

# 構造ヘルスマニタリングのための 最大値記憶センサ

三田彰<sup>1</sup>・高比良晋平<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ph. D. 慶應義塾大学助教授 理工学部システムデザイン工学科 (〒223-8522 横浜市港北区日吉 3-14-1)

<sup>2</sup>慶應義塾大学学生 理工学部システムデザイン工学科 (〒223-8522 横浜市港北区日吉 3-14-1)

An innovative sensor that can memorize the maximum strain ever experienced by a target material without electricity supply is proposed. The sensor realizes the memory capability by introducing a thin wire that causes elastic buckling under a small force resulting in perfect plastic behavior in tensile direction. The memorized maximum strain is stored in the form of resistance, capacitance or inductance change. Furthermore, when capacitance or inductance change is used for detection, wireless measurement is applicable by forming an LC circuit and detecting the resonance frequency of the LC circuit by a radio oscillator. The proposed sensor is best suited for structural health monitoring for civil and building structures over their lifetime.

**Key Words:** Health monitoring, Maximum strain, Wireless, Elastic buckling

## 1. はじめに

土木建築構造物の維持管理費用の削減や長寿命化のために、その健全性をモニタリングするヘルスマニタリングシステムの重要性が認識されつつある。しかし、一般の構造物に常時オンラインで多点をモニターするような高価なシステムを導入するのは経済的に引き合わないことが多い。また、常時モニタリングするためのネットワークシステムの寿命は構造寿命に比較して一般に短いため、モニタリングシステムそのものの維持管理費用が高くついて逆効果になることすら考えられる。安価で寿命が長く、かつ必要な時にモニタリングが可能なセンサがこうしたニーズにマッチするものと思われる。

こうした安価な計測システムの例として、最大歪をエネルギー供給なしに計測できるセンサがある。最大歪測定のためのセンサとして、複数のものが研究されてきた。その中でも材料自身がセンサ機能を持つことで注目を集めている仕組みとして、炭素繊維束の抵抗変化を利用したもの<sup>1)</sup>や、トリップ鋼の磁化を利用したもの<sup>2)</sup>がある。炭素繊維を利用したものは、ガラス繊維強化プラスチック (FRP) に炭素繊維を導入するとその電気抵抗が過去に受けた最大歪と相関を持つことを利用したセンサである。ただ、抵抗変化率が過去の最大歪だけでなく、その時点での歪に依存すること、精度があまり高くないことなどの問題がある。最近では、炭素繊維のかわりに炭素粒子を導入することで、その精度の向上が試みられている<sup>3)</sup>。トリップ鋼を利用したセンサは鋼材が歪履歴によって磁化する特性を利用したものである。この場合は、磁化の測定に特殊な装置が必要となることがネックになっている。

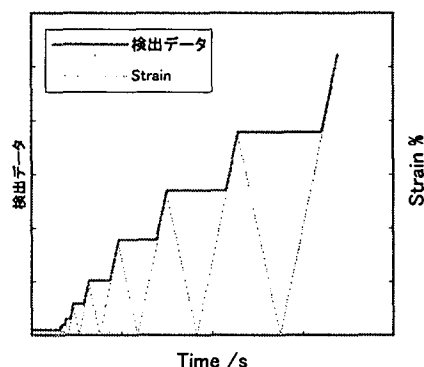


図-1 最大歪記憶センサの理想的な出力特性

機械的な仕組みを利用した最大値記憶センサとしては、複数の導電繊維を一定の歪レベルで破断させるようにして構成した最大変位センサが市販されている。このセンサの場合は、それぞれの歪レベルごとのオンオフスイッチ型となっており、検知レベルは組み込まれた導電繊維の本数に依存し、高精度の測定には向かない。ポテンシオメーターを利用したセンサも市販されているが、これも比較的大きな変形測定用である。

最大歪を記憶するセンサの理想的な特性は図-1に示す通りである。本研究では、構造が単純で、かつ小型化が容易な最大歪記憶型センサの仕組みを提案する。提案するセンサは、耐火被覆があって、材料表面が露出されていないような状況下でも使用できるようにするため、無線でデータを取得することも可能なものである。簡単な特性実験も実施したので、その結果についても報告する。

## 2. 最大値記憶の仕組み

### (1) 弾性座屈

図-1 に示すような最大歪みと測定値の理想的な特性を実現するためには、センサは一方方向のみに完全塑性であることが必要となる。こうした特性を実現するために、弾性座屈を利用することとした。基本的な原理を図-2 に示す。

図-2 に示すように左右二つのブロックとその二つを繋ぐ細線でセンサを構成する。二つのブロックは被測定物質に設置される。細線の右端は右のブロックに固定され、左のブロックによって一定の摩擦力で保持されている。このような仕組みとすると、左右の距離が伸びる方向に力が加わると、ブロックの摩擦抵抗を引張力が超える場合に細線が抜け出し、ブロック間の細線の長さが変化する。引張力が解除され被測定物質の歪が解除されると、左右のブロック間の距離は元に戻るが、細線の座屈荷重が摩擦力以下であれば、両ブロック間の細線は座屈して、細線の長さは変化しない。すなわち一方方向のみに完全塑性特性を実現できることになる。こうした特性はたとえば一方方向のみに力を伝達するギアなどの機械的な装置によっても実現できるが、弾性座屈を利用することのメリットはその仕組みの単純さのために、低コストでかつ小型のシステムの実現が可能な点にある。また、細線を左のブロックを貫通する形で設置しておけば、座屈した細線を引き出して元の長さに復帰させることも容易なため、何回でも計測が可能となる。

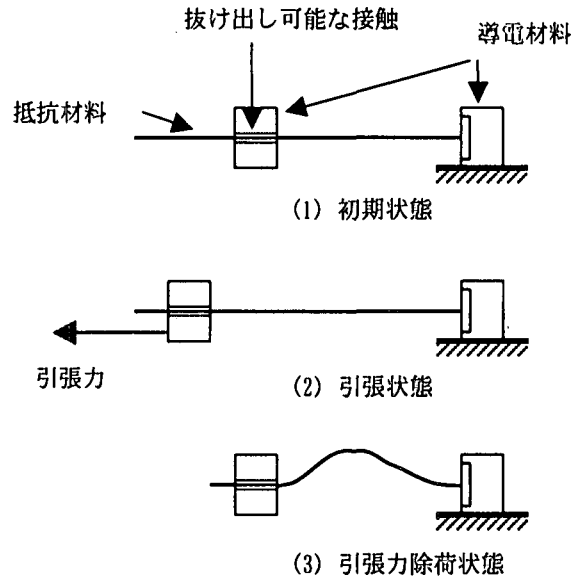


図-2 弾性座屈を利用した最大値記憶

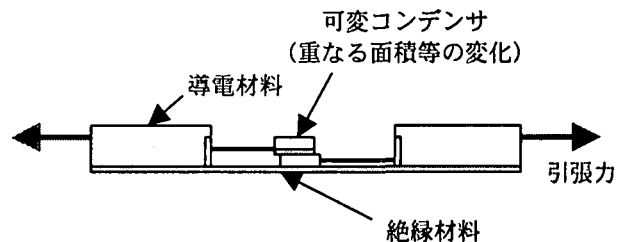


図-3 可変コンデンサの利用

### (2) 抵抗線を利用したセンサ

図-2 に示すように細線を抵抗材料とすれば、左右のブロック間の抵抗を測定することによってブロック間の細線の長さを測定することが可能となる。この場合、抵抗は通常の歪ゲージで利用されている原理と同じく、弾性変形による断面積の変化によっても抵抗値が変動するため、摩擦力を超えて滑り出す時の力との関係に留意する必要がある。

抵抗線を利用する仕組みの場合、細線すべてを抵抗線とする必要はない。左右のブロック間のうち、右側の一部を導線とすると、抵抗線長さの変化率を上げることが可能となり、感度向上につなげることができる。

### (3) 可変コンデンサと可変コイル

長さの変化の測定には、抵抗の変化だけでなく、キャパシタンスやインダクタンスの変化で測定することも可能である。図-3 にはキャパシタンスの変化を利用した場合の図を示す。この場合は可変コンデンサに一定の摩擦力を持たせて、圧縮時には接続された細線が座屈することによって、キャパシタンスが保持される。この場合の細線は導線である。また、可変コンデンサの部分を変換コイルとして、インダクタンスを変化させることによって最大歪記憶センサの構成は可能である。

### (4) 無線化

センサを設置する場合に電力を供給し、データを取得するための配線工事に多大な費用がかかる場合がある。その場合には電源の供給が不要で、かつ配線も不要であることが望ましい。無線でかつ電源供給の不要な最大値記憶センサは、可変コンデンサや可変コイルを利用した場合に実現可能である。すなわち、可変コンデンサを利用する場合はインダクタンスが既知であるコイルを接続した閉回路とする LC 共振回路を構成すれば、この回路の共振振動数  $f$  が下式で与えられる。

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1)$$

ここで  $L$  はインダクタンス、 $C$  はキャパシタンスである。この振動数は非接触で外部からディップメータで測定可能である。ディップメータは共振回路と発振回路を組み合わせた測定器であり、発振出力が被測定回路の振動数に合ったとき、測定器の出力が被測定回路に吸収されることを利用したものである。

同様に可変コイルを利用した場合にはキャパシタンス既知のコンデンサを接続した LC 回路を構成することで同様のシステムが実現されて、外部から非接触で最大歪を検出できる。

### 3. 抵抗可変型センサ

#### (1) 実験の概要

抵抗線材料として電気抵抗率の高いニクロムを使用した。また、断面形状は実装の容易さを考慮して長方形断面とした。用いたパラメータは表-1の通りである。実験状況を図-4に示す。予備実験として実施したものであるため、摩擦力の調整は万力を利用した簡便な方法によっている。この実験の場合、ニクロム線を固着した左のブロックを移動することによって、変位と抵抗値の変動を調べた。

表-1 抵抗線利用型の実験パラメータ

ブロック間の初期長さ	20 mm
ニクロムリボンの幅	0.4 mm
ニクロムリボンの厚さ	0.068 mm
ニクロムのヤング係数	214 GPa
単位長さ当たりの抵抗率	48.6 Ω/m

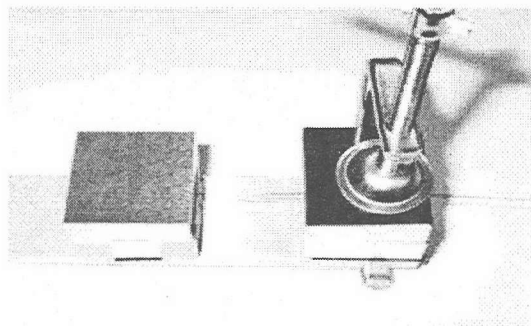


図-4 抵抗線を利用した実験の状況

#### (2) 実験結果

正確な抵抗変化の測定にはブリッジ回路を組んで測定することが必要であるが、本実験では実現可能性の検証のみを目的としているので、テスターを利用した。また、両ブロック間の距離の測定にはノギスを利用した。

図-5には単調引張試験の結果を示す。図-6には繰り返し引張試験の結果を示す。

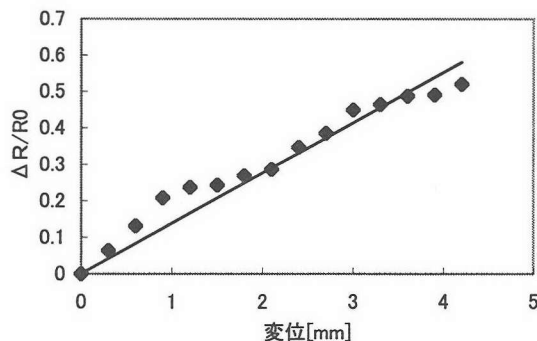


図-5 変位と電気抵抗の変化率の関係 (単調引張試験、実線は理論値)

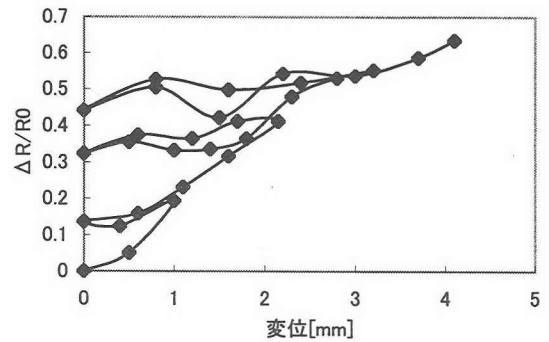


図-6 変位と電気抵抗の変化率の関係 (繰り返し引張試験)

#### (3) 実験の評価

図-5から明らかなように、この範囲では、変位と抵抗値の変化率はほぼ線形関係にあることがわかる。図-6を見ると、変位が戻る時に、抵抗線の弾性変形の影響によって、若干残留抵抗が最大歪時よりも減少するものの、ほぼフラットな残留抵抗を示すことがわかる。今回の実験は、摩擦力、弾性座屈荷重、抵抗線の剛性等についての最適化を行ったものではないにもかかわらず、センサとして利用が可能であることを示す結果となっている。

### 4. キャパシタンス可変型センサ

#### (1) 実験の概要

キャパシタンスはコンデンサの対極面積に比例し、対極距離に反比例する関係にある。従って、コンデンサの対極距離が一定に保たれる場合、共振振動数の変化率と可変コンデンサ部の重なり部の長さ変化率との関係は下式で示され、図-7のような関係となる。変化率の低い領域では、両者がほぼ線形関係にあることがわかる。

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{1}{\sqrt{1 - \Delta l/l}} - 1 \quad (2)$$

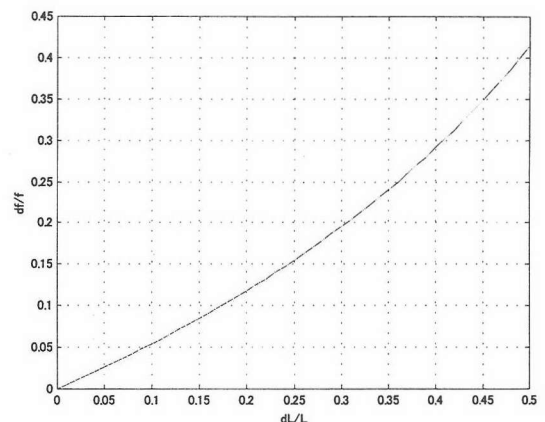


図-7 長さ変化率と共振振動数変化率の関係

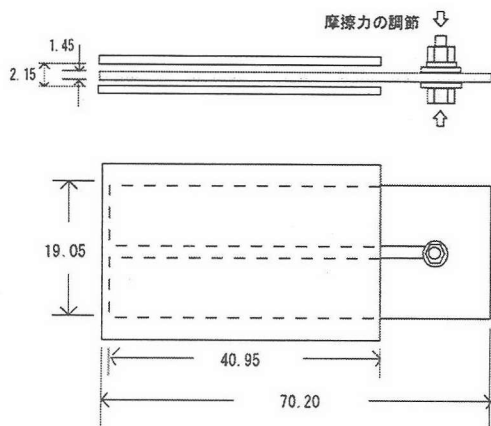
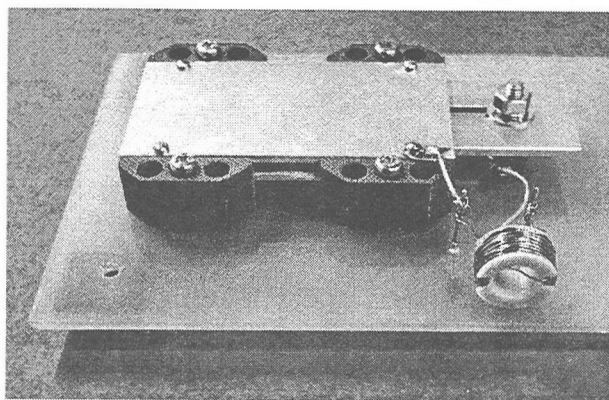


図-8 可変コンデンサによる実験システム



### (3) 実験の評価

図-9 中の理論値は(2)式に基づいて算出されたが、測定値と良く一致することがわかる。この実験の場合も変位量の測定はノギスで行っており、また、コンデンサに若干ガタがあるために、対極距離が変動することもある、多少のばらつきが生じている。しかしながら、ディップメータによる計測が容易に可能で、その精度も高いことが判明した。無線の計測システムが十分実用的であると評価される。

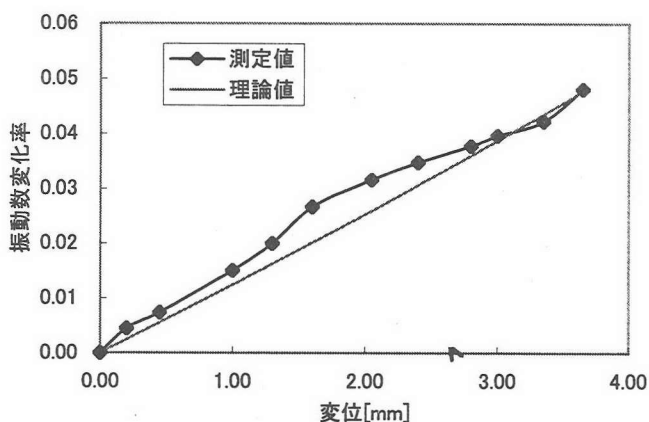


図-9 共振振動数と長さ変化の関係

図-8 に示すように、可変コンデンサを3枚のアルミ板で構成し、真ん中のアルミ板が右に抜け出し可能としてある。固定されたアルミ板および真ん中のアルミ板に導線を接続し、その両端をあらかじめ固定されたインダクタンスを持つコイルと接続することによって、LC回路を構成した。このシステムでは、細線を接続しての弾性座屈の評価は含まず、ディップメータでのキャパシタンス計測可能性の評価に限定した。

共振振動数はディップメータのアンテナをコイルに近づけて、発振振動数を変動させることによって計測した。ディップメータはその発振振動数がデジタルで表示されるものを使用した。キャパシタンスはディップメータ以外にテスターによっても計測を行っている。

### (2) 実験結果

図-9 にコンデンサを構成するアルミ板の変位量とディップメータで計測した共振振動数の変化率を示した。ディップメータによる共振振動数の特定は容易であり、その精度も高い。一方、テスターによるキャパシタンスの計測では、この範囲の微小変化をとらえることは困難であった。

## 5. まとめ

単純な構造で、常時計測の不要な最大歪記憶センサを提案した。記憶機構は一方向にのみ完全塑性の特性を持つことによって可能であるが、その特性は細線を使った弾性座屈の仕組みで実現した。

最大歪の計測には抵抗、キャパシタンス、インダクタンス等の変化を利用できる。抵抗の変化を利用した場合には弾性変形によって生ずる断面変化と抵抗変化の関係に留意した設計が必要であるが、ごく単純な構造のセンサが実現可能である。キャパシタンスあるいはインダクタンスを変化させるセンサの場合には、LC回路を構成することによって、非接触でディップメータによって共振振動数を測定することによって、最大歪の検出が可能であることが示された。その測定は容易で精度の高いものである。

最大歪記憶センサは安価で耐久性のあるセンサであり、ヘルスマonitoringの適用範囲を大幅に拡大するものと期待される。

### 参考文献

- 1) 武藤範雄、柳田博明、宮山勝、中辻照幸、杉田稔、大塚靖：CFGRP 複合材料の電気抵抗による破壊予知、日本複合材料学会誌、第18巻、4号、pp144-150、1992
- 2) Westermo, B.D. and L. Thompson, "Smart Structural Monitoring: A New Technology," Int'l Journal of Sensors, 15-18, November, 1994.
- 3) 奥原芳樹、山田達也、松原秀彰、柳田博明：導電相を含むFRPの電気的特性と損傷検知機能、第2回「知的材料・構造システム」シンポジウム講演集、pp59-62、2000