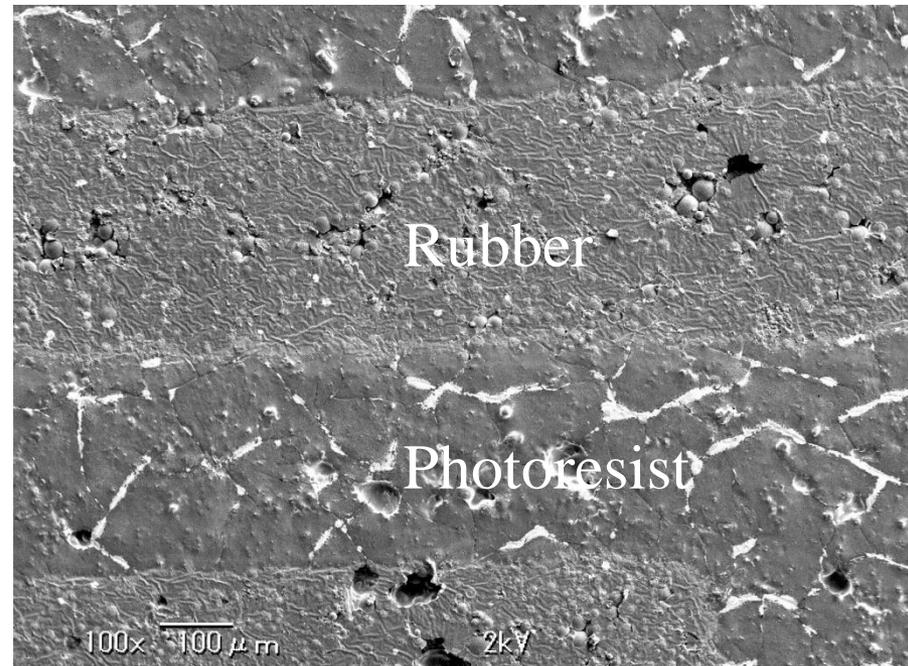


Loading direction (circumferential direction of tire)

- Natural rubber, photoresist pattern, and Au sputtering (20nm)
- Observation using SEM (KEYENCE VE-8800)

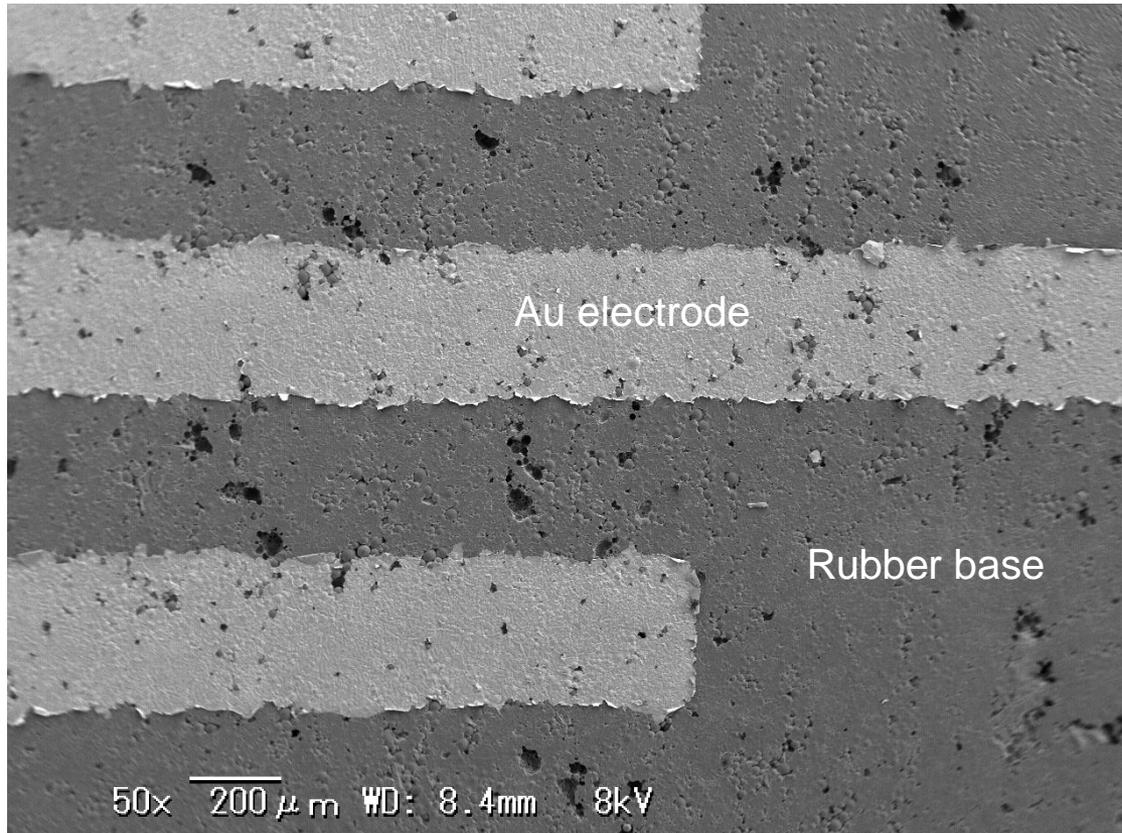


Photoresist pattern



Closeup

SEM of Au electrodes



天然ゴム部ははく離性良
Au端部に破れ

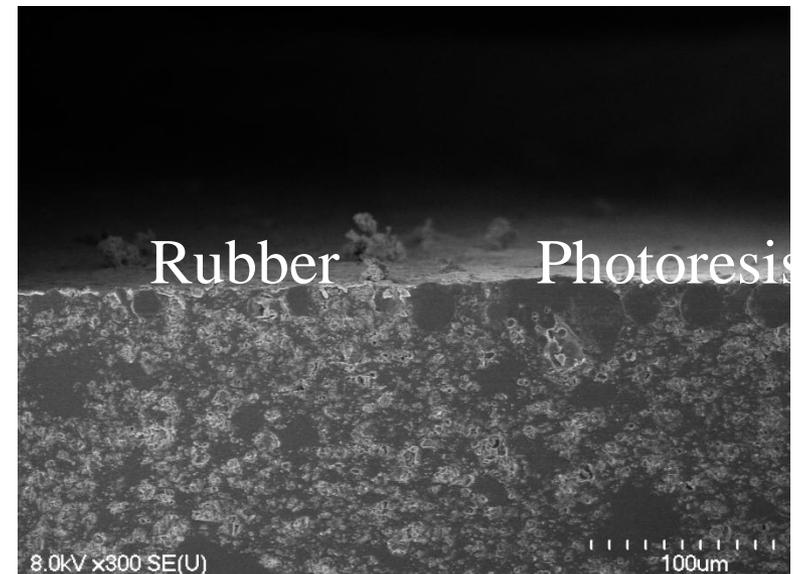
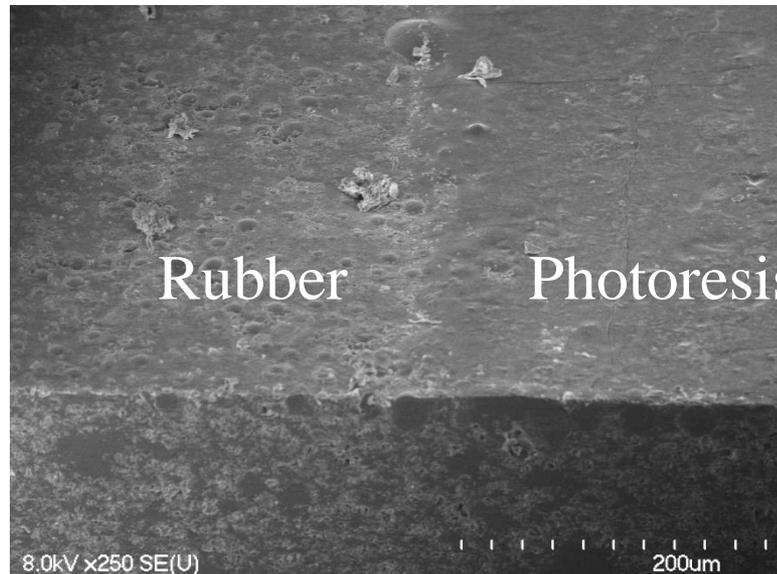


Rubber-based strain sensor fabricated using photolithographic lift-off process

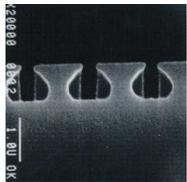
Cross-section observation

SEM observation

Pretreatment: chemical fixation + microtome



- Shape of photoresist coat should be overhung
- However, the edge of photoresist is not clear due to the roughness of natural rubber

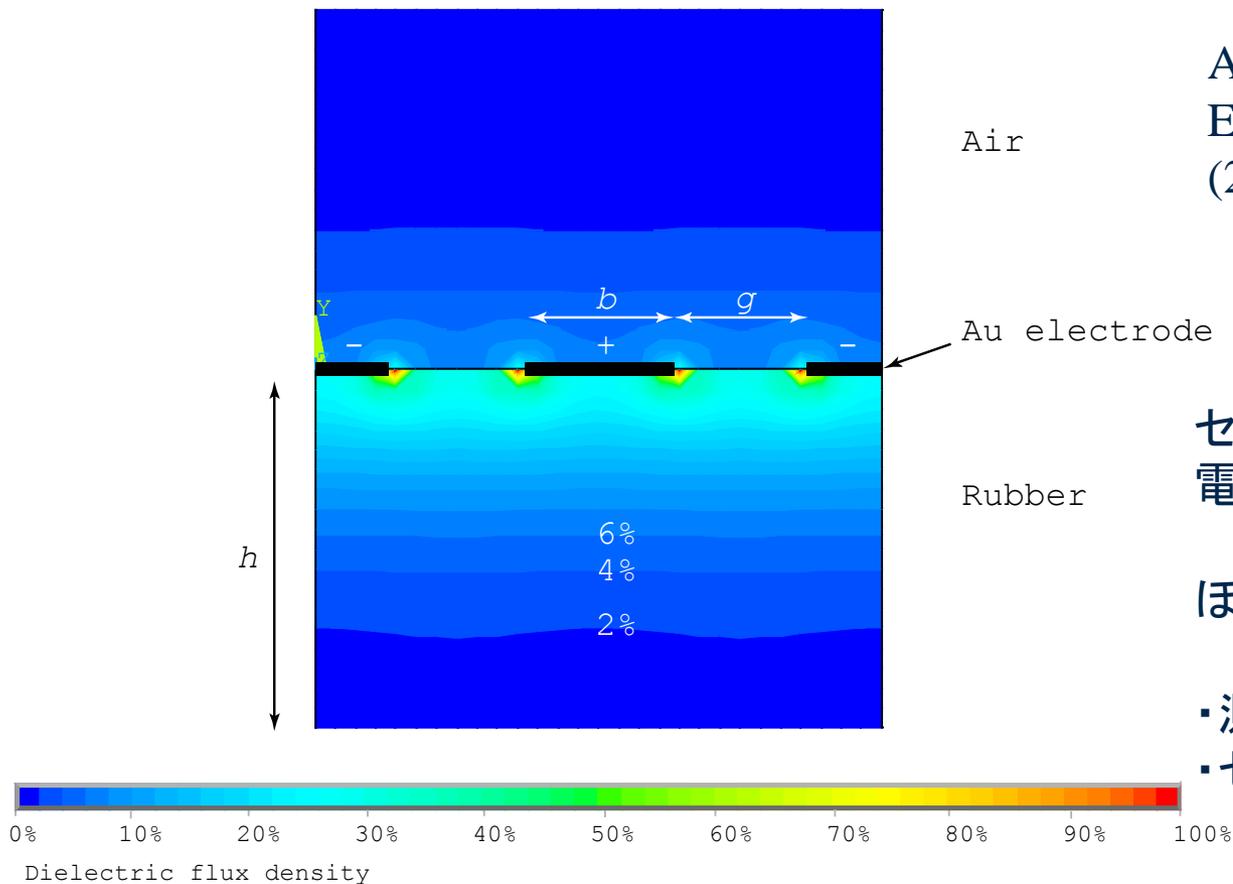


Ideal shape of photoresist



Actual shape of photoresist

FEM results of dielectric flux density



Ansys ver.11

Element type: 121

(2-D 8-Node Electrostatic Solid)

センサ板厚半分の位置で
電界強度最大値の5%

ほぼ表面付近に電界形成

- ・測定対象物の影響なし
- ・センサ高さ変化による影響なし

width of interdigital finger $b=0.35$ mm, finger gap $g=0.35$ mm, thickness of rubber $h=1$ mm.

Theory: capacitance change and GF

Capacitance

センサ電気容量

寄生容量

$$C = C_S + C_P$$
$$= (2n-1)p \frac{a(1-\nu\varepsilon)h}{g(1+\varepsilon)} + C_P$$

p : 誘電率
 h : 高さ
 ν : ポアソン比
 ε : ひずみ
 n : 電極数

Capacitance change ratio

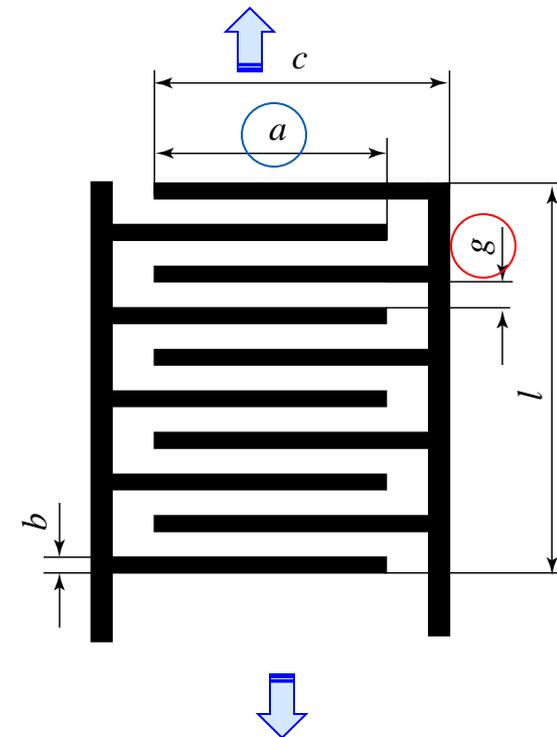
$$\frac{\Delta C}{C_0} = \frac{1}{1+\alpha} \frac{-(1+\nu)\varepsilon}{1+\varepsilon}$$

$$(C_P = \alpha C_{S0})$$

Gage factor

$$GF \cong -\frac{1+\nu}{1+\alpha}$$

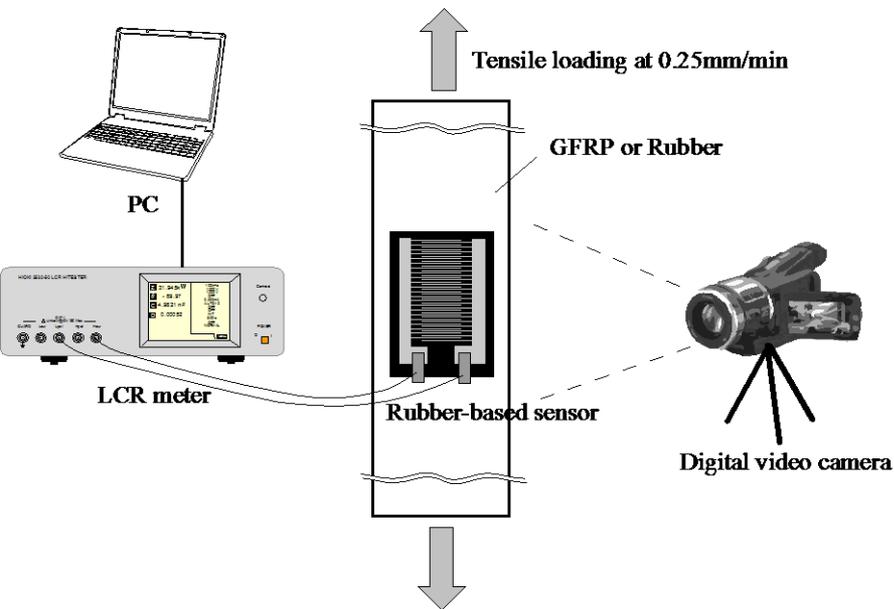
- 電気容量変化は線形
- GF は測定対象のポアソン比に依存



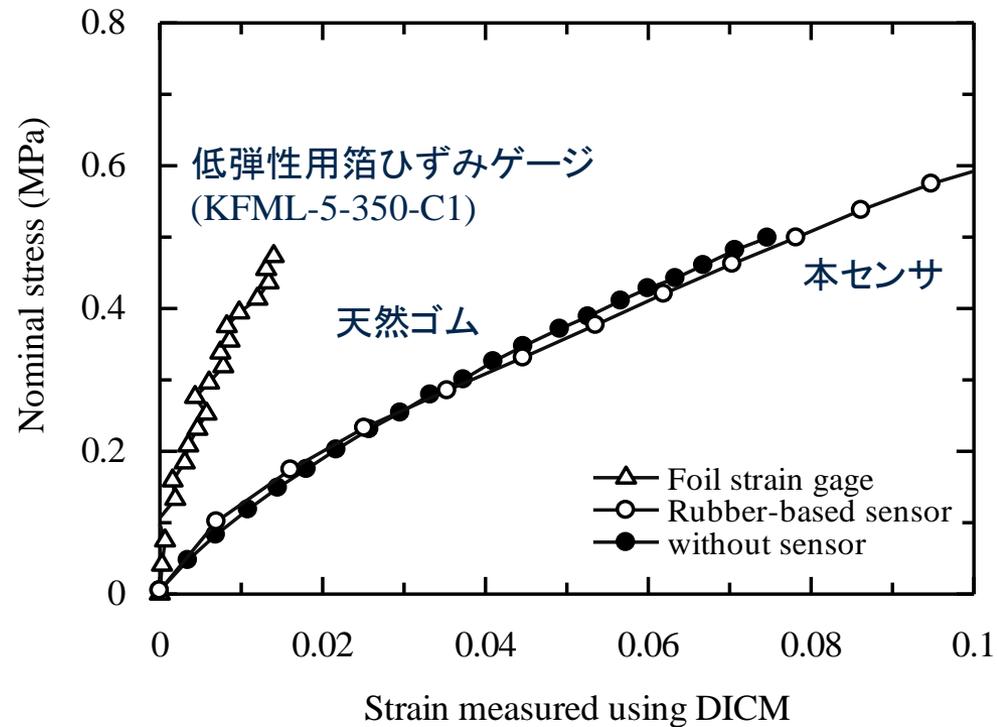
応力ひずみ線図(natural rubber)

試験条件:

- ・天然ゴム矩形試験片に貼付
長さ100mm, 幅30mm, 厚さ10mm
弾性率 9MPa
- ・引張速度0.25mm/min



ひずみ測定: デジタル画像相関法

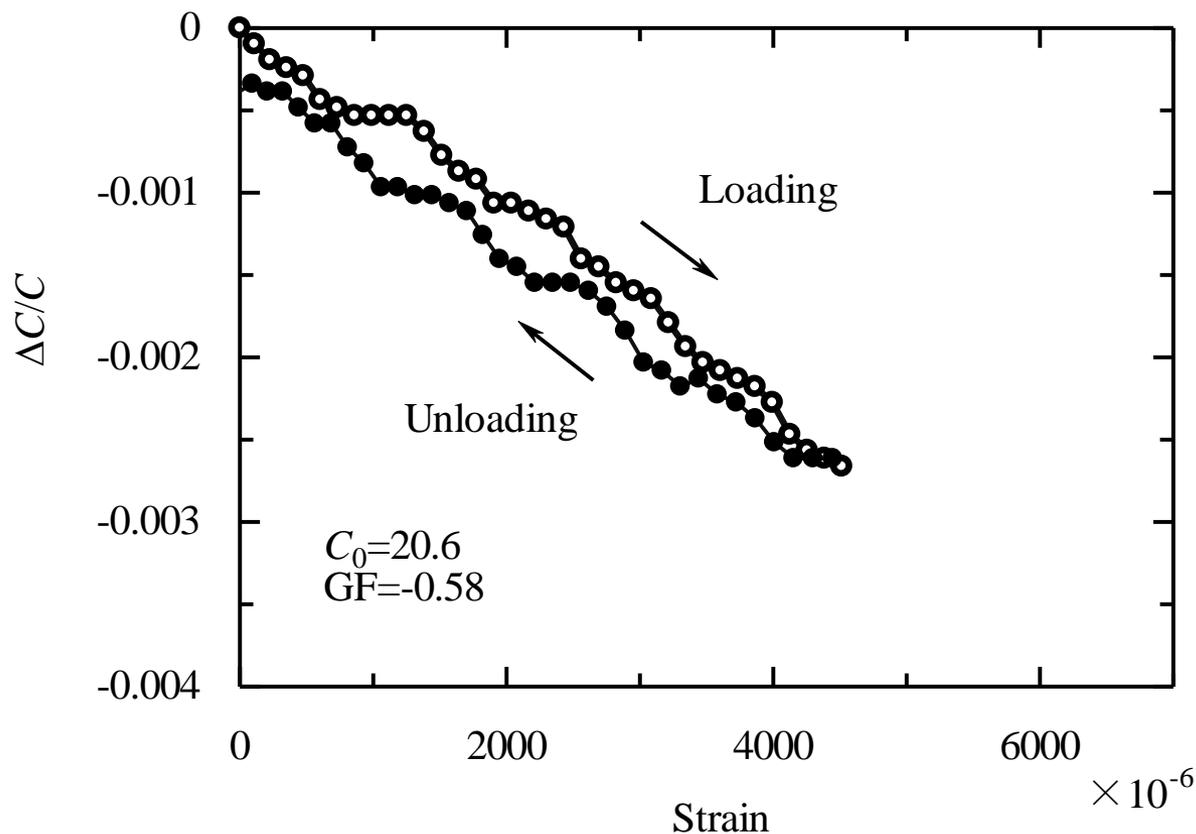


センサ貼付時の応力ひずみ線図

電気容量変化(GFRPに貼付)

試験条件:

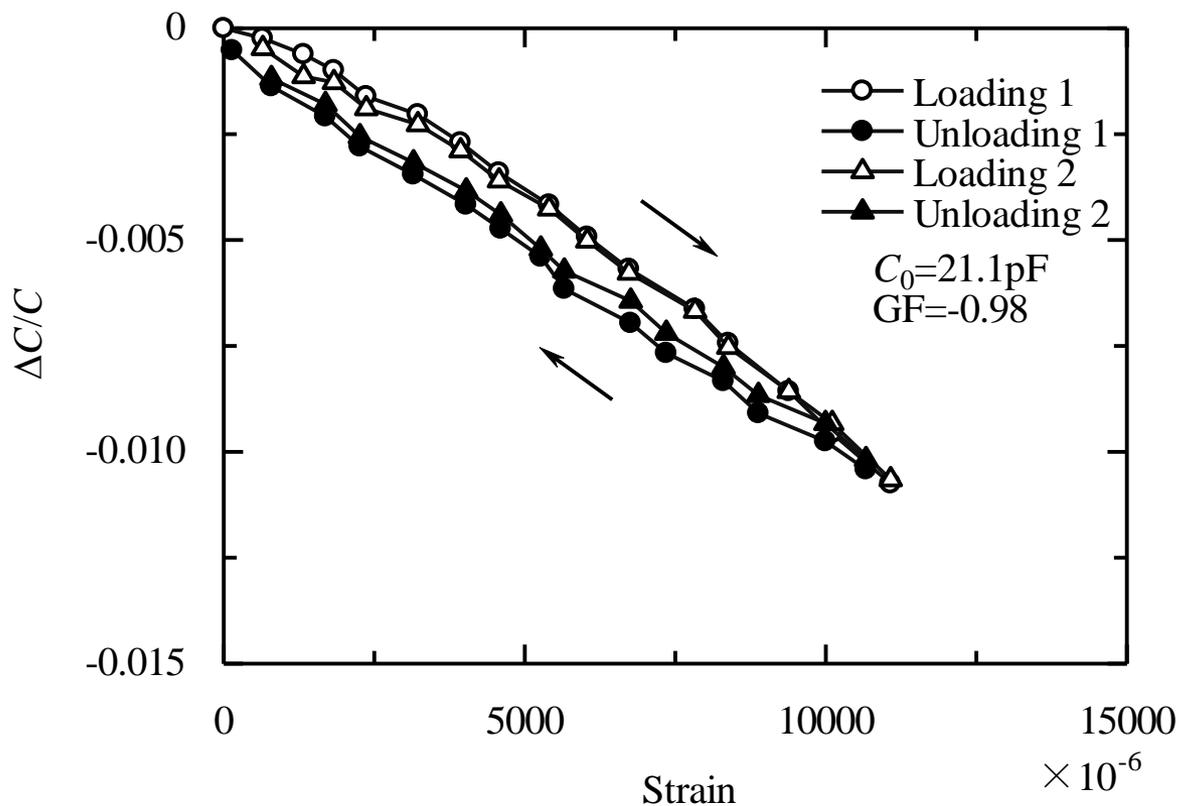
GFRP試験片に貼付
長さ250mm, 幅33mm, 厚さ2mm
ポアソン比 0.11
・引張速度0.25mm/min



理論値
 $GF=-0.69$

引張負荷除荷に伴うセンサ電気容量変化(GFRPに貼付)

電気容量変化(天然ゴムに貼付)



天然ゴム試験片に貼付
長さ250mm, 幅30mm, 厚さ10mm
ポアソン比 0.47
・引張速度0.25mm/min

理論値
 $GF=-0.92$

ポアソン比大
→電極幅小
ゲージ率小

引張負荷除荷に伴うセンサ電気容量変化(天然ゴムに貼付)

疲労試験による電気容量変化

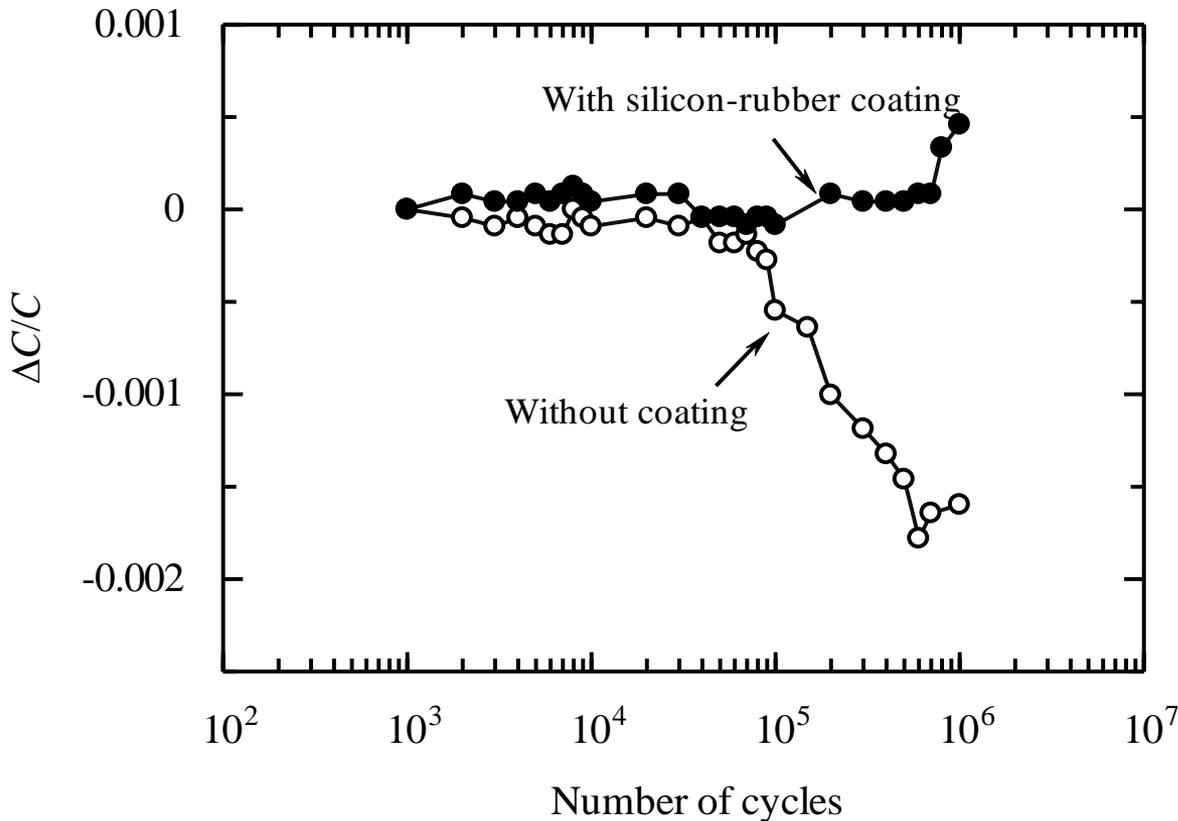
試験条件:

- 最大ひずみ 3000μ
- 応力比0.1
- 20Hz, sin波
- 応力中央値で一時停止し
電気容量測定

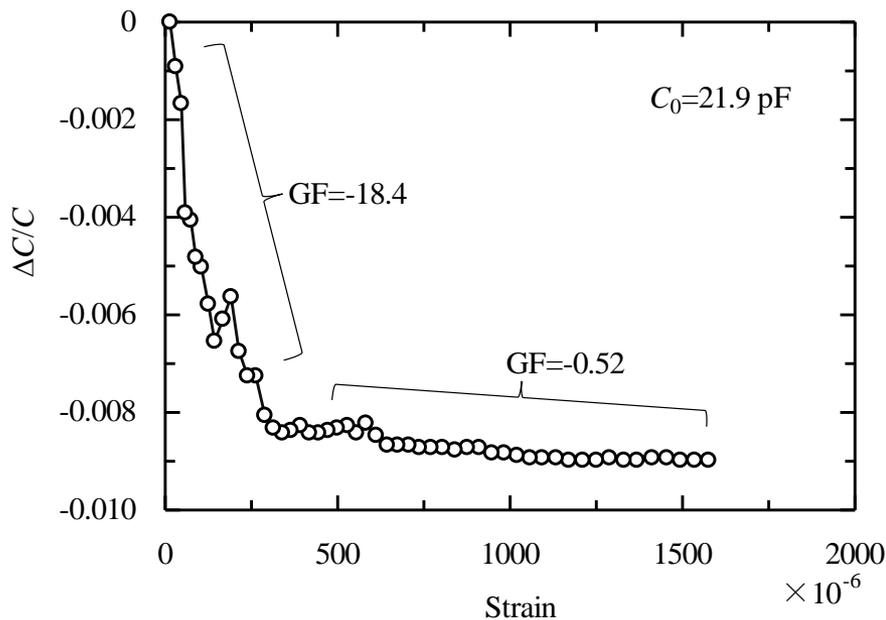
試験結果:

10^5 程度から電気容量変化確認

$$\begin{aligned} \Delta C/C = 0.002 &= \text{ひずみ } 3448\mu \\ \Delta C/C = 0.0005 &= \text{ひずみ } 862\mu \end{aligned}$$

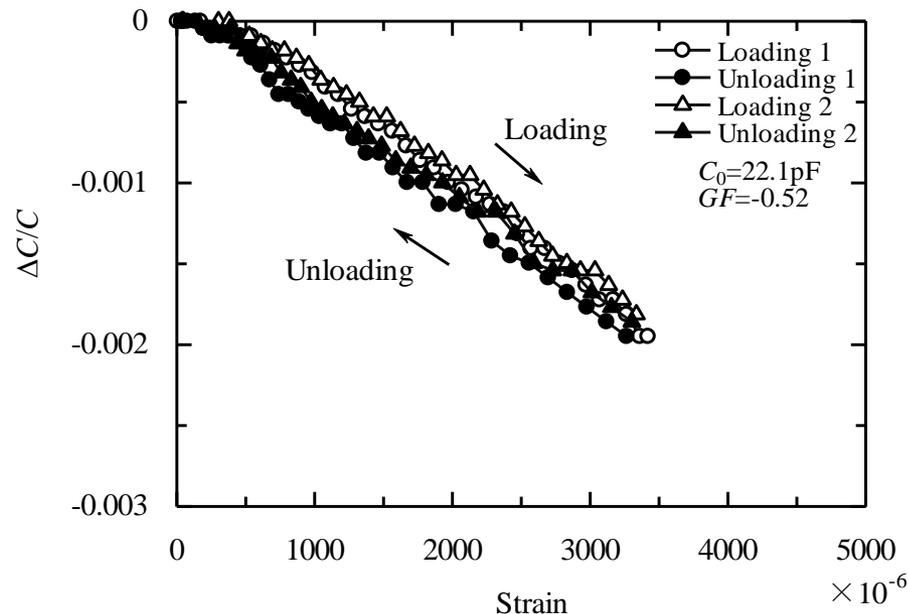


10⁶回疲労後のひずみ-電気容量特性



コーティングなし

低ひずみ域でGF大, 500 μ から理論通り
Au端部にはく離・破れ発生, Bridging



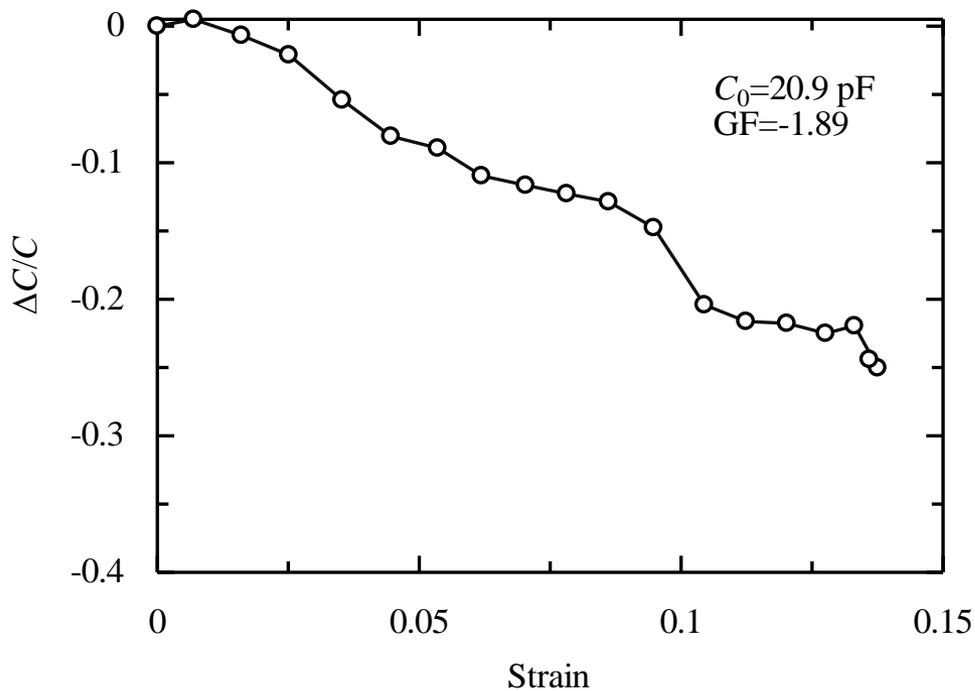
コーティングあり

疲労前 GF=-0.58
疲労後 GF=-0.52 (誤差10%)

	支配パラメータ	疲労による影響
初期電気容量	電極形状	大
ゲージ率	ゴムの特性	小

キャリブレーションで補正可能

Capacitance change up to 14 % strain



大ひずみ負荷時の電気容量変化

電気容量減少確認
ゲージ率は理論値からずれる

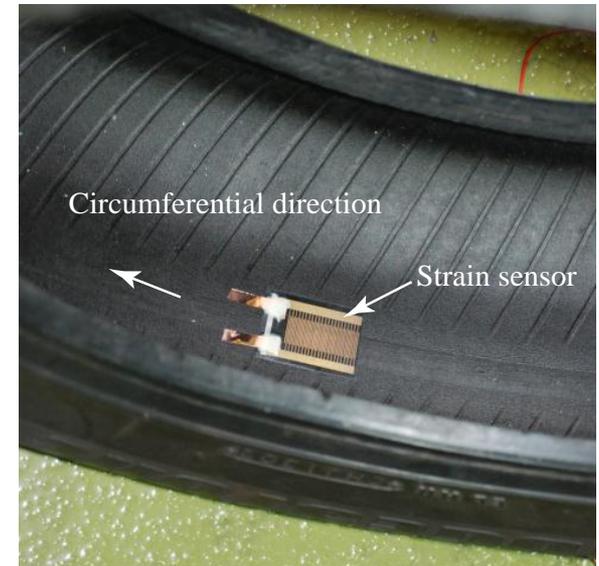
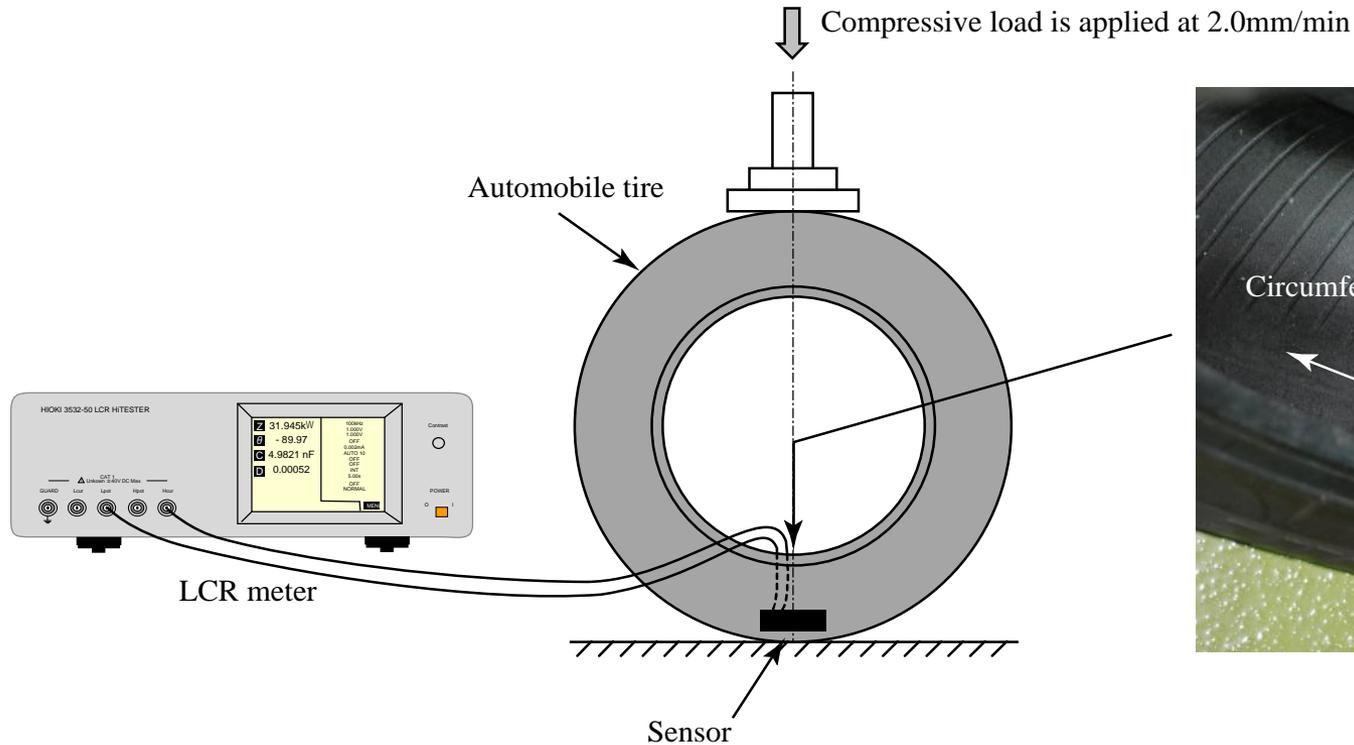


Strain: 0 %



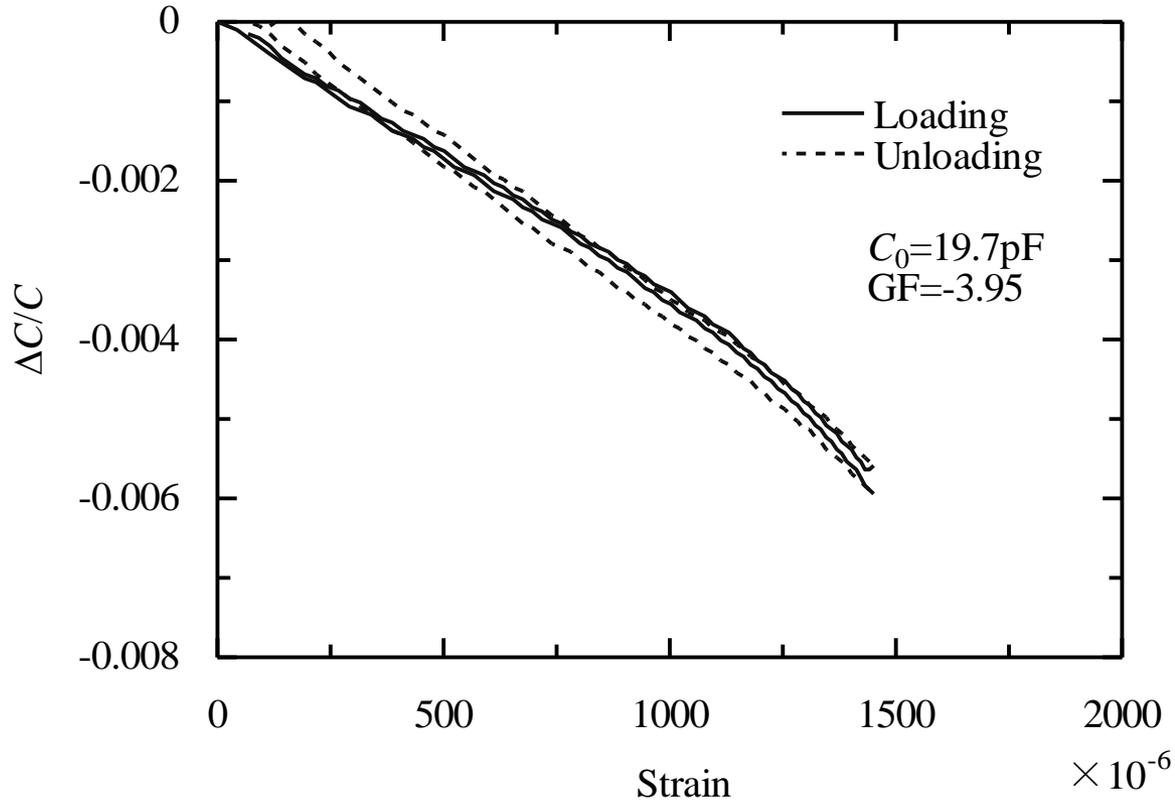
Strain: 13.3 %

センサのタイヤ貼付



Experimental setup for capacitance measurement of the sensor attached to inner surface of a radial tire (175/70 R14).

電気容量変化



Capacitance change ratio of the rubber-based sensor attached to inner surface of radial tire due to compressive loading.

タイヤひずみのセルフセンシング法

ひずみ測定第2手法

■ タイヤ自体をセンサとして利用(セルフセンシング)

Advantage:

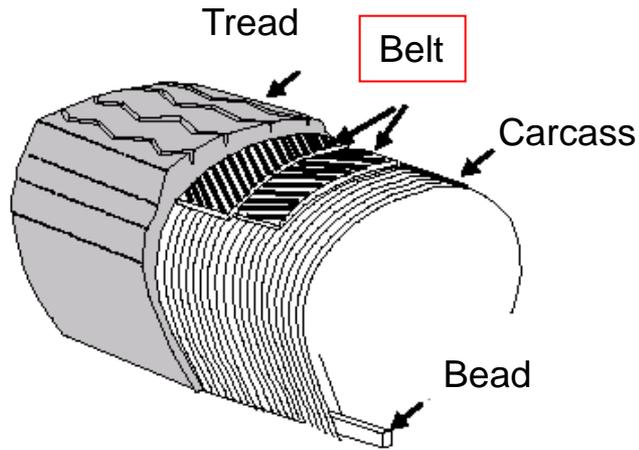
- 付加センサ不要→はく離問題を解決, 小型化
- 厳しい環境下で使用可能
- より直接的な測定

タイヤ変形による電気容量変化を調査



- トラック/バスタイヤ試験片
- 乗用車用ラジアルタイヤ試験片
- 乗用車用ラジアルタイヤ

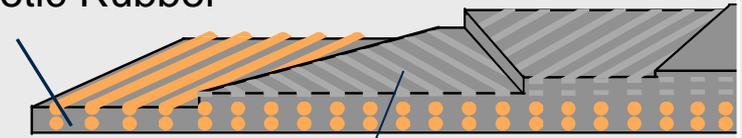
タイヤの電気容量



Structure of Radial tire

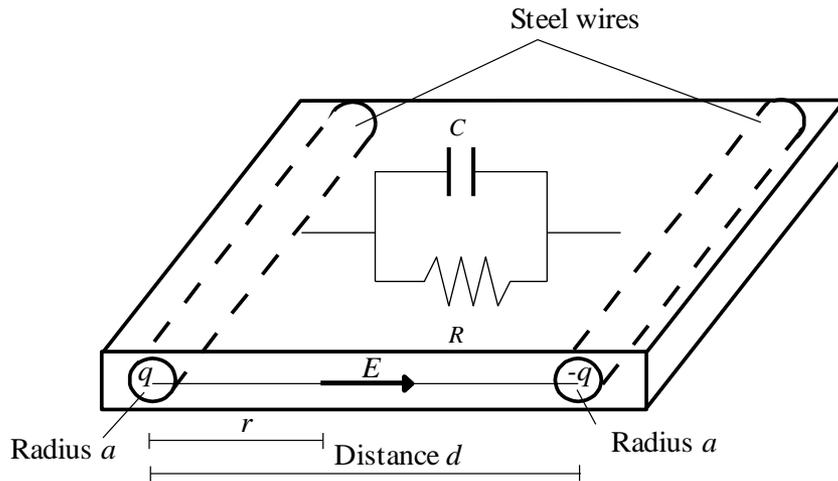
FRR (fiber reinforced rubber)

Synthetic Rubber



Steel wire

Belt part of radial tire



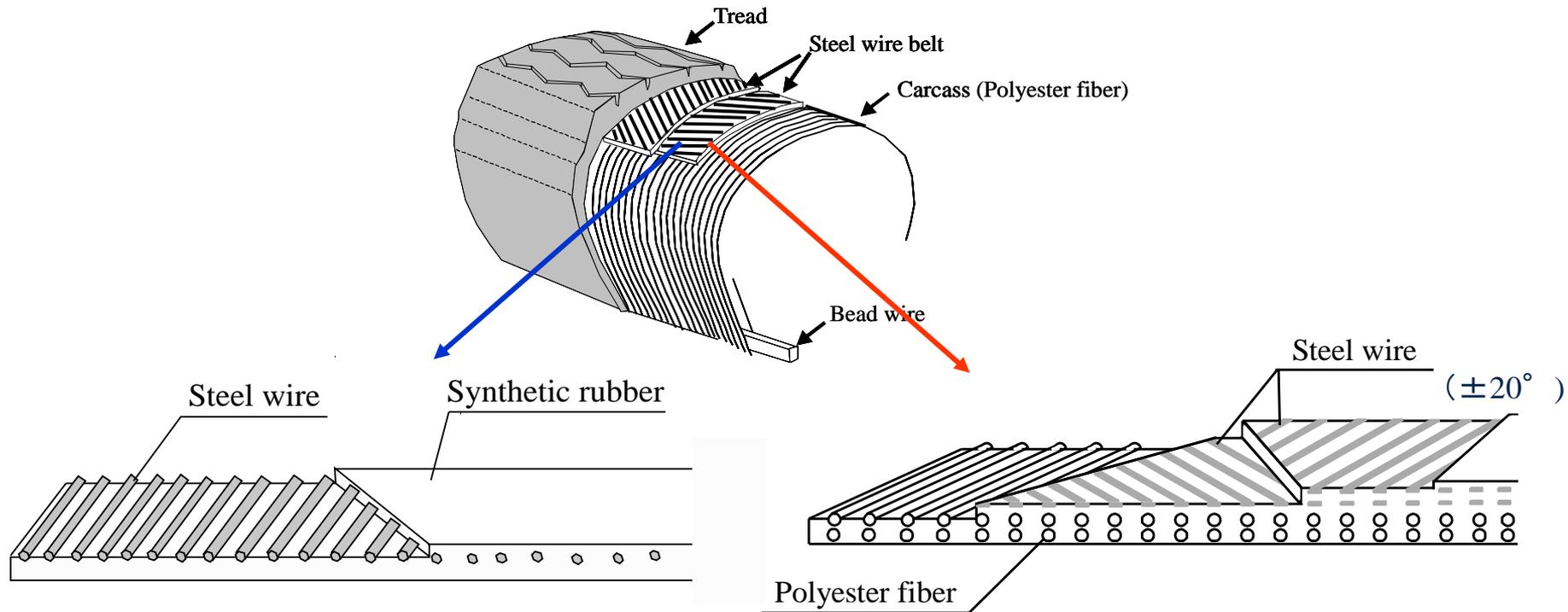
Capacitance:

$$C = \frac{\pi\epsilon}{\ln \frac{d-a}{a}}$$

Resistance:

$$R = \rho \frac{d}{2al}$$

タイヤベルト部試験片



長さ250mm, 幅30mm, 厚さ3mm

長さ270mm, 幅30mm, 厚さ4mm

トラック/バスタイヤ

乗用車用ラジアルタイヤ

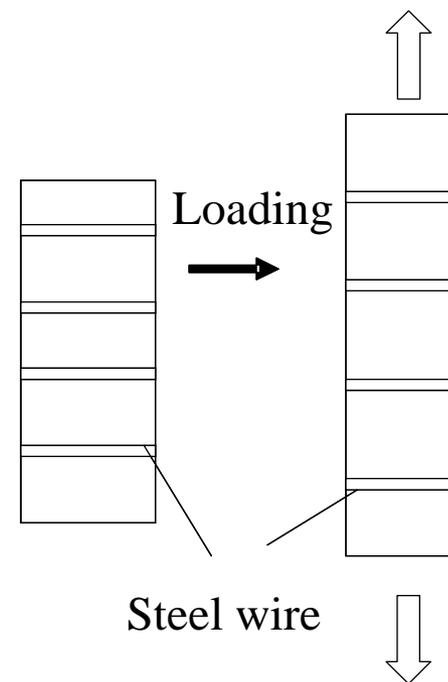
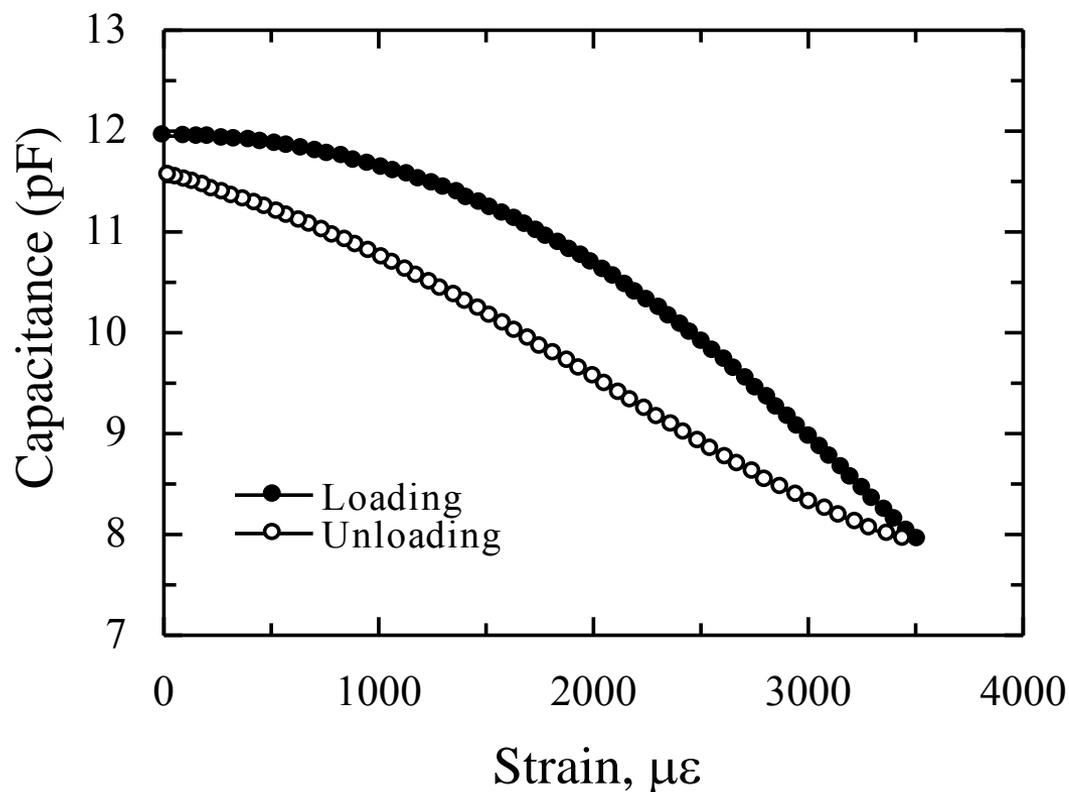
- 構造が単純(基礎研究)
- パッチ型センサとして適用可

トラック/バスタイヤ試験片

引張試験

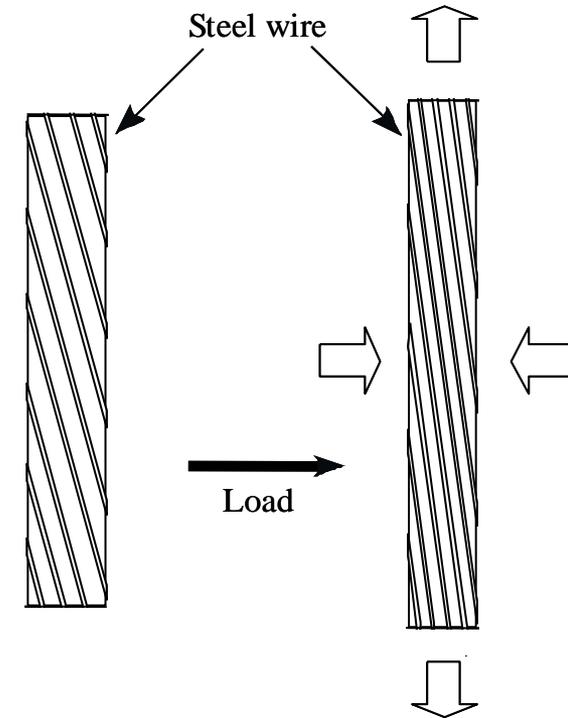
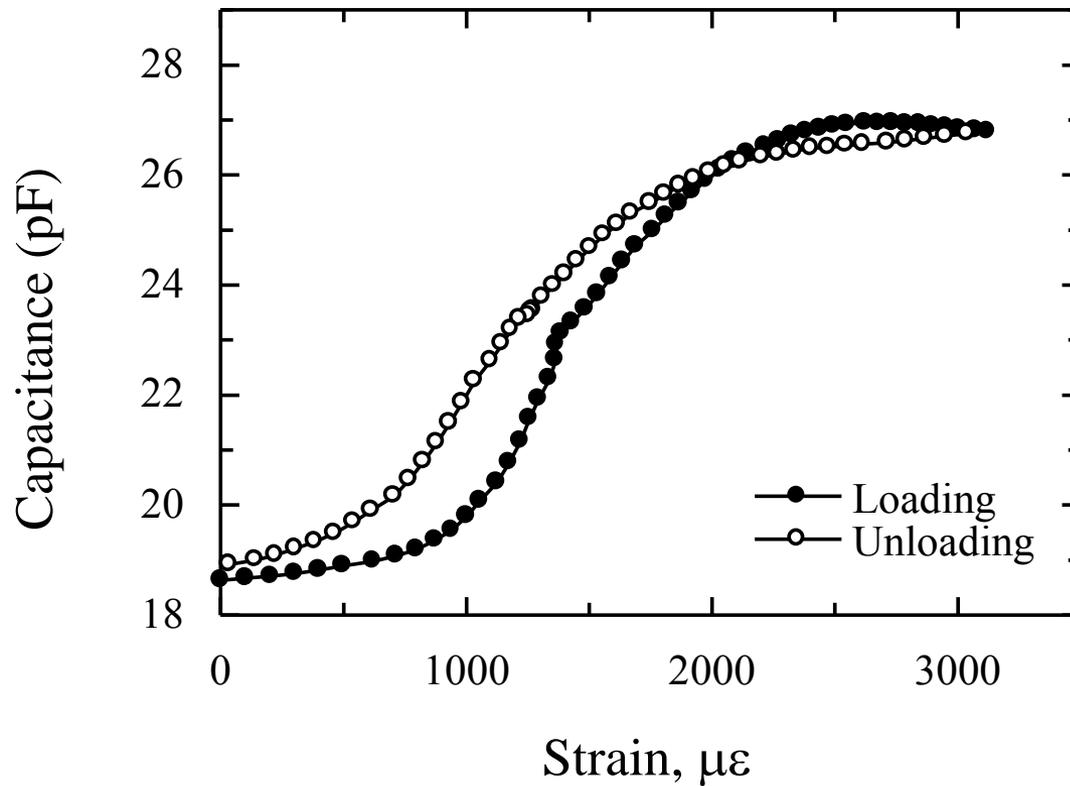
変位 : 3 mm
変位速度: 0.5mm/mim

電気容量測定: LCR meter (100 kHz)



電極間隔増加

乗用車用ラジアルタイヤ試験片



電極間隔減少

実際の乗用車用ラジアルタイヤ

■乗用車用ラジアルタイヤ

-175/70 R14

■電気容量測定用電極

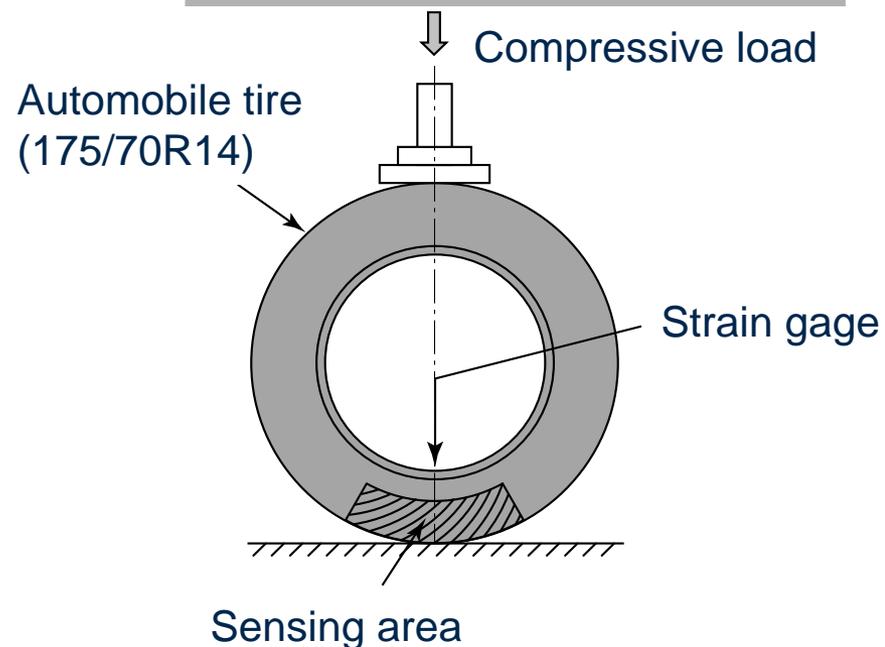
- タイヤショルダ一部を一部除去
- 楕型電極を配置

■圧縮試験

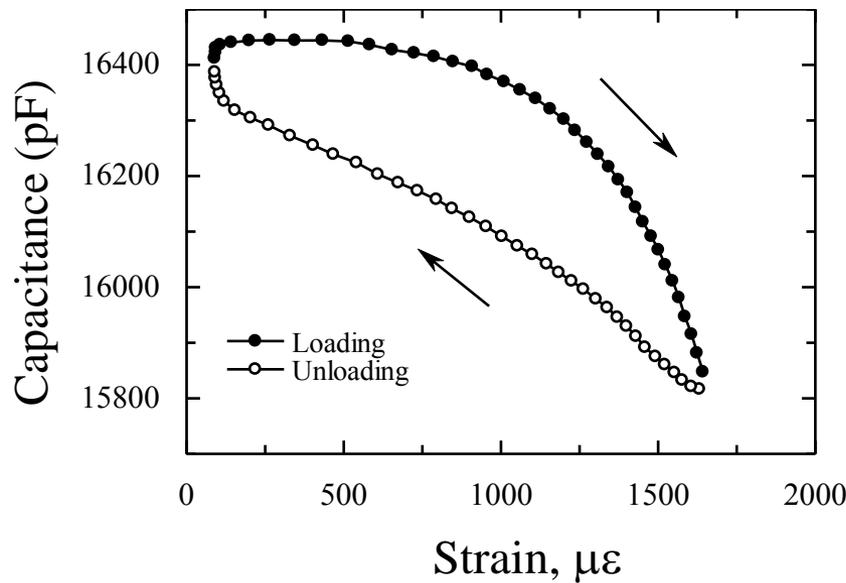
- 変位速度: 2.0 mm/min
- 変位: 10 mm
- センサ部が下端となるように設置
- LCRを用いて電気容量・抵抗測定



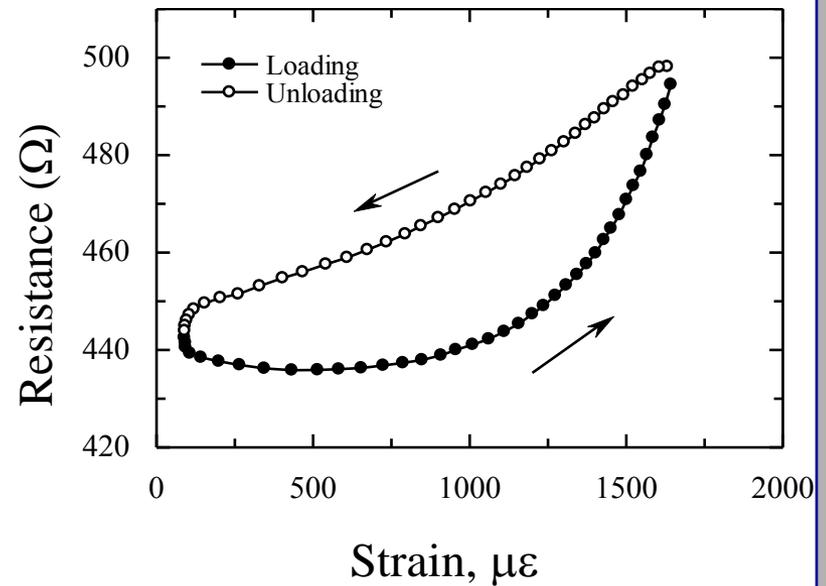
Interdigital electrodes



電気容量・電気抵抗測定結果



Capacitance change



Resistance change

- 試験片では引張ひずみにより電気容量増加
- 実タイヤでは, 3次元的な複雑な変形, 接地点周辺の圧縮域の影響

電磁誘導を用いたパッシブ無線モニタリング

● 発振回路を用いた無線**アクティブ**モニタリング



電源が必要

- ✓ 寿命
- ✓ 温度耐性
- ✓ 重量増加
- ✓ 環境への影響

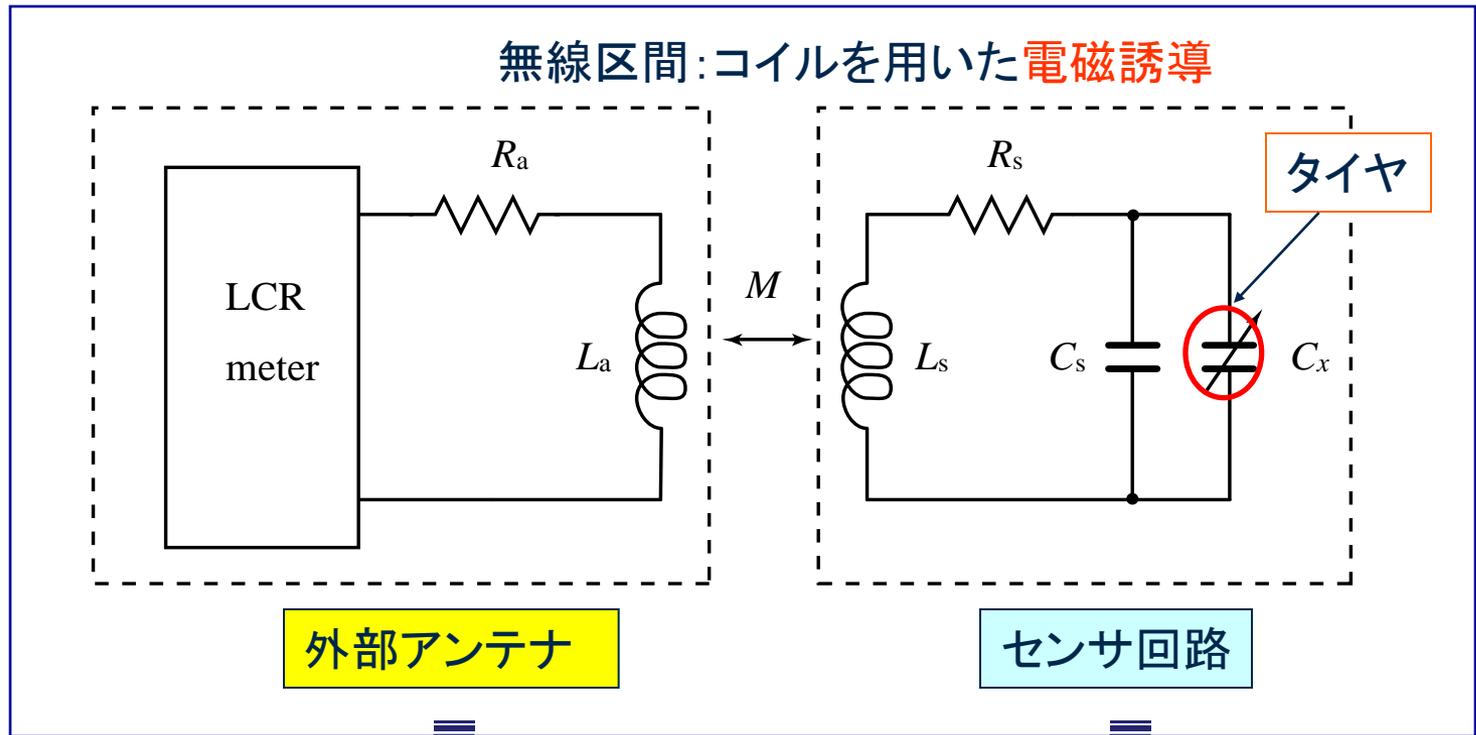
● 電磁誘導を用いた無線**パッシブ**モニタリング



電源が不要

- 乗用車用ラジアルタイヤ試験片に適用し有効性を検討

電磁誘導を利用したパッシブ回路



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

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

モニタリングシステム

タイヤベルト部
変形



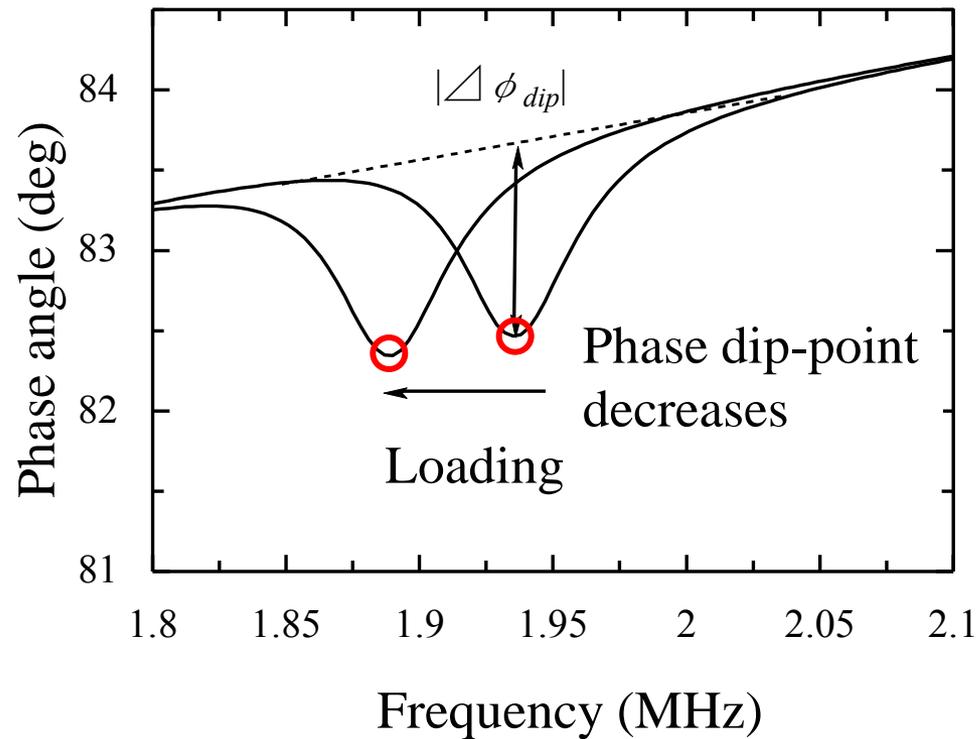
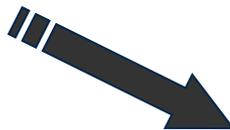
電気容量変化



センサ回路の
共振周波数変化



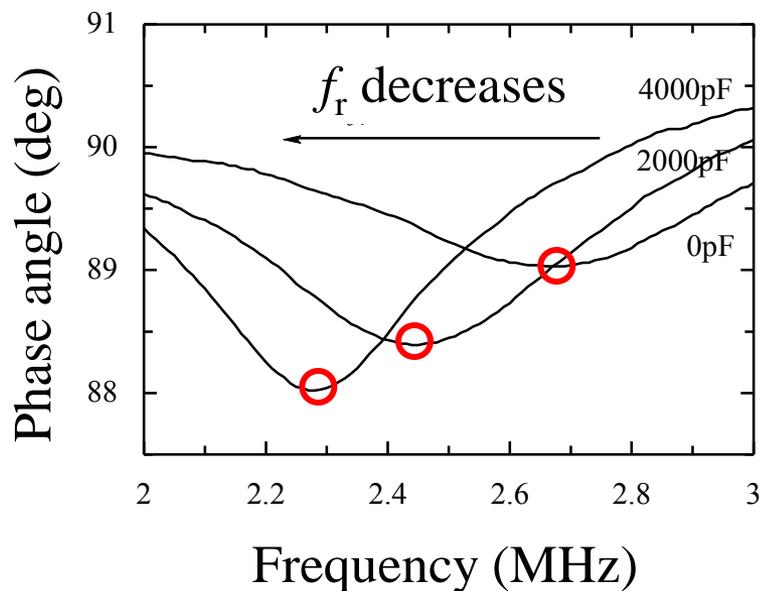
アンテナインピーダンス位相角
極小値が変化



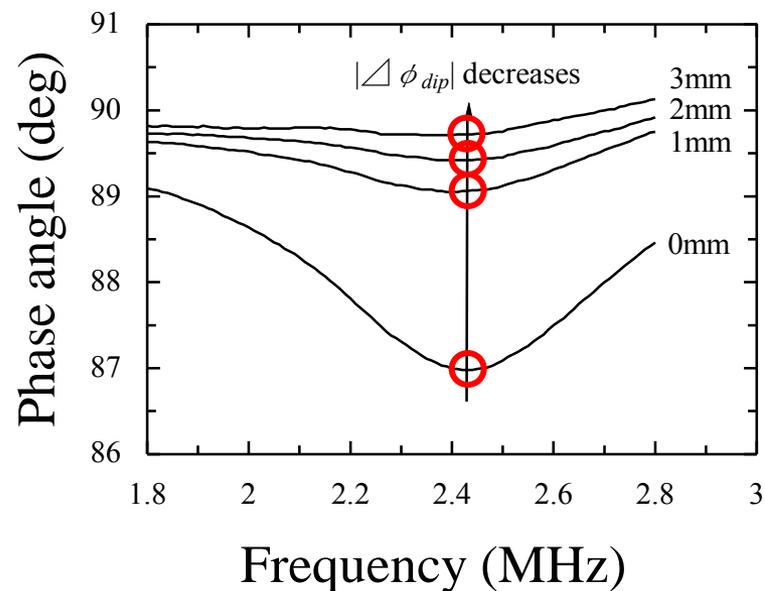
センサ回路の共振周波数

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

インピーダンス位相角



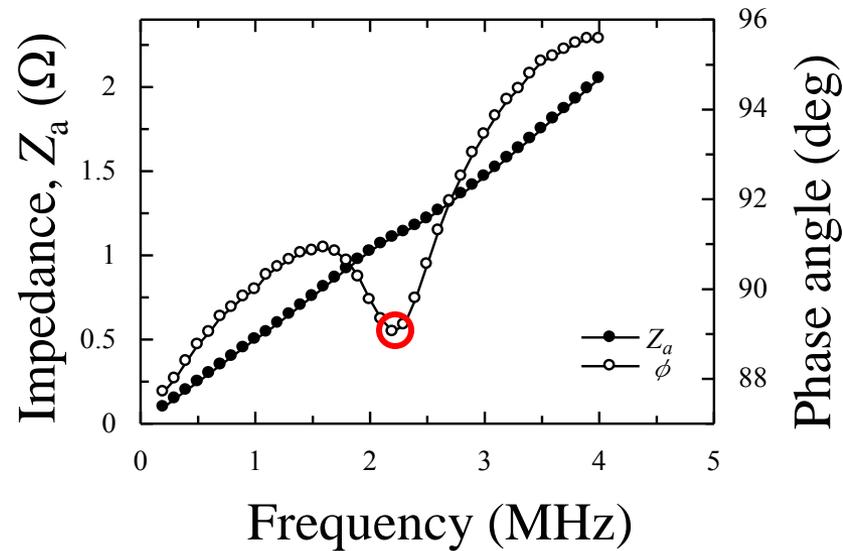
電気容量 C_x 変化



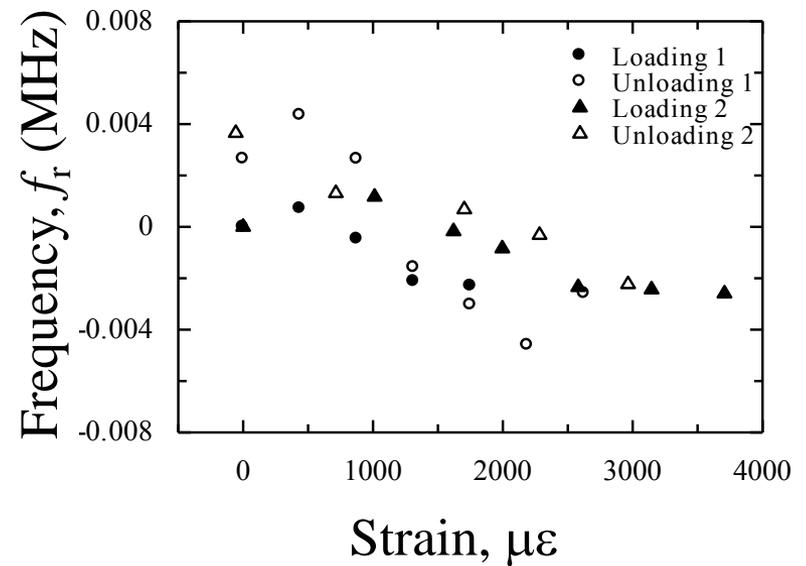
コイル間隔 d_i 変化

- 電気容量 C_x に応じて位相角ディップ点 (共振周波数) が変化
- コイル間隔 d_i は共振周波数に依存しない

静的引張試験(ラジアルタイヤ試験片)



外部アンテナのインピーダンス
(無負荷時)



ひずみによる共振周波数の変化

- 電気容量増加により共振周波数が減少
- ✓ 測定精度, 測定速度, 無線通信距離に問題

同調回路を用いたパッシブ無線モニタリング

● 電磁誘導を用いたパッシブ無線モニタリング

- 電磁誘導を利用するため無線距離が短い
- 測定時間が長い(1回の測定につき2分)

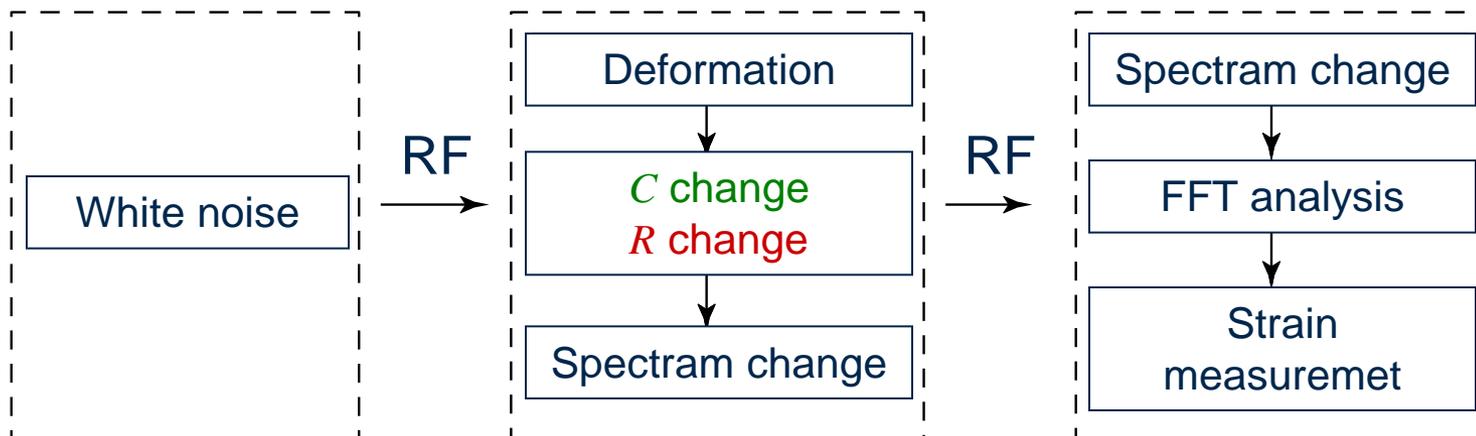
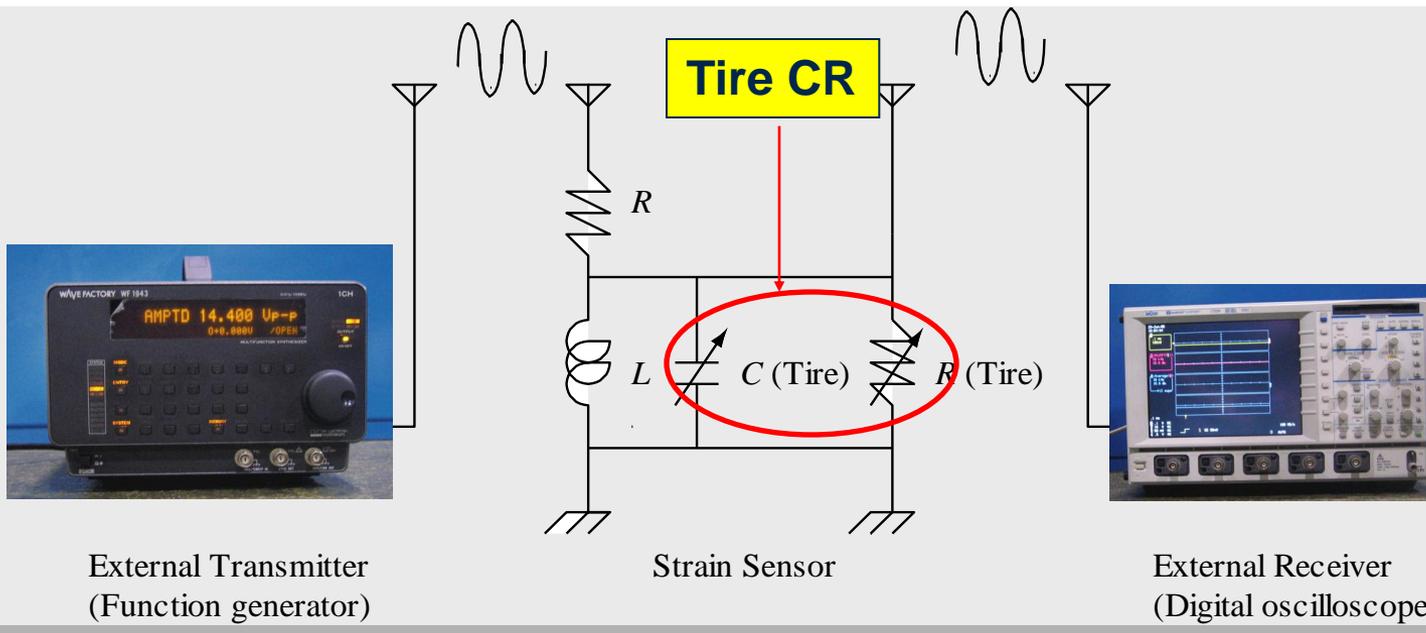


● 同調回路を用いたパッシブ無線モニタリング

- 電波を利用するため無線距離が長い
- 短時間測定可能(周波数解析速度に依存)

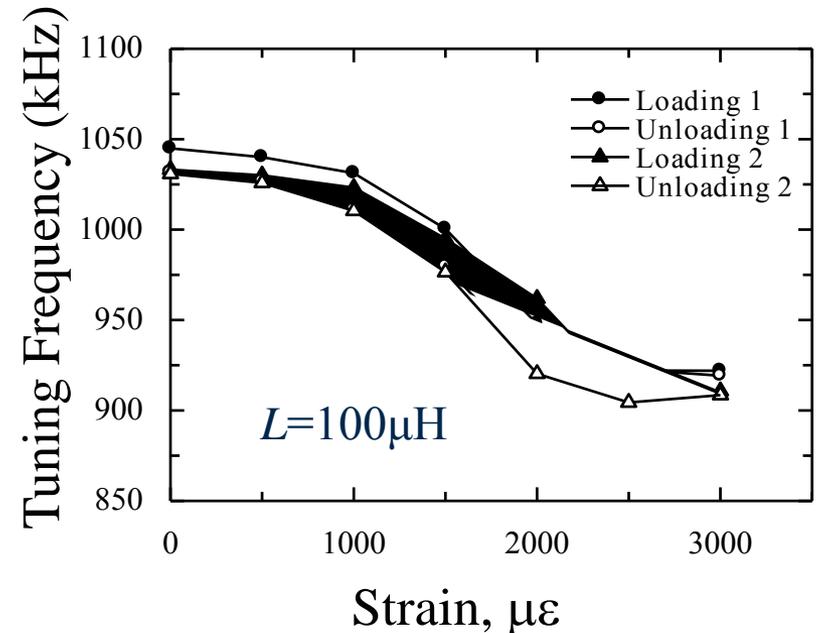
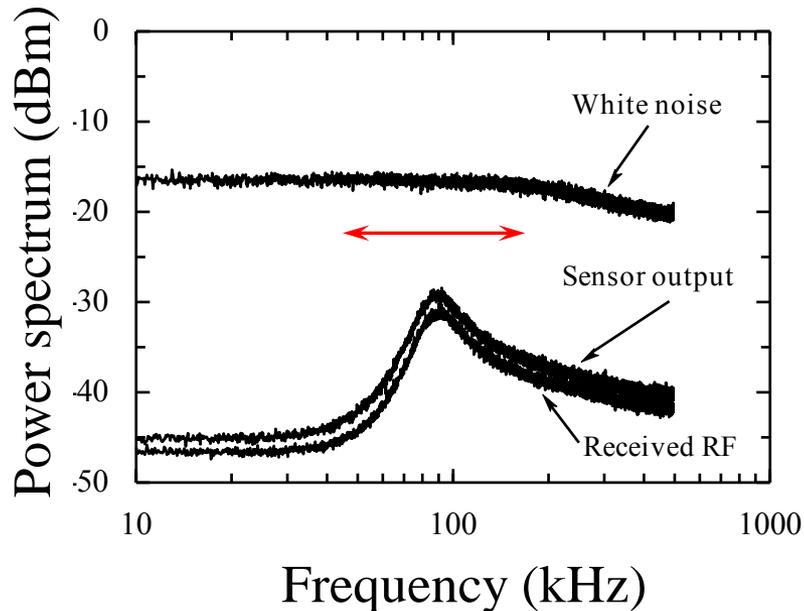
ラジアルタイヤ試験片を用いた静的・繰り返し荷重試験
複数スペクトル特徴量を用いた実タイヤのひずみ測定

ひずみ無線センサシステム



静的引張試験

ラジアルタイヤ試験片の電気容量を用いる



$$\text{同調周波数: } f_t = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_x}}$$

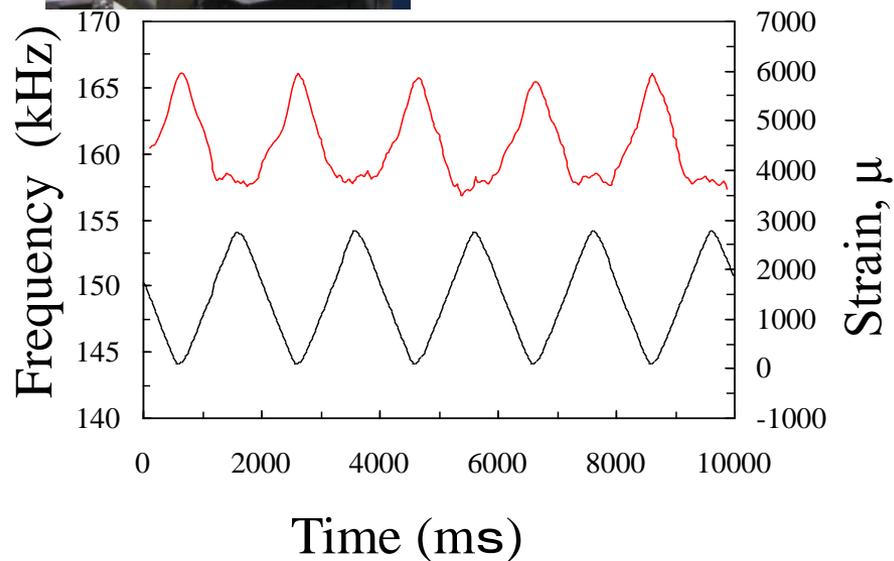
➤ ひずみの増加に伴い、電気容量が増加するため同調周波数は減少

繰り返し荷重試験

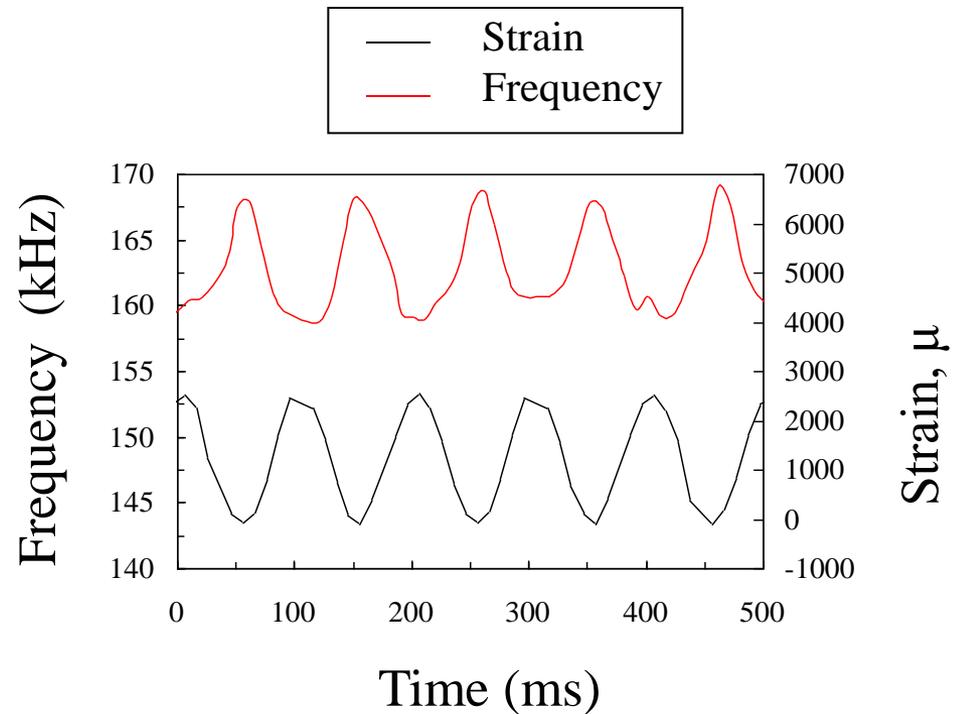
電気油圧試験機



- 変位周波数: 0.5~10 Hz
- 変位: 2 mm

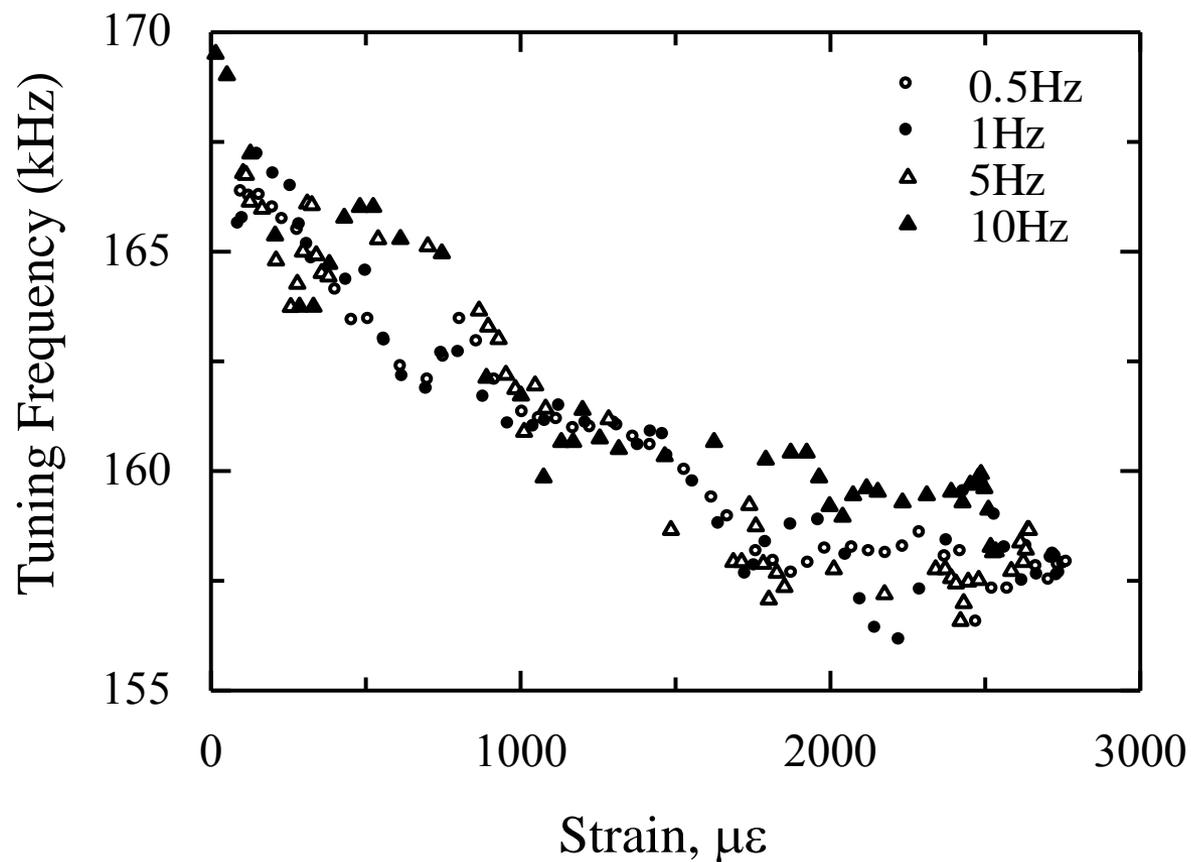


0.5Hz (3km/h)



10Hz (70km/h)

繰り返し荷重試験



各変位周波数における, 同調周波数とひずみの関係

ひずみを用いたタイヤ形状・荷重算出

タイヤひずみセンサ
無線モニタリングシステム

タイヤひずみ無線モニタリング手法の確立



タイヤひずみデータを利用した最適制動制御,
路面状態警告システムの提案

- FEMによるタイヤひずみ分布の解析
- タイヤパラメータの測定

スリップスロープ

路面/タイヤ摩擦係数はスリップ比に依存

スリップ比

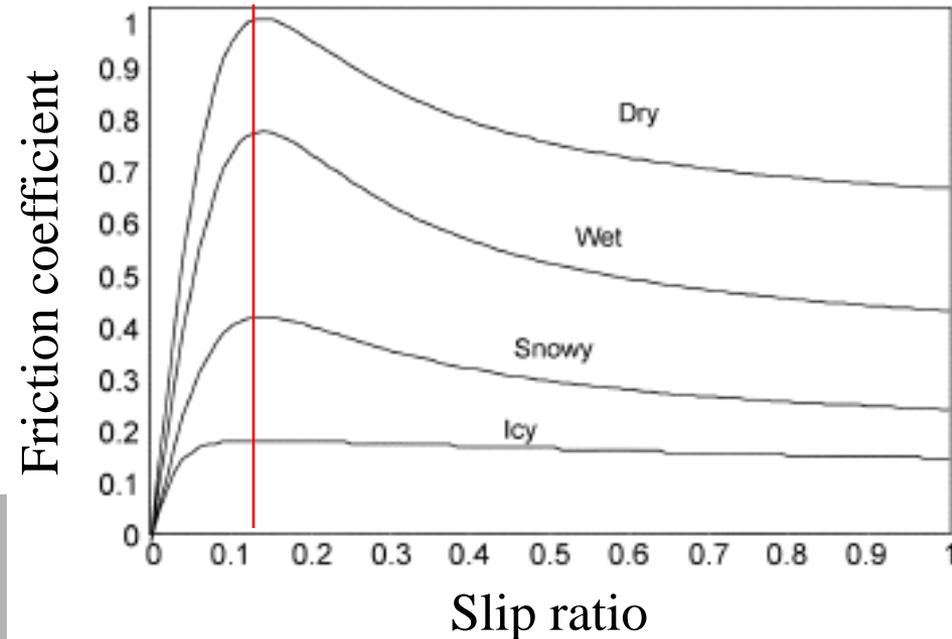
$$g = \frac{V_s}{V} = \frac{V - \omega r_e}{V}$$

V : 車両速度, V_s : タイヤスリップ速度
 ω : タイヤ角速度, r_e : 有効転がり半径

摩擦係数

$$\mu = \frac{F_t}{F_N}$$

F_N : ホイール垂直荷重
 F_t : 横方向荷重(ブレーキトルク)



路面状態に依存せず一定のスリップ比で最大摩擦係数を得る



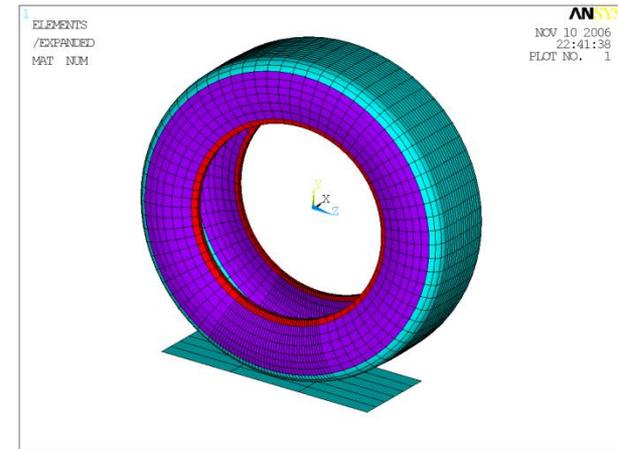
有効転がり半径 r_e の測定が必要

FEM解析

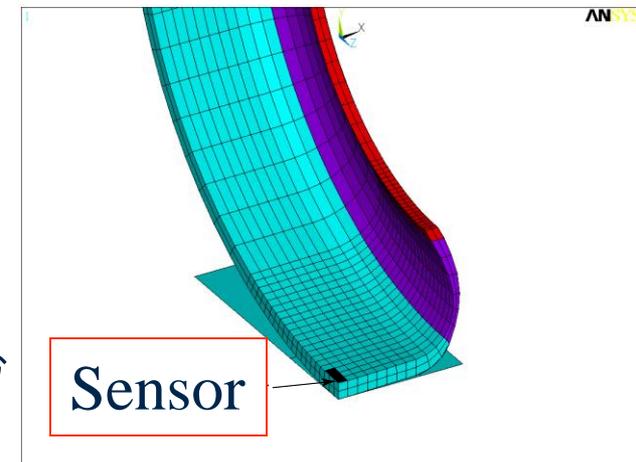
タイヤのひずみ分布を有限要素法を用いて解析

Ansys ver.10

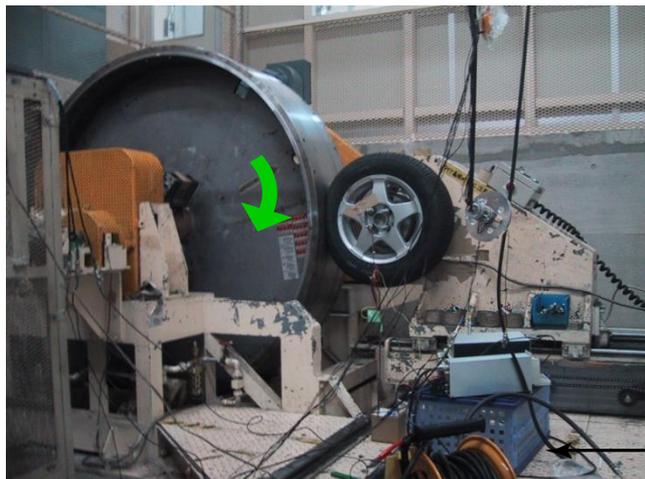
- 材料非線形 (超弾性・非圧縮)
 - Mooney-Rivlinモデル
- 要素
 - 3次元20節点要素 (5000要素, 20000節点)
 - 接触要素
 - 分割 (接触面付近, その他)
 - 1/2対称モデル
- 拘束・荷重条件
 - ビード部と中心を幾何学的拘束
 - 荷重: 内圧 200 kPa, ホイール垂直荷重, ブレーキトルク



FEM model

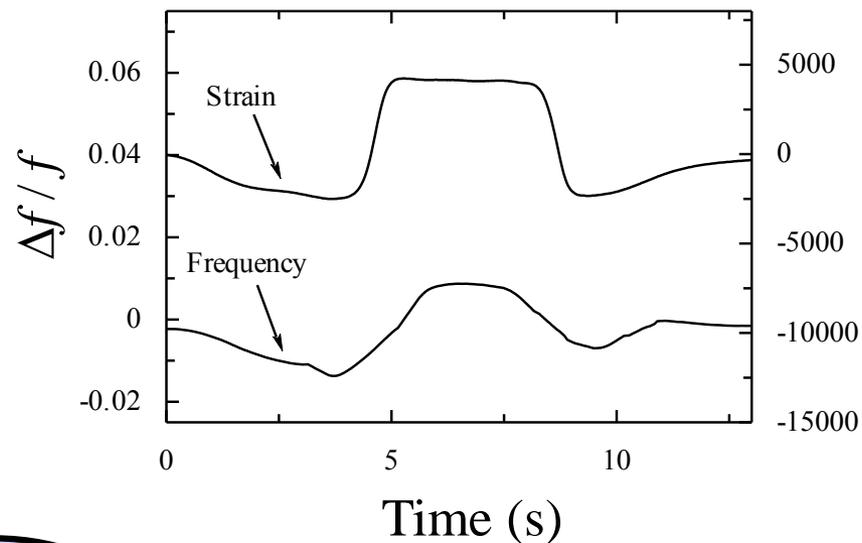


タイヤ回転試験

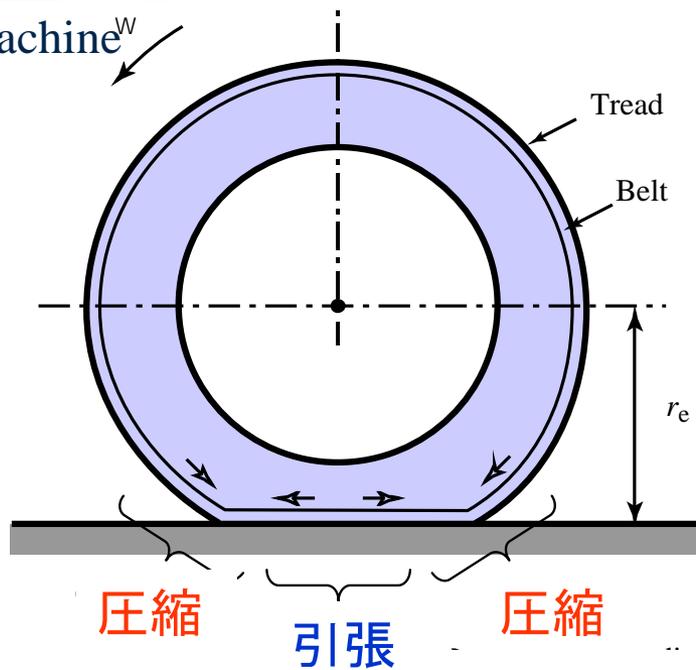


V

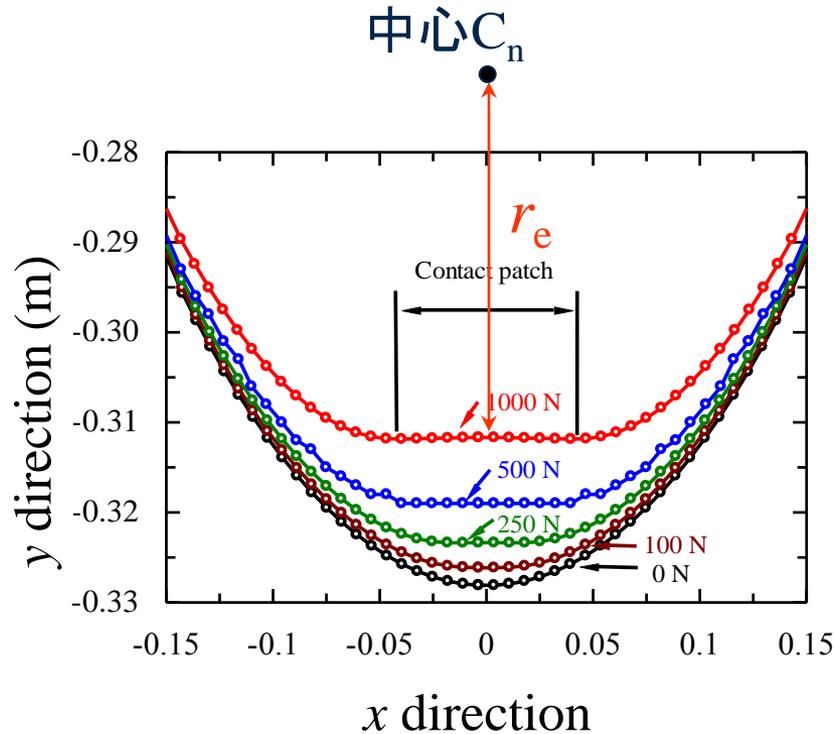
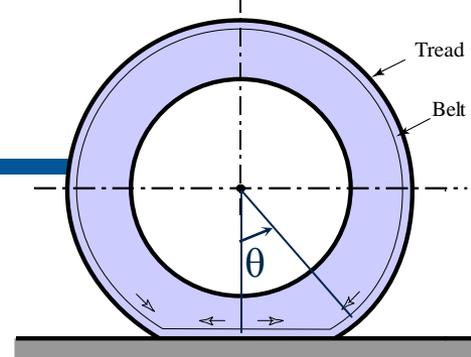
Tire rotation testing machine^w



タイヤの変形

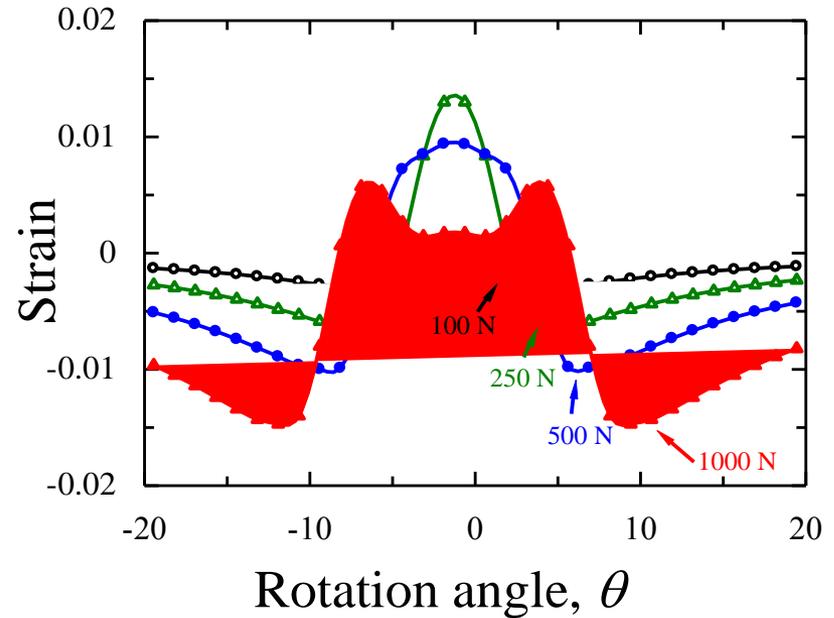


タイヤひずみ分布



(m) タイヤ変形

- ホイール垂直荷重増加
- 有効転がり半径減少
 - 接地長さ増加

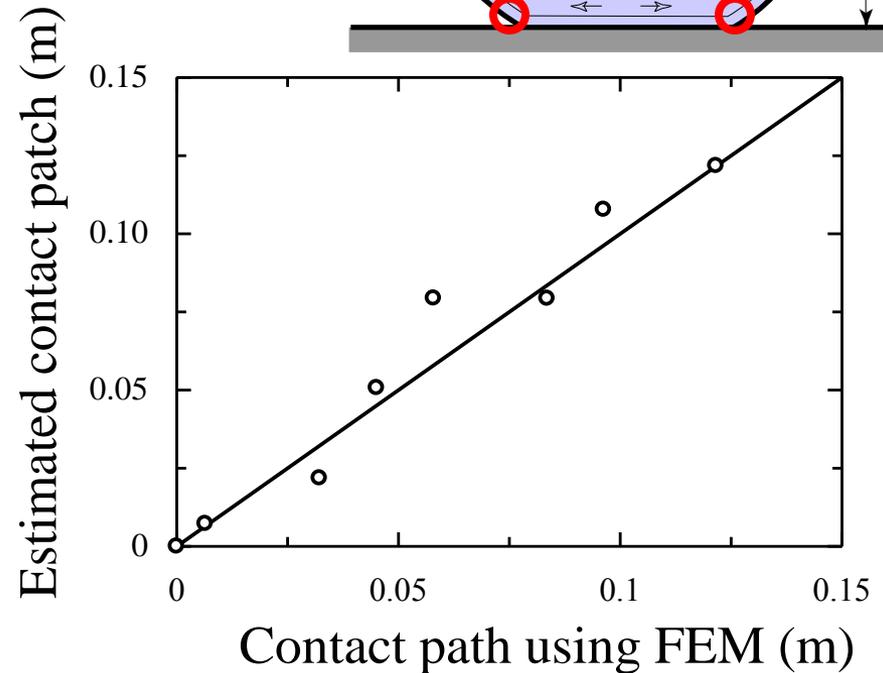
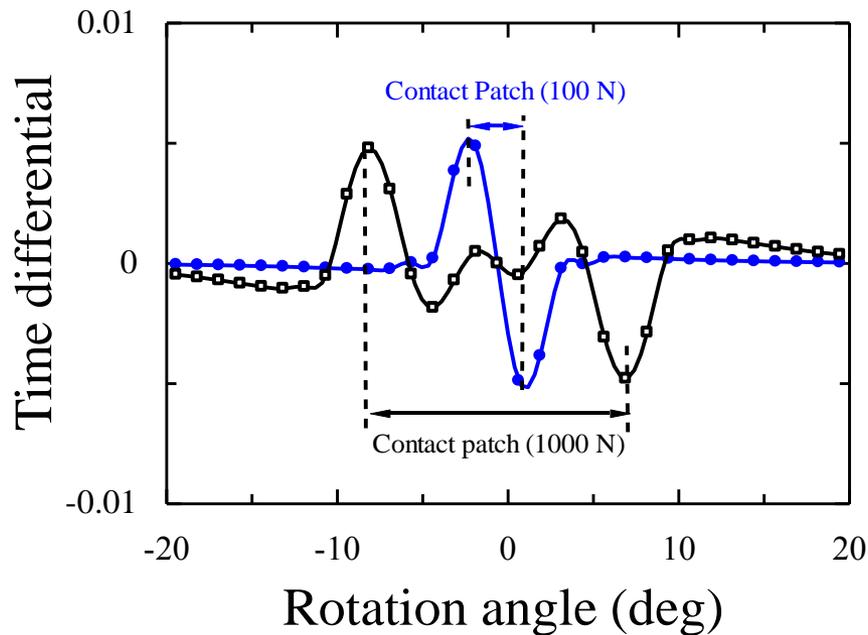
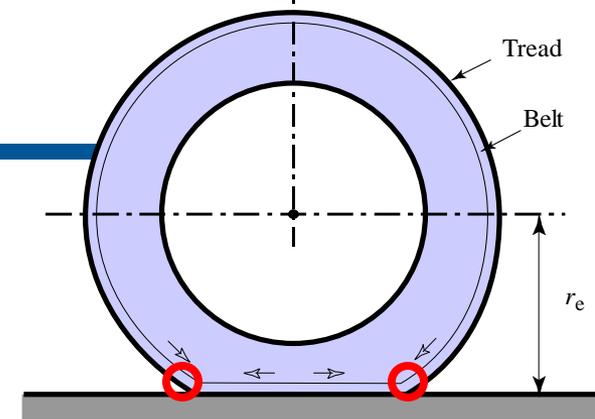


(deg) ひずみ分布

- 接地点で引張, 周辺で圧縮
圧縮ひずみ増加

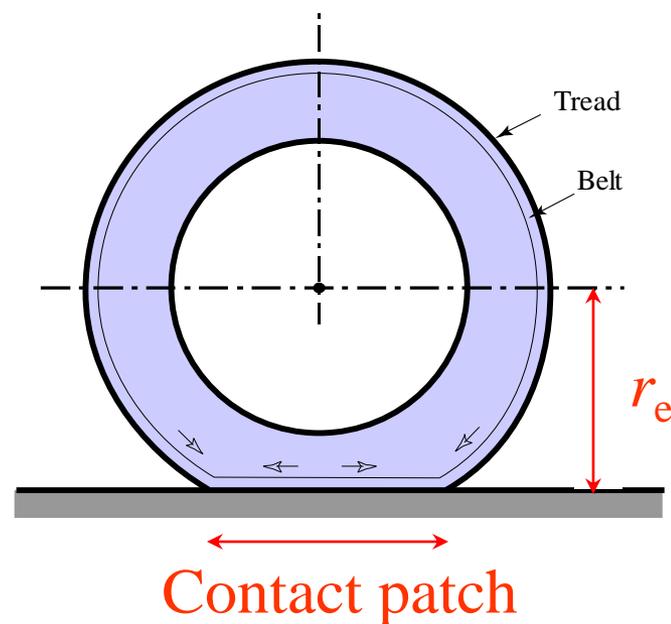
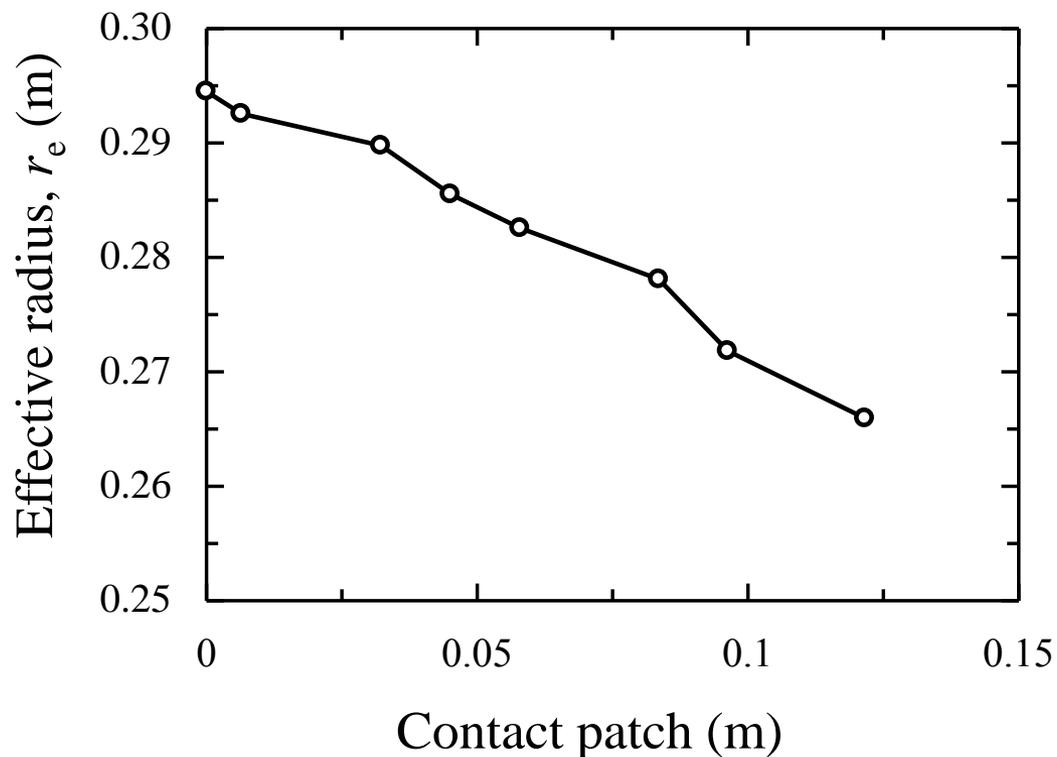
接地長さ

タイヤの変形を示すパラメータ



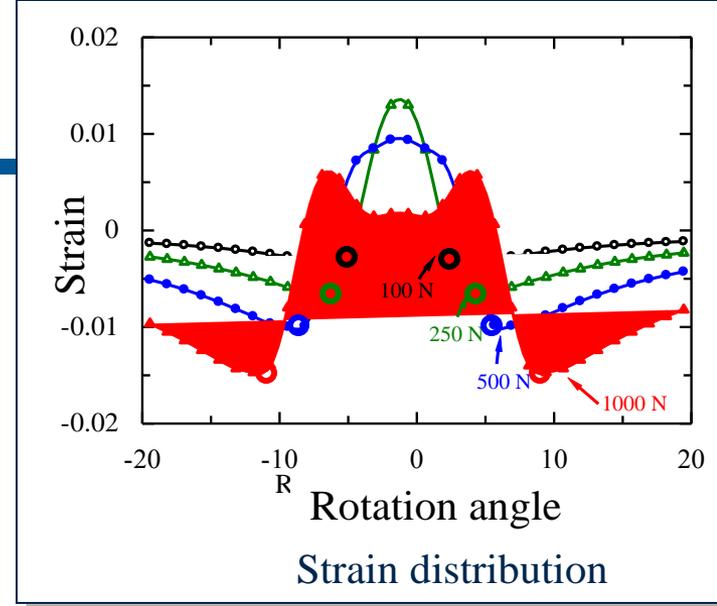
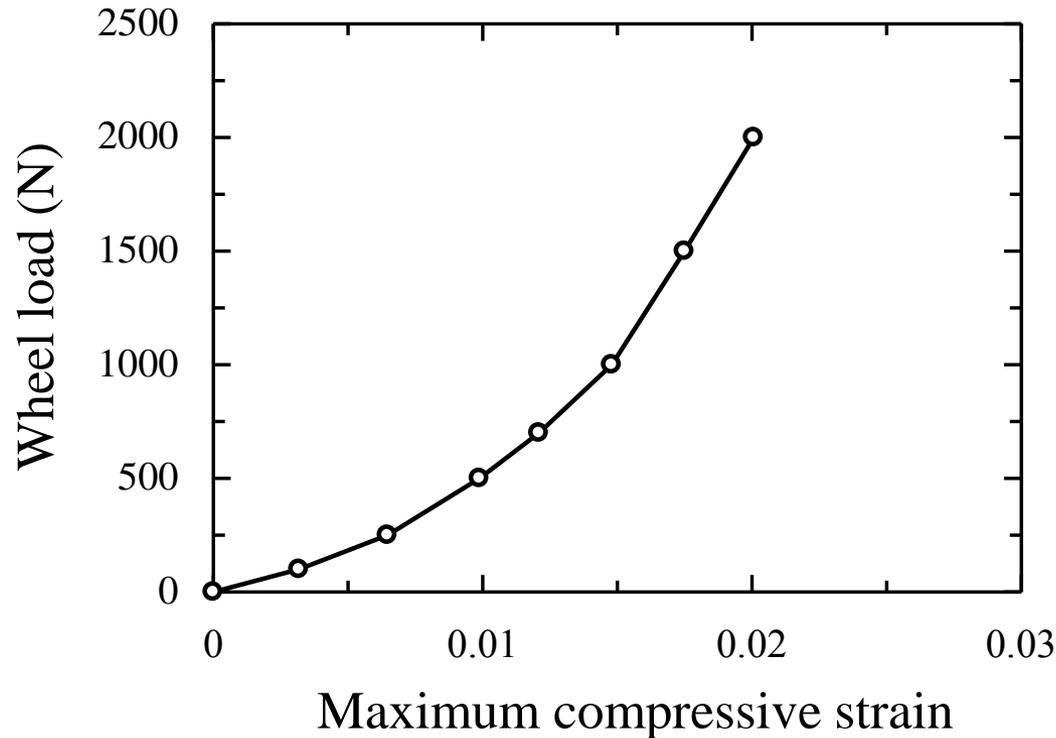
ひずみ時間微分のピーク間隔が接地長さに相当
FEM解析で一致を確認

有効転がり半径



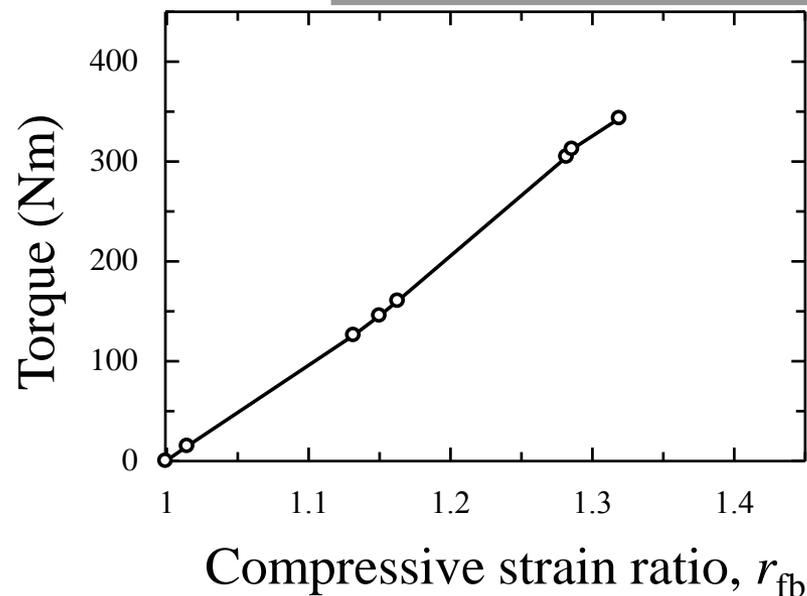
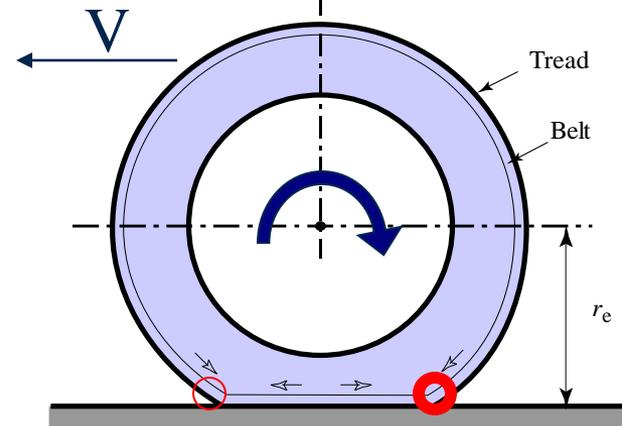
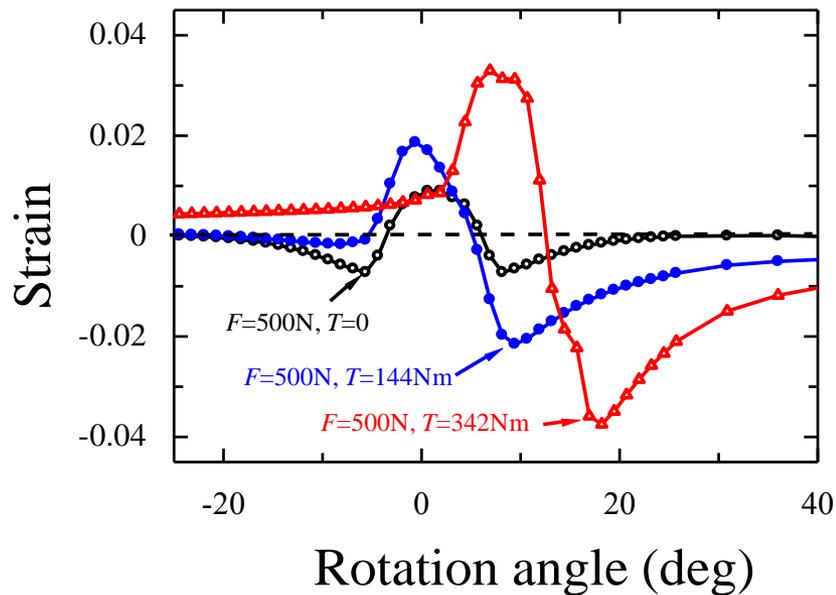
接地長さと有効転がり半径には負の比例関係
ひずみデータからスリップ比が算出可能

ホイール垂直荷重



最大圧縮ひずみからホイール垂直荷重が測定可能

ブレーキトルク

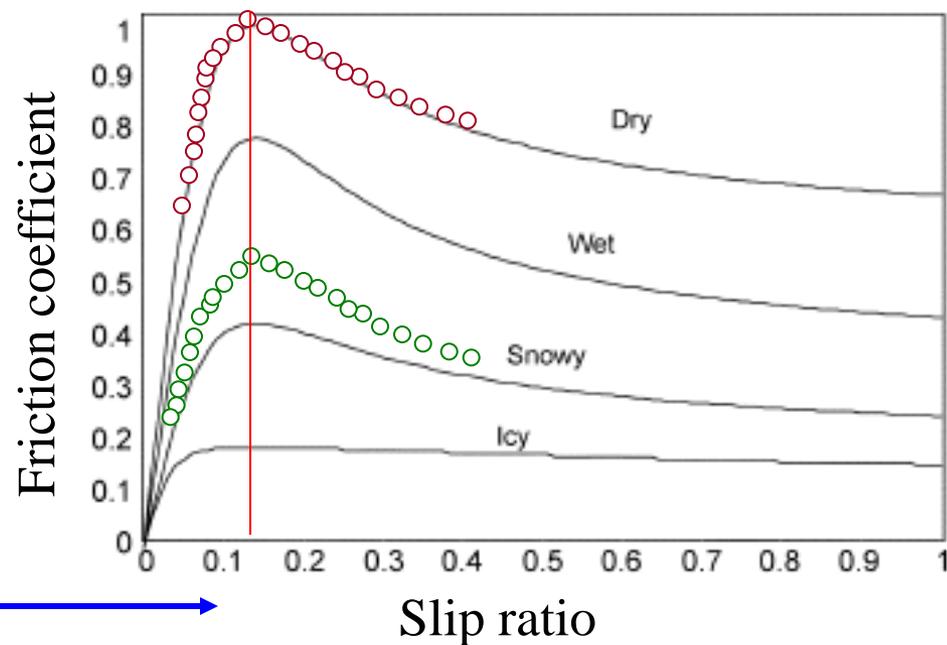
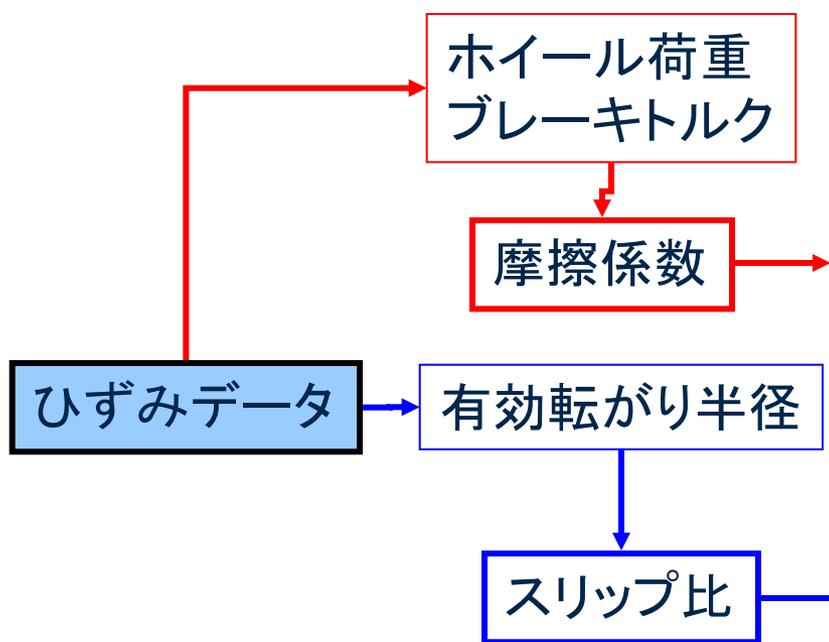


$$r_{fb} = \frac{\varepsilon_f + \varepsilon_p}{\varepsilon_b + \varepsilon_p}$$

ε_f : 前部のひずみ
 ε_b : 後部のひずみ
 ε_p : 空気圧によるひずみ

接地前後で圧縮ひずみ分布が変化
 圧縮ひずみ比からブレーキトルクが測定可能

最適制動制御，路面状態警告システム



一定のスリップ比で保持(ブレーキ圧調整)

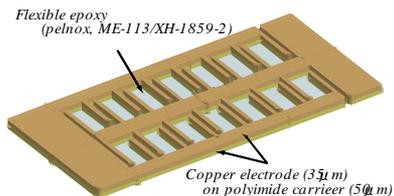
⇒ 最適な制動制御

測定済みスリップスロープを参照

⇒ 路面状態警告システム

まとめ

Tire



タイヤひずみセンサ

- パッチ型フレキシブルセンサ
- セルフセンシング

Control unit



バッテリーレス無線送信システムの開発

- 電磁誘導
- 同調回路

Vehicle



インテリジェントタイヤによる車両安全システム

- 最適制動制御
- 路面状態警告システム



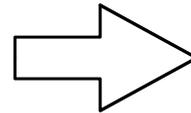
第7章結言

- ひずみ時間微分から接地長さ, 有効転がり半径の測定が可能である. さらに有効転がり半径からスリップ比の算出が可能である.
- 最大圧縮ひずみからホイール垂直荷重の測定が可能であり, 圧縮ひずみ比からトルクの測定が可能である. これらの値から摩擦係数の算出が可能である.
- ひずみデータを利用した最適制動制御と路面状態警告システムを提案した.

Present stage



インテリジェントタイヤ
タイヤ成型法の確立



Future stage



パッチ型フレキシブルセンサ

- 装着容易
- 市販タイヤに適用可能

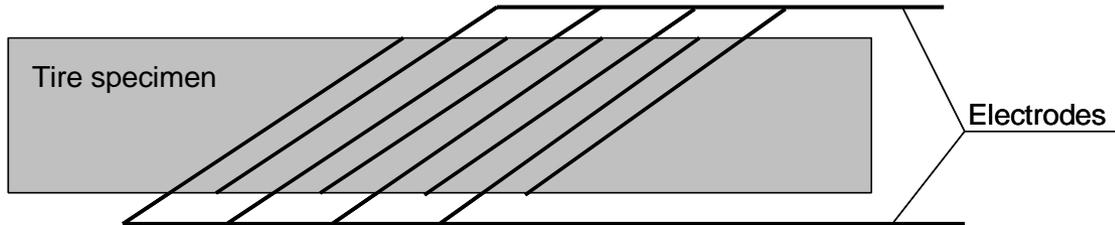
セルフセンシング法

- 環境耐性
- はく離問題なし

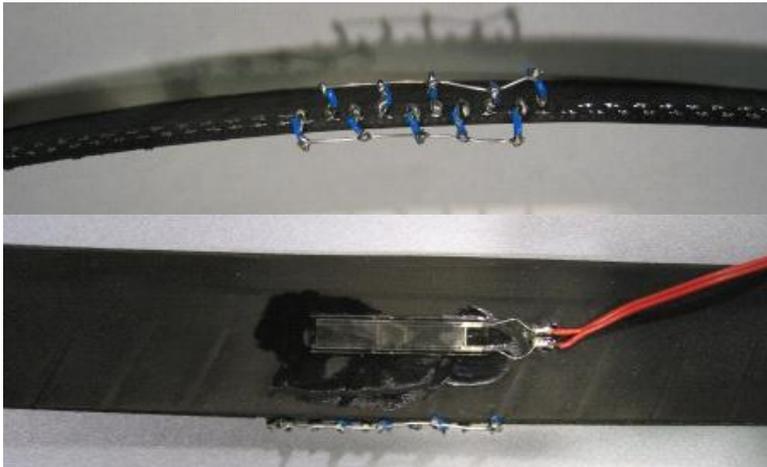
- ✓ 既存タイヤに適用できない
- ✓ タイヤ製造プロセスの変更

楕型電極

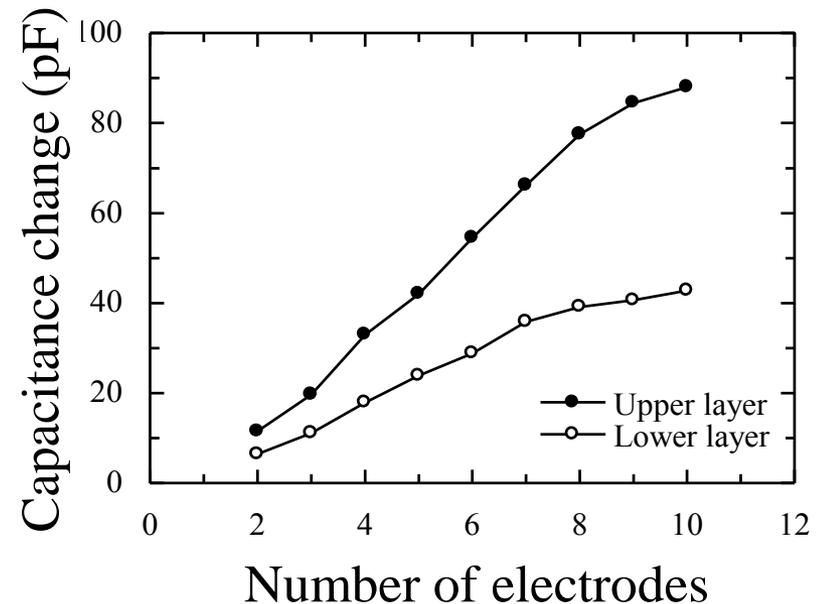
楕状に電極を配置



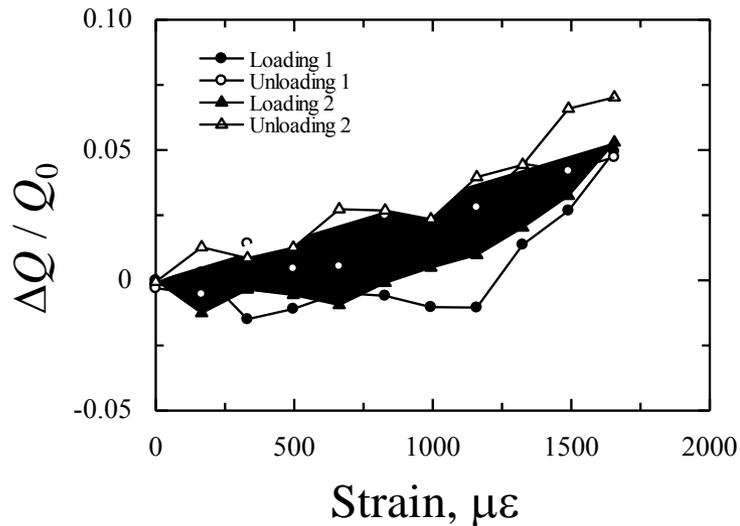
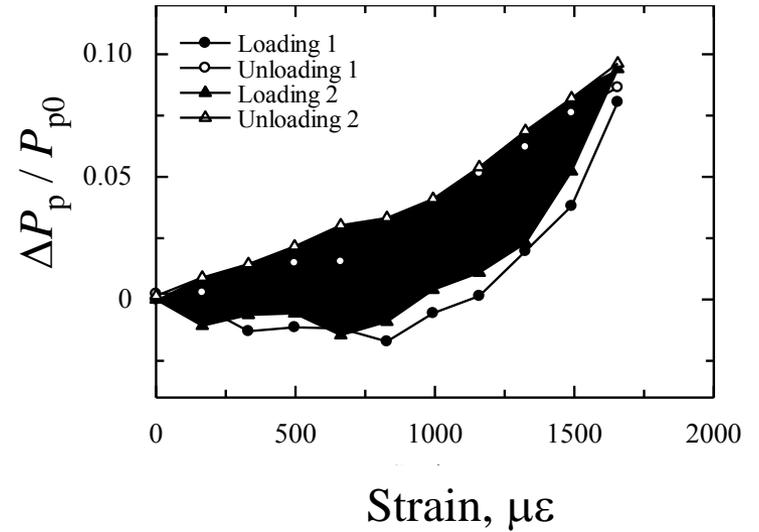
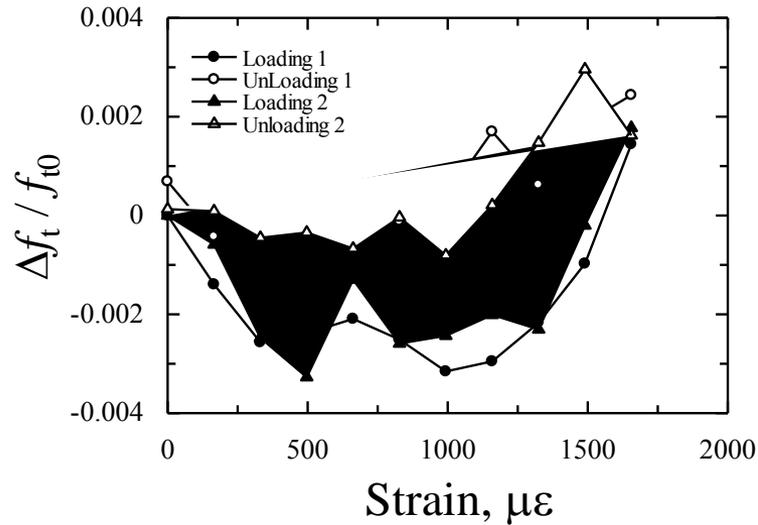
特徴
小型構造で大きな
電気容量変化を得る



楕型電極配置



スペクトル形状変化



Truck/bus tire



Steel belt

➤ Mooney- Rivlin

➤ 2 parameter

➤ Tensile strain 100%, compressive strain 30%

➤ Strain-energy density function

$$W(J_1, J_2, J_3) = C_{10}(J_1 - 3) + C_{01}(J_2 - 3) + \frac{1}{D_1}(J_3 - 1)^2$$

C_{10}, C_{01} : material constants

J_1, J_2, J_3 : invariants of strain tensor

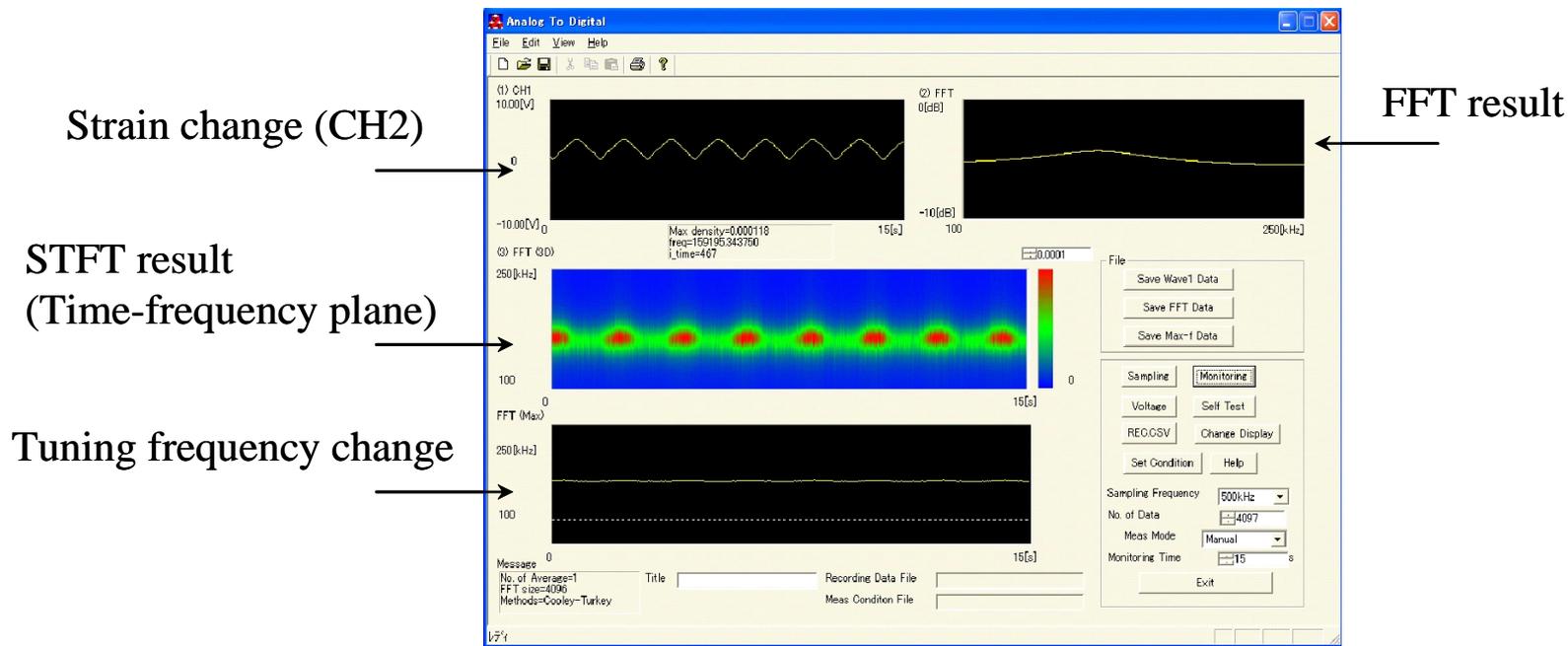
動的ひずみ測定ソフトウェア

測定用アプリケーションの作成



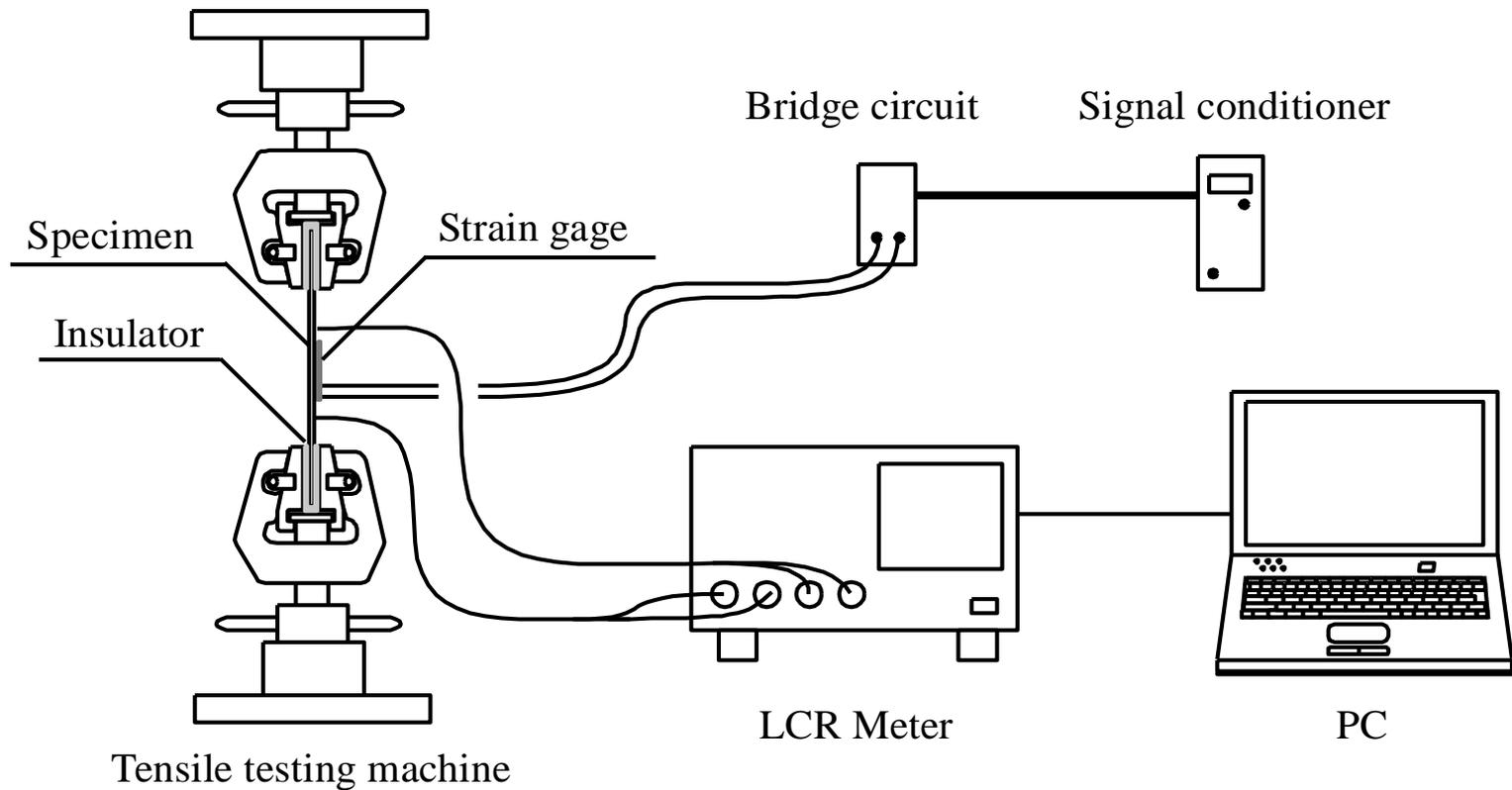
測定はAD変換ボードを内蔵したPCのみで可能

- 測定周波数: ~10MHz
- STFT(短時間フーリエ変換), MEM(最大エントロピー法)
- スペクトルサンプリング周波数: 90Hz



試験装置

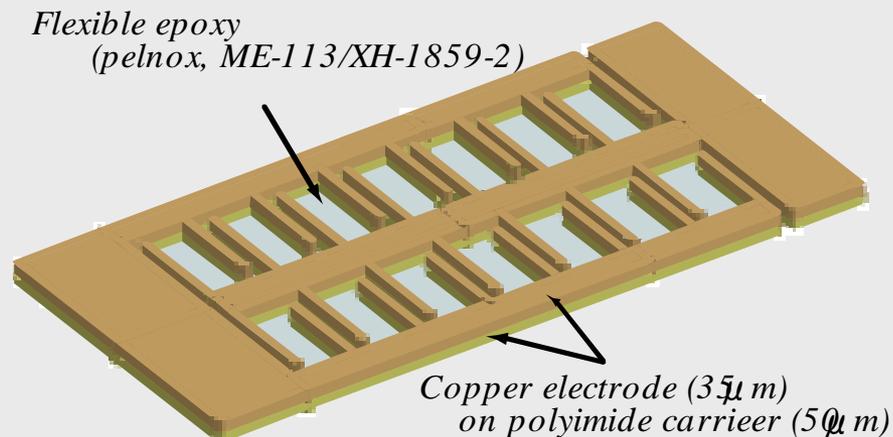
変位 : 3 mm
変位速度 : 0.5mm/mim



第2章 パッチ型フレキシブルセンサ

既存タイヤに適用可能なパッチ型フレキシブルセンサの提案

- 2.1 低剛性, 大変形に耐える電気容量型センサ
- 2.2 FEMによる静電容量解析, GFRP・実タイヤ貼付試験



Flexible capacitive sensor



patch-type sensor

電気容量型フレキシブルセンサ製作

材料

□ フレキシブル基板

銅箔 (35 μ m)

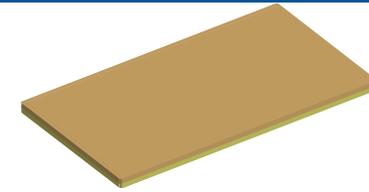
ポリイミドフィルム (50 μ m)

□ 超可とう性エポキシ

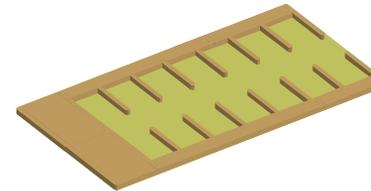
ペルノックス製 ME-113/XH-1859-2

(伸び率: 150 %, 弾性率: 0.55 MPa)

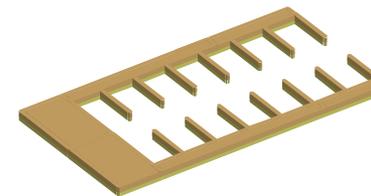
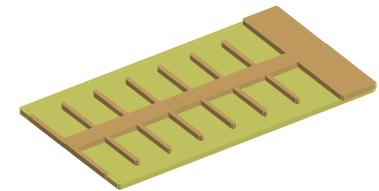
- ・低弾性率センサ
- ・大変形にも対応可能



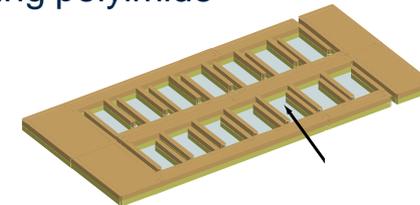
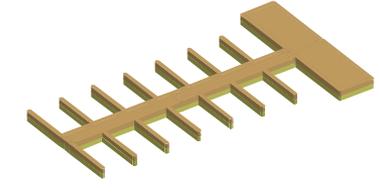
Step 1. Flexible substrate



Step 2. FeCl₃ etch

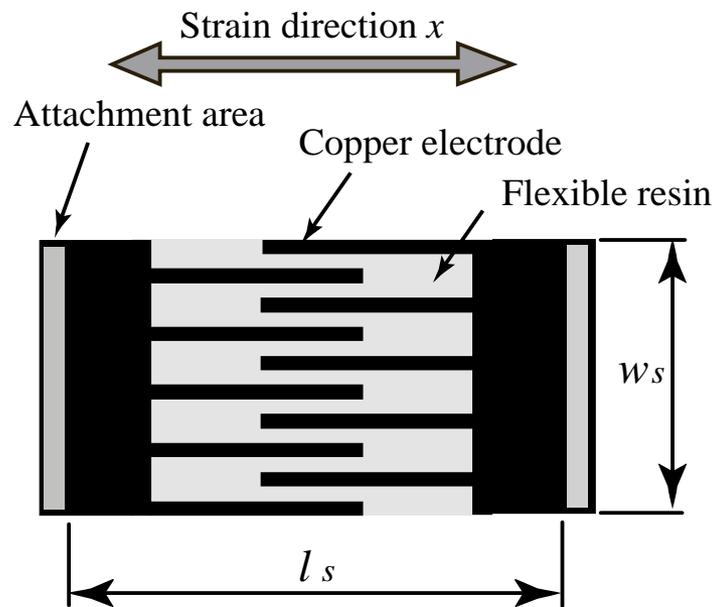


Step 3. Cutting polyimide



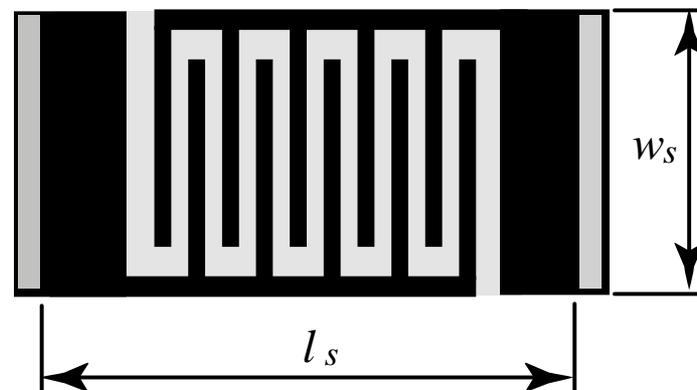
Step 4. Bonding two substrates

楕型電極形状



Lateral comb (LC)

対向面積の減少



Transverse comb (TC)

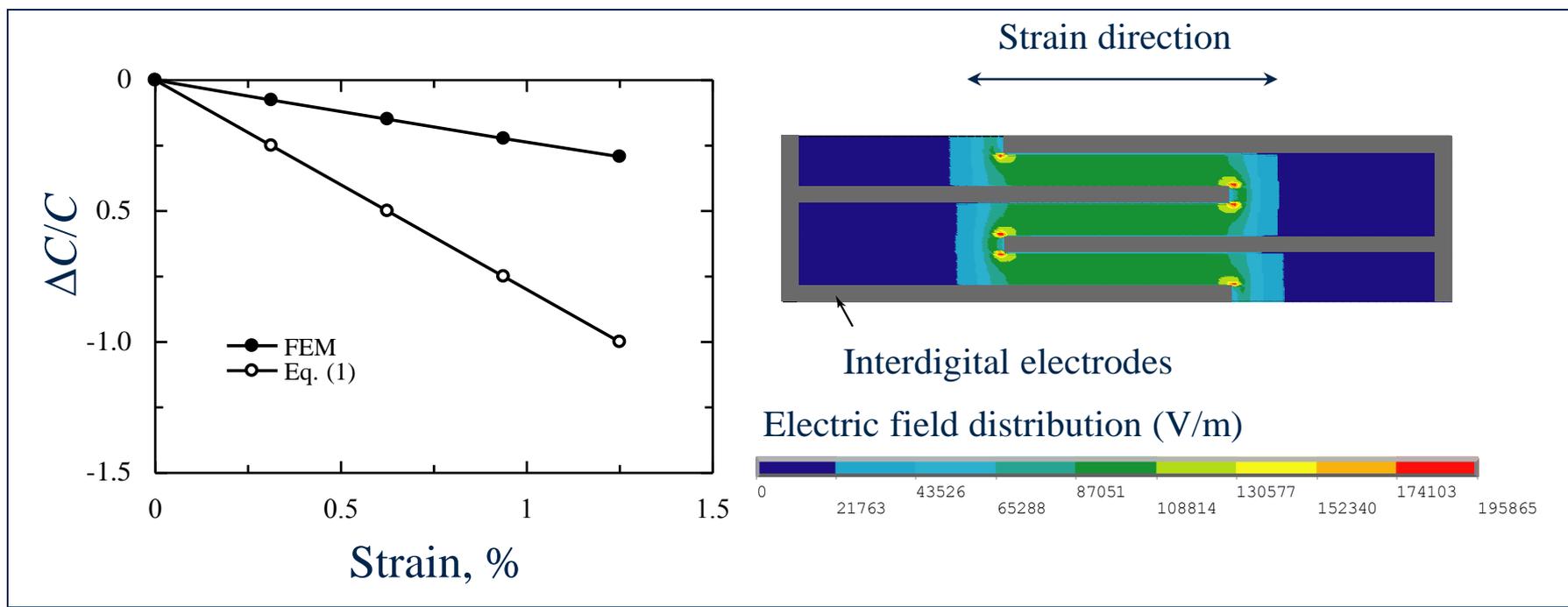
電極間隔の増減

静電容量解析

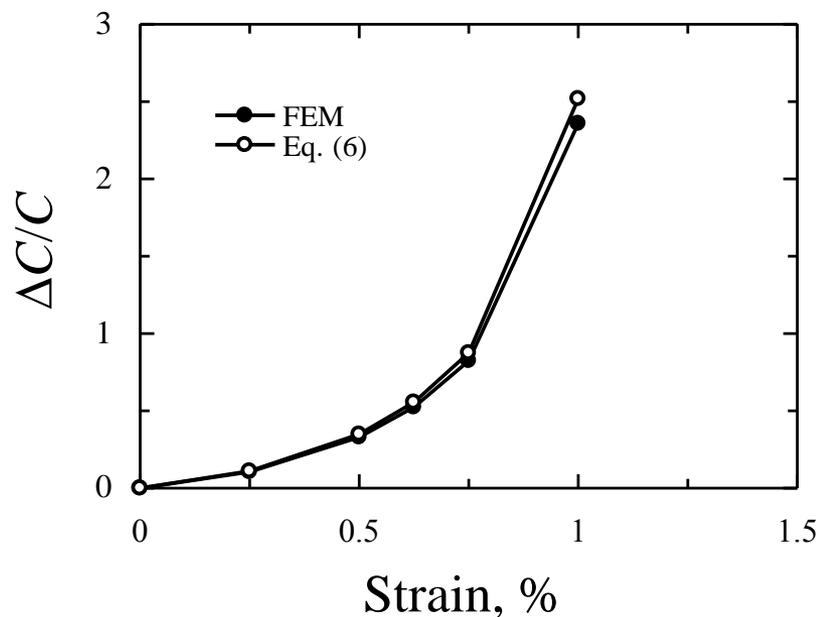
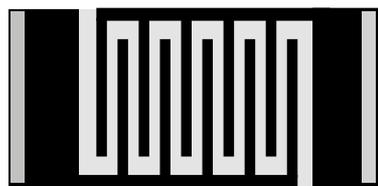
FEM解析

- ANSYS ver.10
- 2次元8節点静電場要素(要素数5000, 節点数17000)
- ひずみ負荷時の電極間電気容量を解析

LCセンサ解析結果

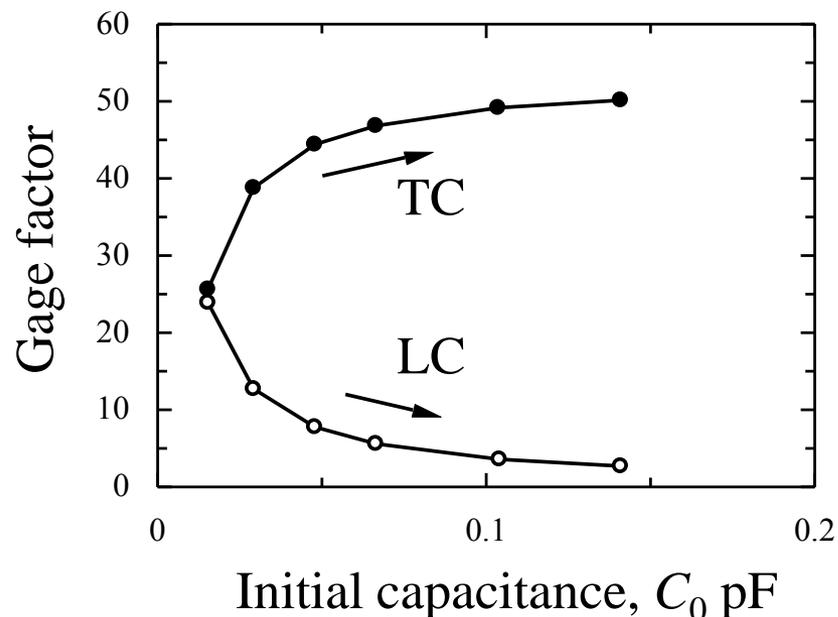


解析結果2



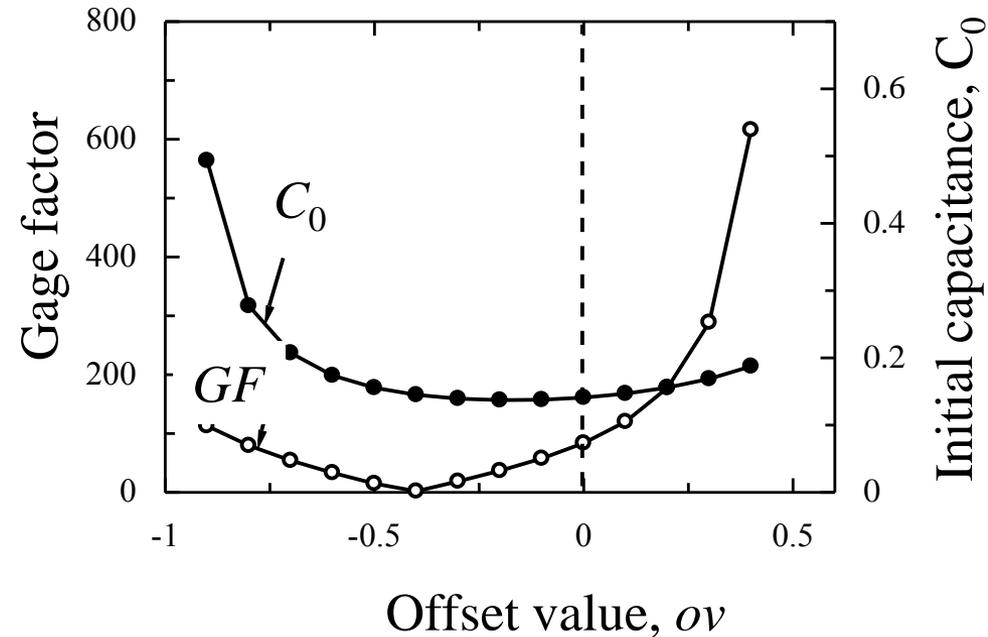
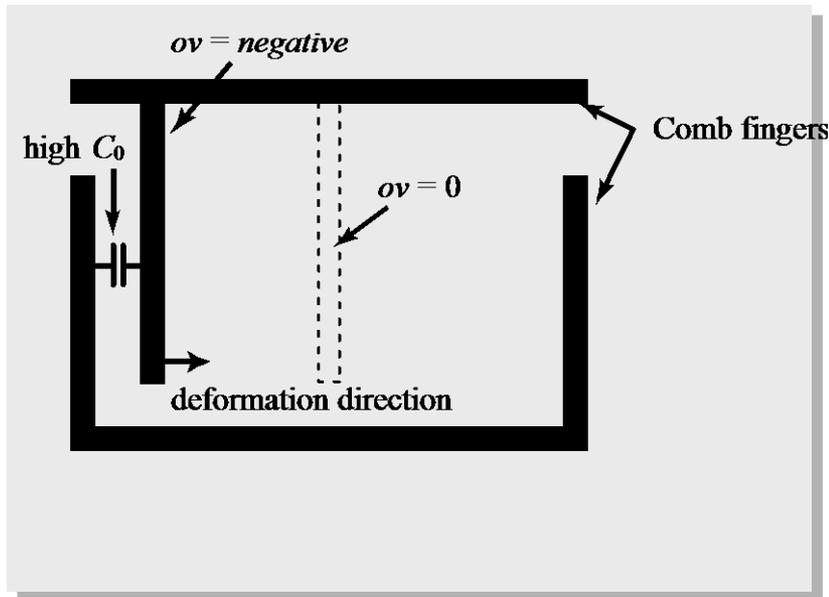
TCセンサ引張負荷時の電気容量変化

櫛長さを長くすると...



ゲージ率と初期電気容量

オフセットTCセンサ



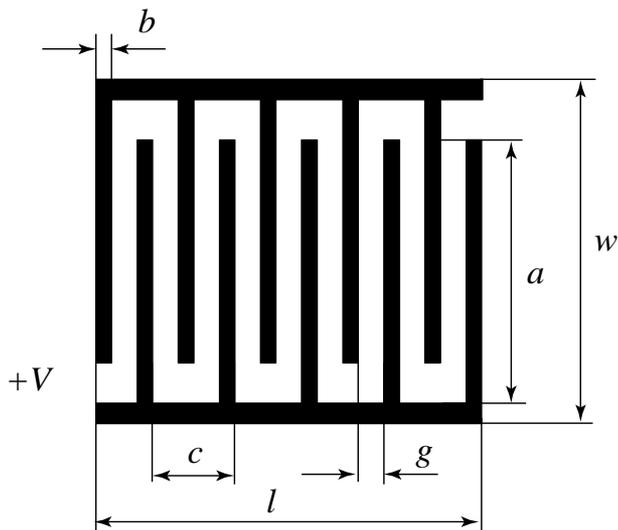
TCセンサでは電極をオフセット配置することでさらに高い C_0 , GF を得ることが可能

GFRP貼付実験方法

<GFRP引張試験>

- GFRP平板 (150 mm × 40 mm) にTC, LCセンサを貼付
- 変位速度 0.2 mm/min
- LCRメータを用いて電気容量を測定
- ひずみゲージをGFRPに貼付

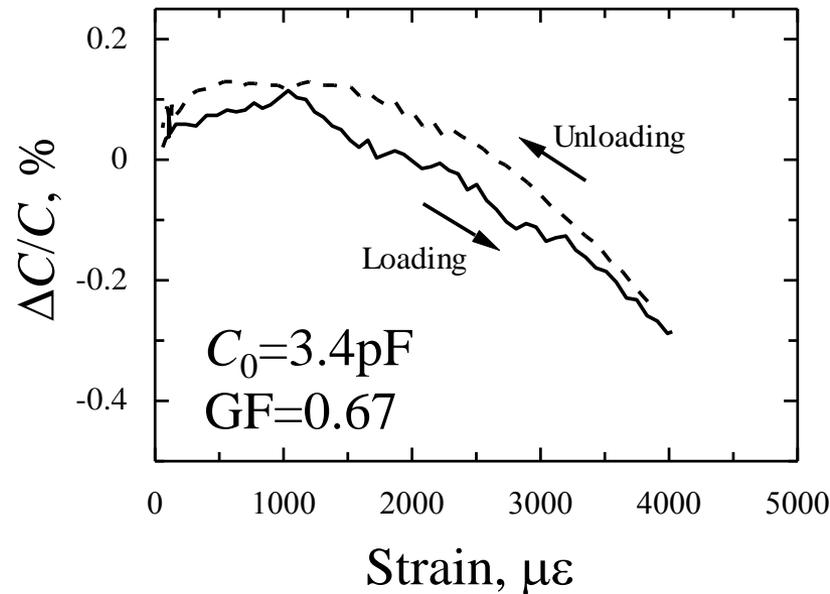
センサ形状



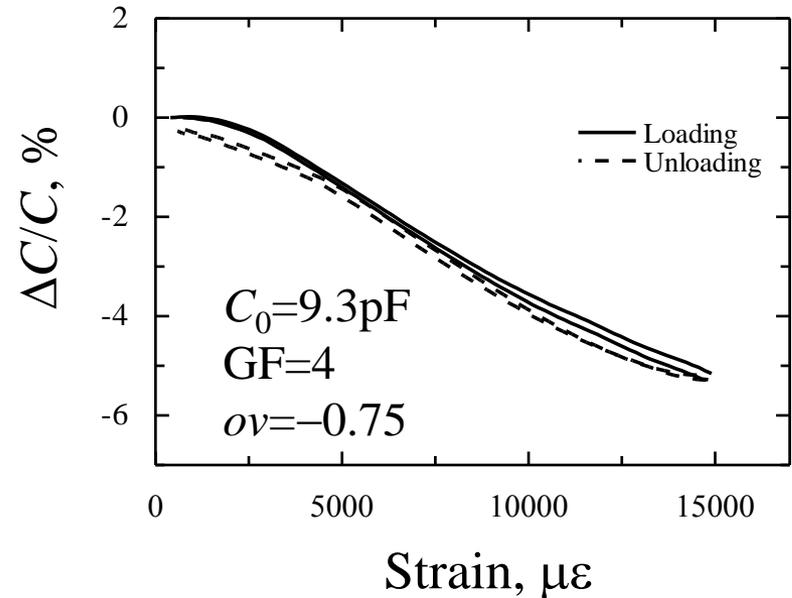
Sensor no.	w (mm)	c (mm)	b (mm)	g (mm)	a (mm)	n	l_s (mm)	w_s (mm)
LC-1	39	2.5	1	0.5	20	9	45	20
TC-1	13	6	1	3.5	7	3	85	26

TC: 電極をオフセット

GFRP貼付実験結果



LC sensor

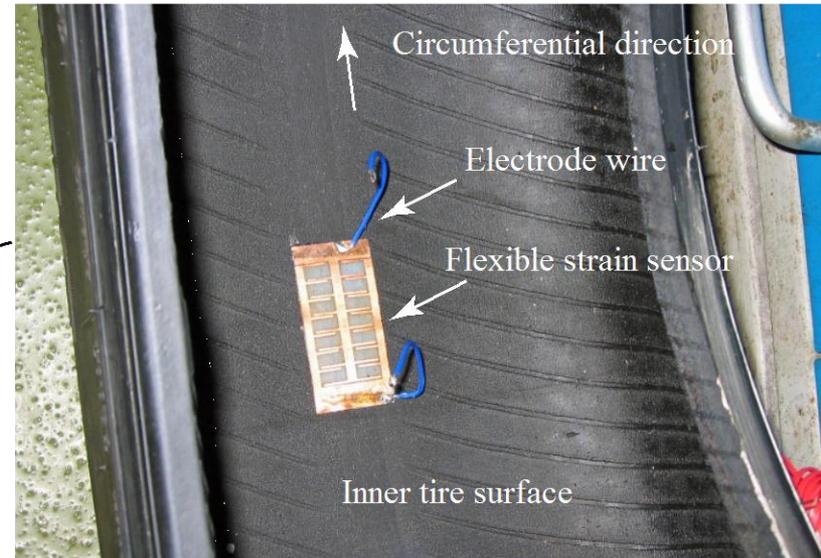
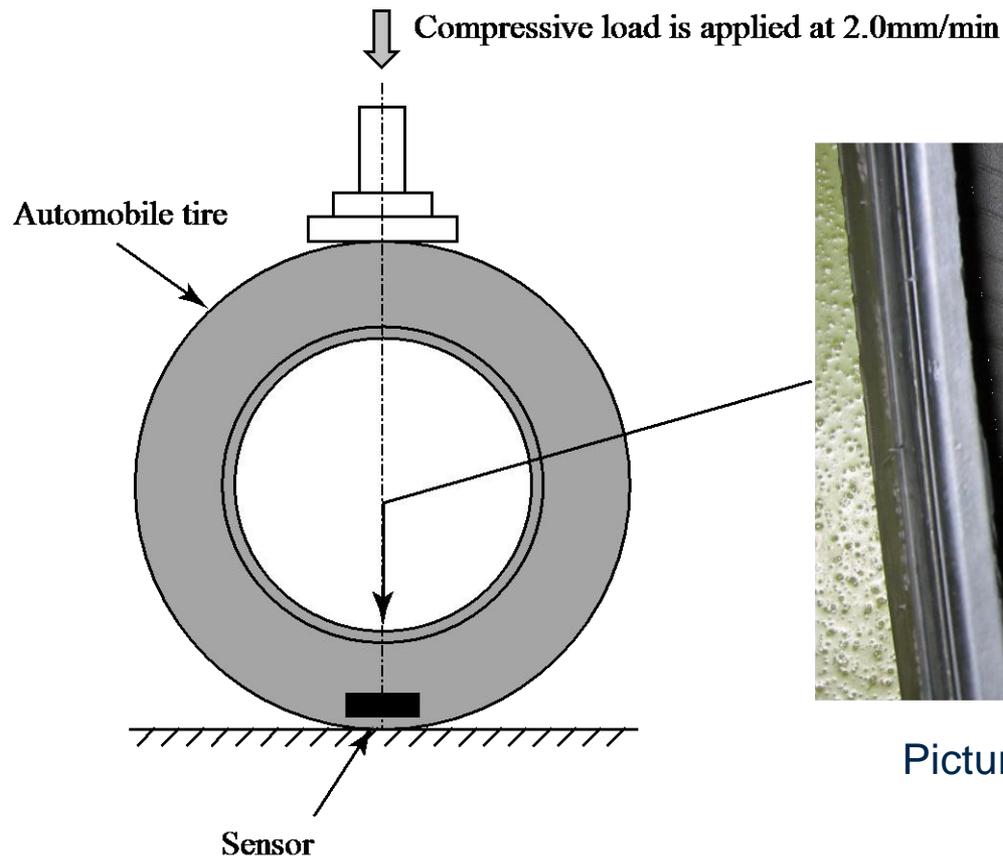


TC sensor

- ひずみに比例して電気容量は減少
- TCセンサではより高い初期電気容量, ゲージ率が得られる

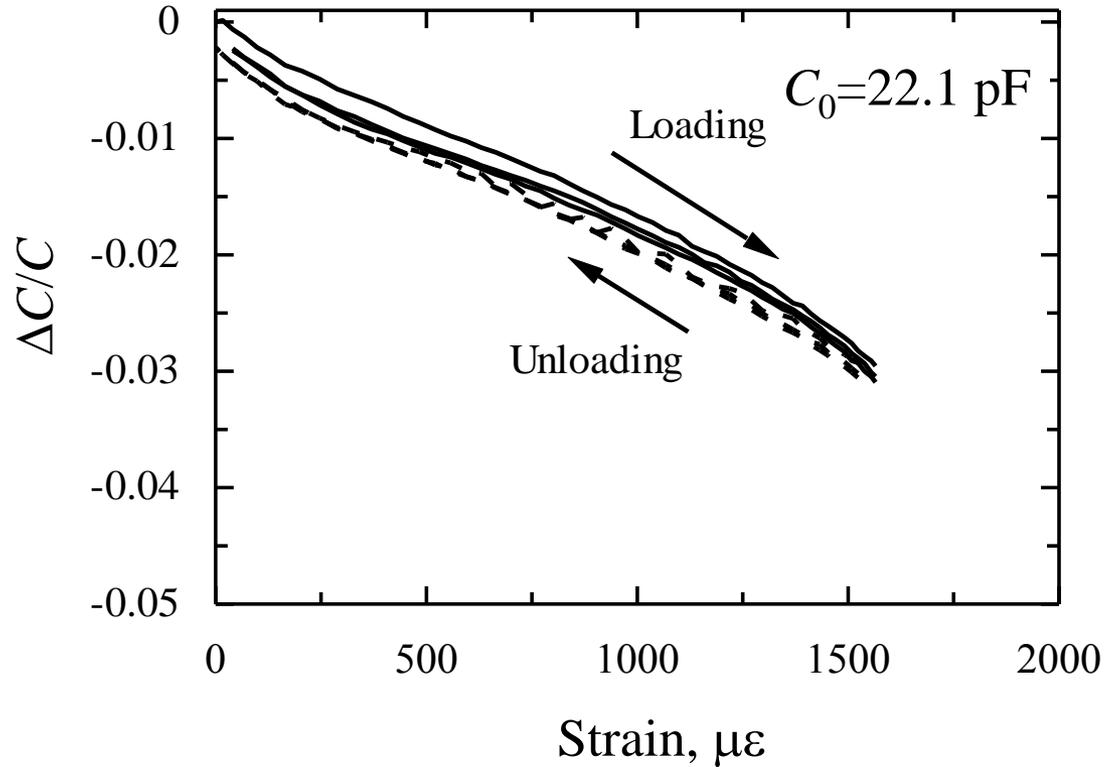
ラジアルタイヤ貼付実験

TCセンサをタイヤ(175/70R14)内側表面に貼付
タイヤ圧縮試験を実施: 2.0mm/min



Picture of attached flexible sensor

ラジアルタイヤ貼付実験結果



•ひずみ増加に伴い線形に電気容量は減少

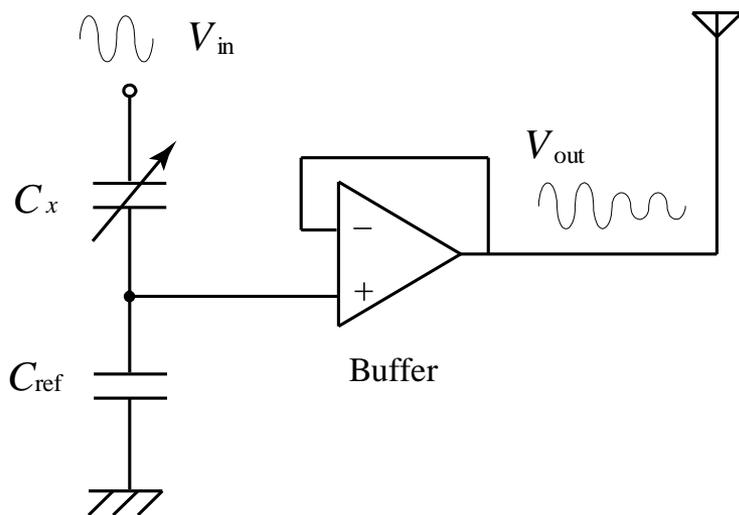
無線測定

電気容量データを受信機(コントロールユニット)に無線送信

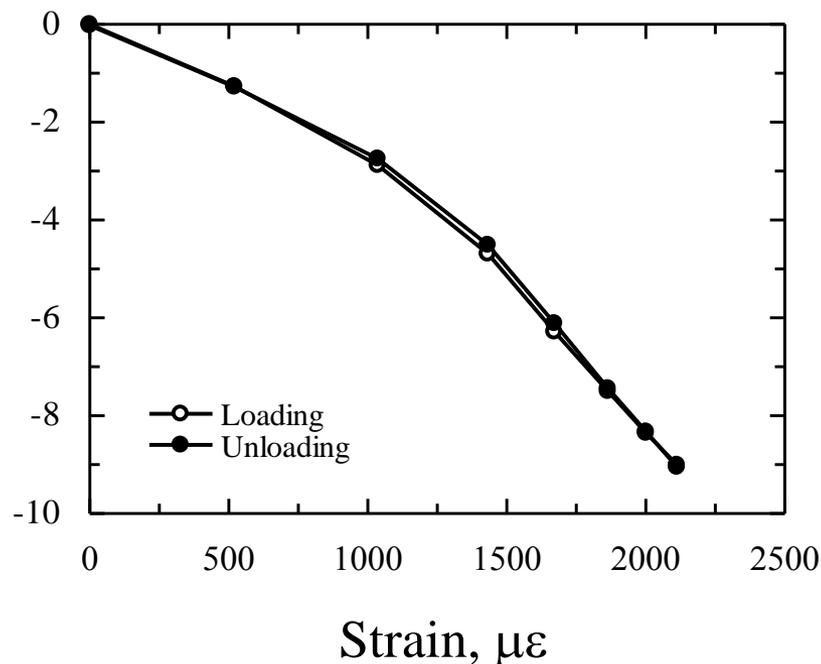
電気容量変化を電圧振幅変化に変換 (*Amplitude Modulation*)

$$\Rightarrow V_{\text{out}} = \frac{C_x}{C_x + C_{\text{ref}}} V_{\text{in}}$$

V_{in} : 入力電圧
 V_{out} : 出力電圧



AM wireless transmitter



自己温度補償

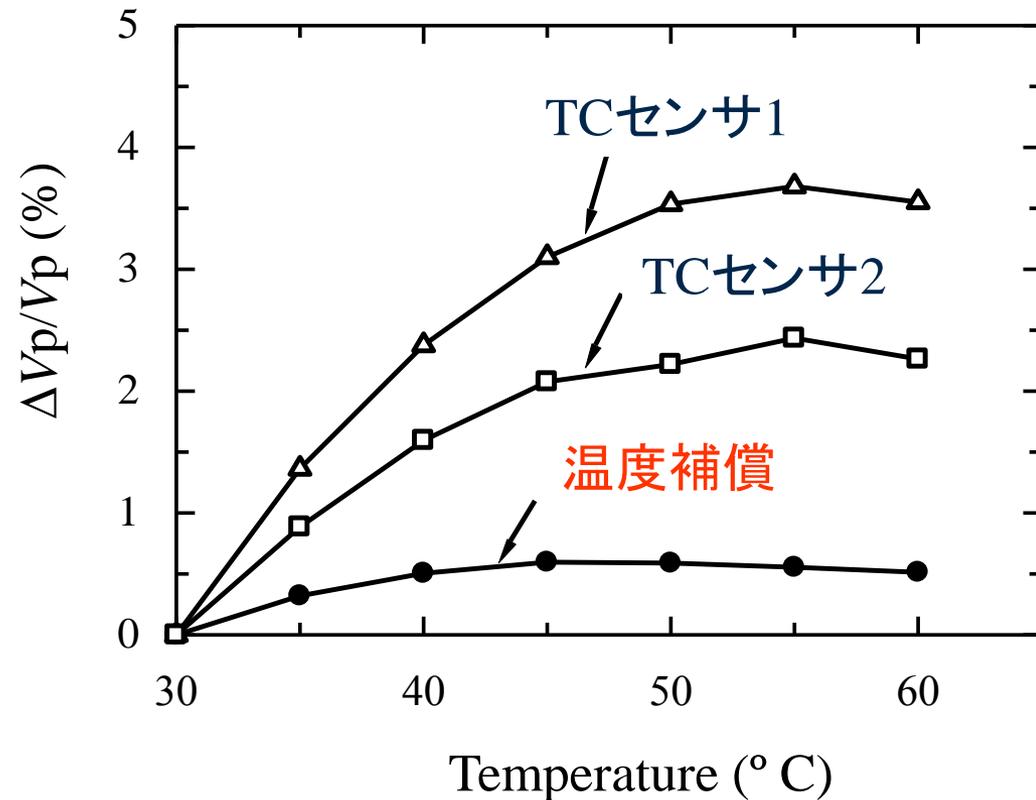
走行中にタイヤ温度が上昇し、センサ出力に影響

C_{ref} に同形状のTCセンサ電気容量を利用(ダミーセンサ)

$$V_{out} = \frac{(1 + \alpha)C_x}{(1 + \alpha)C_x + (1 + \alpha)C_{dum}} V_{in}$$
$$= \frac{C_x}{C_x + C_{dum}} V_{in}$$

(α : TCセンサ温度係数)

温度の影響を除去



第2章 結言

- タイヤひずみ測定用センサとして、低剛性・大変形に対応可能な電気容量型のLC, TCセンサを提案した。GFRP・ラジアルタイヤ貼付実験を実施した結果、TCセンサの方が高い初期電気容量とゲージ率の点からタイヤひずみセンサとして適する。
- 振幅変調を用いることでラジアルタイヤひずみの無線測定が可能であることを実証した。
- センサ電気容量は温度変化の影響を受けるが、ダミーセンサを用いることで除去可能である

内容

第1章 緒論

第2章 パッチ型フレキシブルセンサ

第3章 タイヤひずみのセルフセンシング法

第4章 CR発信器を用いたアクティブ無線モニタリング

第5章 電磁誘導を用いたパッシブ無線モニタリング

第6章 同調回路を用いたパッシブ無線モニタリング

第7章 ひずみを用いたタイヤ形状・荷重算出

第8章 結論

実タイヤへの適用

実際のタイヤの電気容量変化

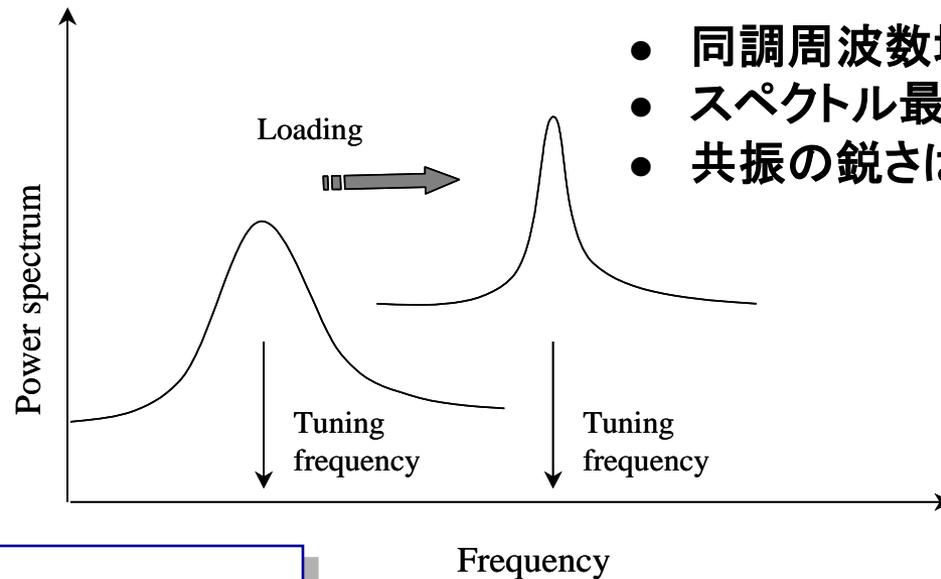
- ✓ 3次元構造の複雑さ, 接地面による圧縮影響
- ✓ 電気容量値の変化にヒステリシス

→ひずみ測定精度低下

無線ひずみモニタリングの実タイヤへの適用

- 電気抵抗・電気容量並列モデルを用いる
- 同調周波数, スペクトル最大値, Q 値を測定
 - スペクトル全体の形状から決定される
 - 共振点のわずかな変動に影響を受けない
- 応答曲面法によりひずみを高精度で推定

スペクトル形状の変化



同調周波数 f_t

$$f_t = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

スペクトル最大値 P_p

$$P_p = I^2 R$$

Q値

$$Q = R\sqrt{\frac{C}{L}}$$

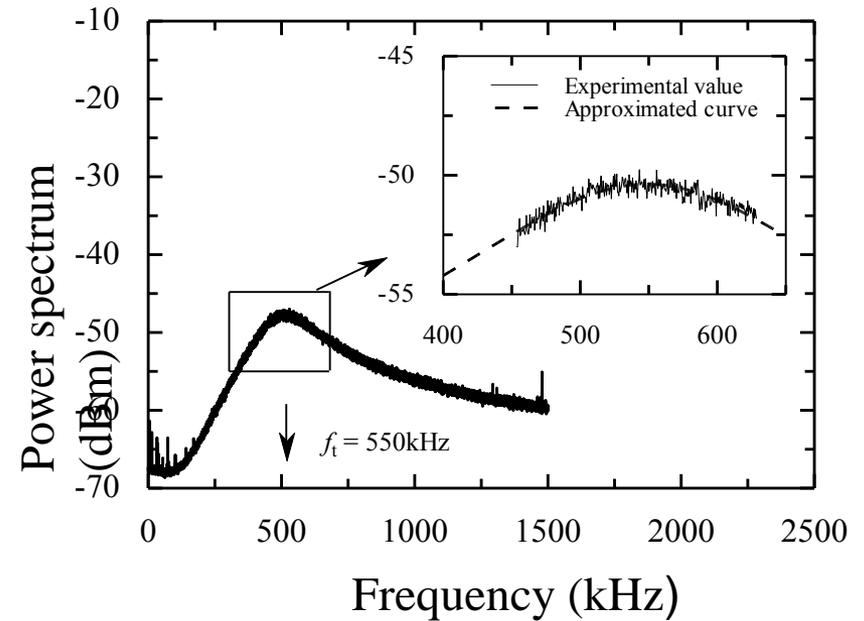
電極間隔増大

- 電気抵抗 R 増加
- 電気容量 C 減少

- 同調周波数 f_t 増加
- スペクトル最大値 P_p 増加
- Q値増加

スペクトル特徴量の抽出

- センサ出力波形を無線受信
- FFTによりスペクトル解析



ローレンツ関数近似

$$\frac{1}{P(f)} = \pi \frac{(f - \mu)^2 + \left(\frac{1}{2}\Gamma\right)^2}{\frac{1}{2}\Gamma} = k_0 f^2 + k_1 f + k_2 \quad \Rightarrow$$

同調周波数

$$f_t = -\frac{k_1}{2k_2}$$

スペクトル最大値

$$P_p = k_2 - \frac{k_1^2}{4k_0}$$

Q値

$$Q = \frac{-k_1}{4\sqrt{k_0 k_2 - \frac{1}{4}k_1^2}}$$

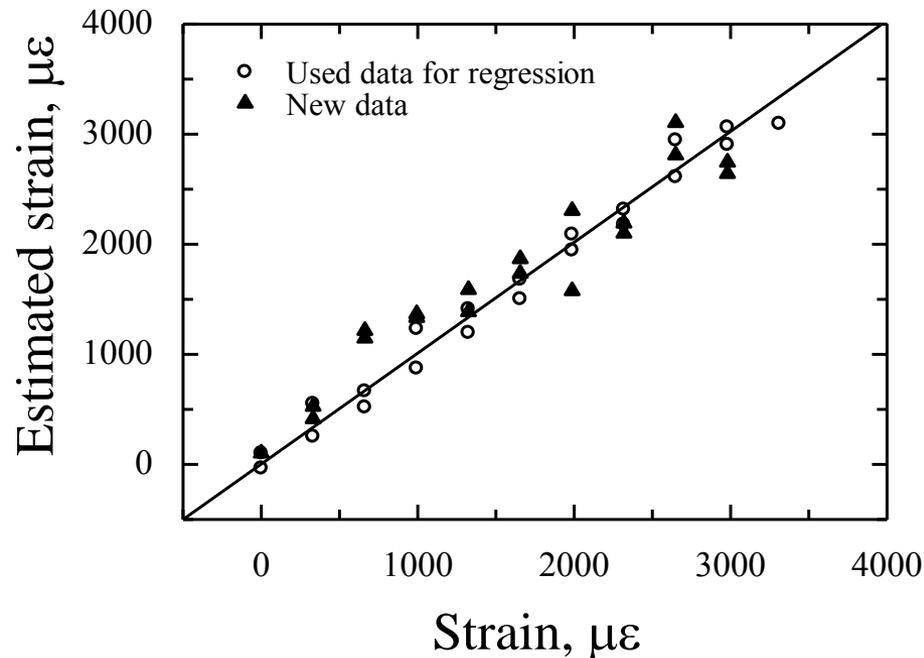
応答曲面を用いたひずみ測定

■ 応答曲面法を用いてひずみを推定

Response y : strain
Variables x_1 : f_t
 x_2 : P_p
 x_3 : Q

2次多項式近似

$$\Rightarrow y = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_j + \sum_{j=1}^k \beta_j x_j^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j>i}^k \beta_{ij} x_i x_j$$



第6章 結言

- 同調回路と白色雑音を用いたセンサ内に電源不要のパッシブ無線モニタリングシステムを提案した.
- ラジアルタイヤ試験片を用いて, 変位周波数10Hzの繰り返し荷重試験を実施し有効性を示した.
- 同調周波数に加え, パワースペクトル最大値, 共振の鋭さを測定し応答曲面法を用いることで, 高精度でタイヤひずみの測定が可能であることを実証した.