

構造物損傷診断のための RFID センサネットワークに関する研究

東京大学大学院工学系研究科 助教 白岩隆行

概要：

本研究の目的は、社会基盤構造物の安全監視を実現するために、疲労及び腐食をモニタリング可能な無線センサネットワークを構築することである。本研究では、最近の無線通信技術を応用することで、実際の現場で簡便に使用でき、経済的な疲労・腐食センシング技術の開発を行った。疲労及び腐食のセンシングには、申請者らがこれまでに開発を進めている疲労記憶スマートパッチと ACM 型腐食センサを利用して、無線式のセンサを製作した。また、多数のセンサタグから構成される RFID センサネットワークの構築を行った。さらに、ZigBee 等の低消費無線と 3G 等の広域無線通信網を組み合わせることで、グローバルな構造物診断ネットワークの構築を行った。

キーワード: 構造物ヘルスマニタリング、疲労センサ、き裂進展、ACM センサ、RFID

1. はじめに

構造物中に発生する疲労損傷を予測するためには、一般に応力状態の時間的推移を計測する必要がある。従来のはずみゲージを用いた方法では経済的な面から適用できる範囲に限られる。最近では、知的構造材料の研究が進められているが、新規の材料への置換には莫大な資金が必要となる。構造物の長期モニタリングを広く普及させるためには、センサの低コスト化と導入時間の低減が必要である。そこで、申請者らは、これまでに疲労記憶パッチを用いた構造物の疲労損傷評価について研究を進めてきた。これは、微結晶粒を有するセンサ材が再現性のよい疲労き裂進展挙動を示すことを利用したものであり、繰返し荷重の回数と応力振幅を推定できる¹⁾。無電源で配線なしに設置できるメリットがあるが、現場でのデータ取り出しにおいては、光学顕微鏡が必要であるなどの課題が残されている。

一方で、近年、RFID (Radio Frequency Identification) 技術を用いた IC タグや IC カードの普及が急速に進んでいる。建設分野においては、1990 年代後半から IC タグを地下埋設物の表示杭に用いる試みがあった。矢吹らは、建造物の施工過程や点検・補修履歴の管理に RFID タグを利用することを提案している²⁾。さらに 2006 年にはシンガポールのマイクロエレクトロニクス研究所 (IME) がアンテナを内蔵した小型の IC チップを発表した³⁾。今後構造物の維持管理に電子タグを活用する流れはますます

加速するものと予想される。また、RFID よりも長距離の通信が可能な手段として、ZigBee や Bluetooth に代表されるような低消費電力の無線通信技術や、次世代携帯電話方式 (4G) など、各種の新しい無線通信方式もまた広く普及が進んでいる。

以上の背景から、本研究では、構造診断のためのセンサ導入のコストを劇的に低減するために、建造物の維持管理に今後大いに使われていくことが予想される電子タグに着目した。申請者らがこれまでに開発してきた疲労記憶パッチの原理と IC タグの通信技術を応用して、構造材の疲労損傷度をモニタリング可能な「疲労センサタグ」の設計を行い、その計測精度を評価した。また、腐食環境下など多様な条件における寿命予測にも対応できるように、ACM 型腐食センサを利用して、腐食計測可能なセンサタグを開発した。さらに、多数のセンサタグから構成されるワイヤレスセンサネットワークの構築を行った。以上により、疲労センサタグによる基本的な計測手法の確立と、今後の構造物診断用タグの開発指針を立てることを本研究の目的とした。

2. 損傷記憶スマートパッチによる疲労評価

従来の疲労診断では、保全員による目視検査やはずみゲージを用いた応力頻度測定が行われてきた。しかし、目視検査では定量的評価が行えず、またはずみゲージ法では長期計測に多大な労力を必要とする。そこで我々は、疲労診断のための一つの手法として、損傷記憶スマート

パッチの研究開発を行っている。これは予き裂を導入した小型の試験片(センサ)を一定期間対象物に貼り付け、その間にセンサに進展する疲労き裂長さから、対象物の受けた繰返し回数を推定するものである (Fig. 1)。これまでに、構造材の疲労負荷回数と応力振幅を計測できること、そして疲労余寿命の評価が行えることが示されてきた。しかしながら、センサのき裂進展では腐食環境の影響を受けることがわかっており、実用化にあたって、腐食を避けるようにカバー等を設ける必要がある。また、疲労センサは予き裂入りの薄板であるため、非常に破損しやすく現場で扱いにくいという問題がある。したがって、検査員が扱いやすい安定な形にパッケージングすることが望まれる。

そこで本研究では、Fig. 1 (a) に示すような形で、センサ試験片の腐食を防ぐためのアクリル製カバーと、センサの破損を防止するためのステンレス製基板を加えた。カバーの拘束によって、構造材からのひずみ伝播が変化する影響を最小限にするため、カバーはシリコン系の弾性接着剤で取り付けた。センサ試験片はステンレス基板にスポット溶接することで、外から力を受けても容易に破損しないようにした。使用する際は、ステンレス基板にエポキシ系の構造用接着剤を塗布して、それを構造物に貼り付けて使用する。作製したスマートパッチの特性を確認するため、板厚 2 mm のSK5 材に貼り付けて疲労試験を行った。その結果、接着材が変形するために、構造材とセンサ間のひずみ伝播は、直接スポット溶接するときよりも小さくなることがわかった。そのひずみ伝播率は、およそ 83% であり、その効果を考慮することで応力振幅の推定が従来通り可能であることが示された。

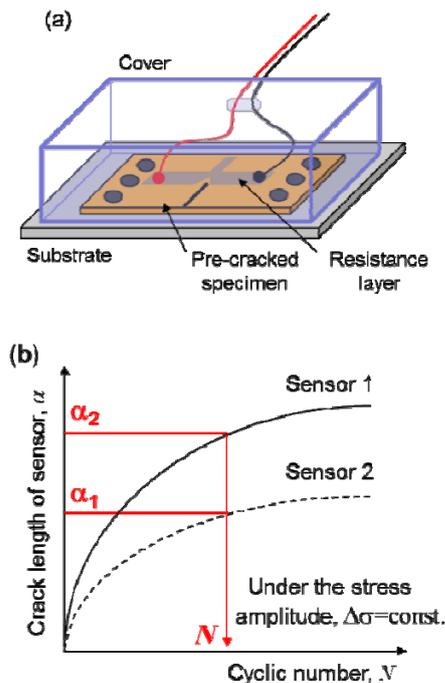


Fig. 1 (a) 損傷記憶スマートパッチの構成, (b) 疲労負荷回数の推定原理

3. ACM 型腐食センサによる環境モニタリング

これまで ACM センサのデータ計測には多チャンネルの比較的大きな計測装置が使用されてきた。センサネットワークに適用するためには、チャンネル数が少なくても小型な計測装置が求められる。一方で最近、広いダイナミックレンジを持つ対数アンプ (ログアンプ、対数増幅器) が容易に入手できるようになってきている。そこで本節では、対数アンプを組み込むことで計測レンジの切り替えが不要な電流測定回路を試作し、小型の ACM センサ用計測装置を開発することを目的とした。作製した計測装置と計測システム一式の外観を Fig. 2(a) に示す。計測装置は対数アンプとマイコン、データロガー用 IC、マイクロ SD カードから構成される。ACM センサの電流は、対数アンプによって電圧に変換され、さらに AD 変換した後に、マイクロ SD カードに結果が収録される。対数アンプには ACM センサの出力電流がおおよそ 100 pA から 10 mA の範囲で変化することを考慮して、Analog Devices 社の AD8304 LOG コンバータを用いた。これはフォトダイオード向けに開発された対数変換 IC であるが、100 pA から 10 mA までの電流値を 10 mV/dB のスケールで電圧値に変換でき、また消費電流も約 4.5 mA と比較的低いので、今回の用途に適している。マイコンには Microchip Technology 社の PIC12F675 を用いた。これはピン数が 8 本しかなく、機能が制限されているが、低消費電力であり、スリープ機能とウォッチドッグタイマー機能を併用することで、周期的にシステム全体の On / Off を制御できる。さらに Atmel 社の AVR マイコンのひとつである ATmega48A を内蔵した OpenLog DEV-09530 (SparkFun 社) を用いて、計測データをマイクロ SD カードに収録できるようにした。本計測装置の計測範囲は 0.1 nA ~ 10 mA である。電流分解能は、対数アンプの出力する最大 1.4 V の電圧に対して 2.0 V の基準電圧を用いて 10 bit で AD 変換するため、となる。これは、例えば 1 A から 10 A までを対数スケールで 100 分割することに対応する。サンプリング周期は任意に設定可能であるが、従来品のサンプリング周期を参考にして、デフォルトでは 10 秒 (0.1 Hz) とした。計測結果はマイクロ SD カードにテキストファイルの形式で収録される。1 回の計測データが 4 Byte で最大 16 GB まで記録できるため、サンプリング周期 10 秒の場合、およそ 1 年半のデータが収録可能である。また、チャンネル数は 1 チャンネルに限られるが、製作費用が安価で小型なため、センサ 1 個につき計測装置を 1 個用意すればよい。電源は 3 V から 5 V の範囲であれば正常動作することを確認した。外形寸法は 50 × 65 × 45 mm であり、大幅に小型化することに成功した。

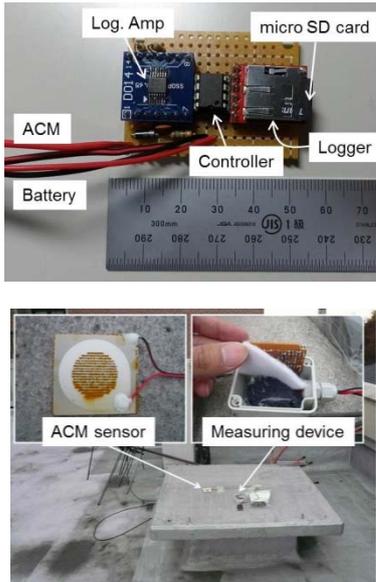


Fig. 2 (a) 試作した ACM センサ用小型計測装置, (b) 暴露試験

4. ワイヤレスセンサネットワークの構築

ワイヤレスネットワークの構築には、低消費電力の無線通信技術である ZigBee を利用した。実際に作製した無線センサを Fig. 3 (a)・(b)に示す。これらの無線機はリアルタイムクロック IC によって時刻制御されており、待機時の消費電力はマイクロアンペアのオーダーである。無線スマートパッチの場合、1 回の計測・無線送信当たり 47.5 mW・s の電力量を消費する。したがって、10 分に 1 回の計測を行う場合には、単 3 電池相当のバッテリーで、数年にわたって連続監視が可能である。さらに、ZigBee 等の近距離無線で構築されたワイヤレスセンサネットワークを遠隔地から制御・監視するために、3G 等の電話通信網を利用することを考えた。スマートパッチと ACM センサから構成される ZigBee ネットワークの計測データを、3G 通信網を通じて遠隔地にあるデータステーションに送信するための 3G 中継器を試作した。Fig. 3 (c) に示す。

本センサネットワークの適用例として、実橋梁に腐食環境モニタリングのためのワイヤレスセンサネットワークを適用した場合を示す。センサの設置状況を Fig. 3(d) に示す。また、センサネットワークの構成を Fig. 4 に示す。このシステムでは 3G 中継器により、計測データは携帯電話網を通じてサーバにアップロードされる。以上のようにして、インターネット経由による腐食の遠隔モニタリングシステムの構築を行い、さらに実地試験に適用し有効性を示すことができた。従来の構造物ヘルスマニタリング (SHM) では高いサンプリングレートでひずみ・振動等の連続的計測を行うため、多大なコストがかかり、計測可能な期間が短いことや既存の構造物への

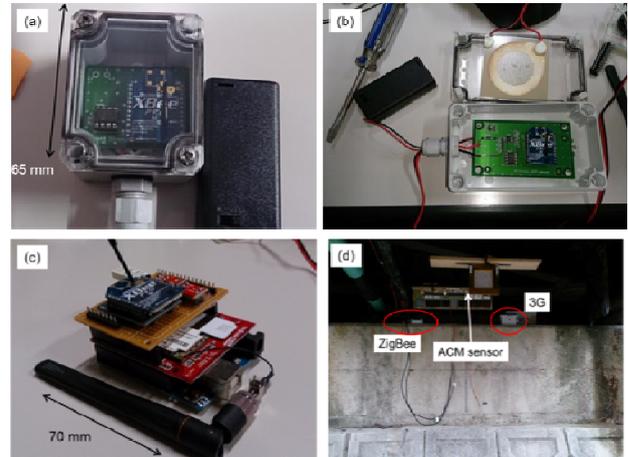


Fig. 3 (a)無線スマートパッチ, (b)無線 ACM センサ, (c) 温・湿度センサ付き 3G 中継器, (d) 橋梁裏への設置

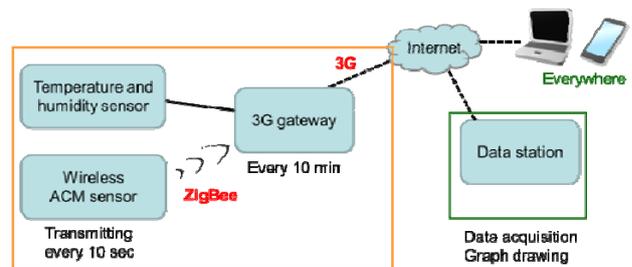


Fig. 4 疲労・腐食環境モニタリングのためのワイヤレスセンサネットワークの構成

5. まとめ

本研究では、最近の無線通信技術を応用することで、実際の現場で簡便に使用でき、経済的な疲労・腐食センシング技術の開発を行った。疲労及び腐食のセンシングには、申請者らがこれまでに開発を進めている疲労記憶スマートパッチと ACM 型腐食センサを応用して、無線式のセンサを製作した。また、多数のセンサから構成されるワイヤレスセンサネットワークの構築を行い、グローバルな構造物診断手法の可能性を検討した。得られた結論を以下に示す。

- (1) 損傷記憶スマートパッチについて、センサの腐食防止用のカバーとステンレス基板を加えた新しいパッケージングを提案した。これにより、現場でのセンサの扱いが容易になると期待できる。
- (2) ACM センサの出力電流を測定するための計測装置を作製した。これは対数アンプを利用しているので計測レンジの切り替えが不要であり、従来の計測装置よりも小型である。
- (3) 無線式スマートパッチ、無線式 ACM センサについ

て開発を進めた。また、3G 中継器を作製し、センサネットワークシステムに接続することを可能にした。さらに、インターネット経由による疲労・腐食の遠隔モニタリングシステムの構築を行った。

- (4) 本研究で提案した方法では配線も必要なく、簡単に設置できるので、鋼橋や船舶以外の様々な構造物にも応用可能である。ここで得られた結果を利用することにより、幅広い構造物の疲労と腐食をモニタリ

ングできると考えられる。

参考文献

- 1) T. Shiraiwa et al., ISIJ International, 51 (2011) 250-255.
- 2) N. Yabuki et al., Proc. of the 3rd Civil Engineering Conference in the Asian Region, (2004) 397-400.
- 3) W. G. Yeoh et al., Proc. of Radio Frequency Integrated Circuits (RFIC) Symposium, (2006).