

平成 29 年 6 月 19 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K14157

研究課題名(和文)電子タグ破壊の応用によるグローバル損傷モニタリング

研究課題名(英文)Global damage monitoring by IC tag destruction

研究代表者

白岩 隆行 (SHIRAIWA, TAKAYUKI)

東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・助教

研究者番号：10711153

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：損傷記憶センサとして、ポリイミド基板に無電解めっきニッケル薄膜を形成したものを提案した。このセンサは構造材に接着剤で貼り付けることで使用し、繰返し荷重を受けた際に、ニッケル薄膜の電気抵抗値が再現よく変化することを利用したものである。また長期の無線モニタリングのために、電源不要のRFID技術や、低消費電力で無線ネットワークを構築可能なZigBeeを利用して、小型の無線計測機器を製作した。さらに、3G/LTE通信網に接続することで、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・監視するシステムを構築した。

研究成果の概要(英文)：A thin nickel film was formed on a polyimide substrate by electroless nickel plating. The Ni film was used as a fatigue sensor. For long-term wireless monitoring, wireless sensor networks were developed by using RFID technology without power supply and ZigBee capable of constructing wireless network with low power consumption. Furthermore, by connecting to the 3G / LTE communication network, we have constructed a system that controls and monitors wireless sensor networks from remote locations.

研究分野：材料工学

キーワード：疲労 構造物ヘルスマニタリング センサネットワーク RFID 疲労き裂進展 Paris則

1. 研究開始当初の背景

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観点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。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。さらに近年ではアンテナを内蔵したマイクロスケールの IC チップが実現されている。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。

2. 研究の目的

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。点検・補修など履歴管理に使用される電子タグに、疲労劣化を記憶するセンシング要素を組み込むことで、より高度な建造物の維持管理が可能になると考えられる。さらには、低消費電力の無線通信技術を組み合わせることで、構造物全体の健全性を診断するための、グローバルな損傷モニタリングへと展開していくことを試みる。

3. 研究の方法

これまでに開発が進んでいる疲労記憶スマートパッチの原理と 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。作製した疲労センサタグを、一定振幅繰返し荷重を受ける鋼製の試験片に貼り付け、応力振幅と繰返し回数の無線計測を行い、その計測精度を評価した。またデータの取り出しにおいては、約 5 m 以上離れたところから無線リーダーをかざすだけで、対象材の余寿命が直ちにわかるような評価システムを構築した。さらに多数のセンサタグから構成される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た。

4. 研究成果

損傷記憶センサとして、ポリイミド基板 (厚さ 35 μm 、幅 5 mm、長さ 40 mm) に無

電解めっきニッケル薄膜 (膜厚 1 μm) を形成したものを提案した。このセンサは鋼床版等に接着剤で貼り付けることで使用し、繰返し荷重を受けた際に、ニッケル薄膜の電気抵抗値が再現よく変化することを利用したものである。センサ特性を評価するために、センサに対して最大荷重 15, 20, 30 N、応力比 0.5 として疲労試験を行った。疲労試験の結果、最大荷重が 15 N ではき裂は発生しなかったが、20 N と 30 N では発生した。き裂は荷重方向に垂直に発生し、金属膜厚が大きいほど、き裂密度が小さくなることがわかった。また、き裂間隔は、膜厚の増加に伴い大きくなった。更に、電気抵抗値は荷重の増加に伴い、増大することを確認した。このことから、電気抵抗値変化には、膜の断面積変化やき裂の有無だけでなく、疲労によって生じるき裂密度の差や、き裂形状の違いなどの要因が存在すると考えられる。これらの傾向についてモデルを作成し、評価することで、電気特性の測定による構造物の疲労センシングにつながる可能性が示された。

また疲労モニタリングのためには、バッテリーの交換無しに長期間使用することや、多数設置することが必要なので、低消費電力で低コストであることが必要である。一方で、一度の測定で通信するデータ量は小さく、測定頻度も低いため、高速なデータ通信は必ずしも必要ではない。そこで本研究では、電源不要の RFID 技術や、低消費電力で無線ネットワークを構築可能な ZigBee の利用を検討した。実際に作製した無線センサを図 1 (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 \cdot 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、3G/LTE 通信網に接続することで、上記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・監視することを検討した。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。図 1(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図 1 (d)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疲労損傷の遠隔モニタリングの可能性を示すことができた。

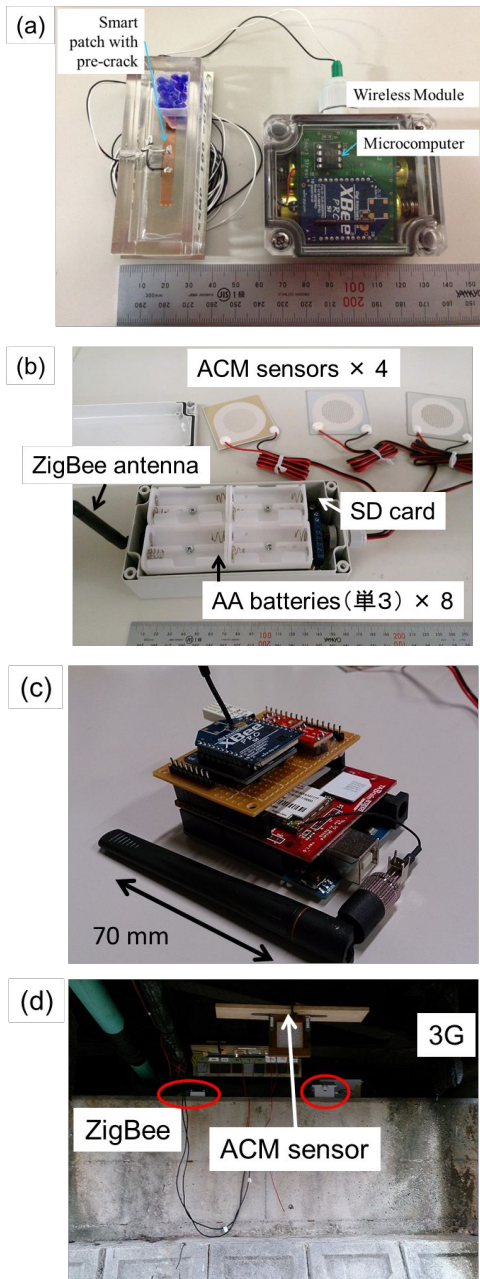


図1 (a) 無線式損傷記憶センサ (b) 無線式 ACM 型腐食センサ, (c) 温・湿度センサ付き 3G 中継器, (d) 橋梁裏への設置例

これまでに構造物の健全性を監視する方法としては、ひずみゲージや光ファイバセンサを用いた応力頻度測定が多く行われてきたが、これらの敷設には莫大な資金が必要となるため、適用できる範囲は限られる。例えば、香港の青馬大橋への構造ヘルスマニタリングの導入コストは1センサ当たり \$27,000 以上であることが報告されている。本研究で使用する RFID タグは、一個あたりの価格が \$1 以下であり、飛躍的なコストの低減が期待される。また RFID リーダーを構造物にかざすだけで、その寿命を直接予測できるという点も新しく、利便性に優れる。

本研究のように IC チップの破壊現象をセンサとして積極的に利用とする研究はほとんど例がない。森田らと Watters らは、それ

ぞれ RFID によりき裂の有無や温度検出を行う ON/OFF 型のセンサを提案している。これは一定以上のひずみや温度でタグのアンテナが断線することを利用したものであり、しきい値の検出には有効であるが、本研究で対象とするような時間依存型の劣化損傷を評価することはできない。本研究で開発したセンサタグは、タグ自身に疲労荷重の履歴を記憶させ、それを RFID タグによって無線で取り出すという革新的なアイデアに基づくものである。これにより無配線で簡単に設置でき、電源交換などのメンテナンスも不要であるという全く新しい特徴を有する疲労センシング手法の確立が期待される。

さらに、腐食やクリープといった他の材料劣化現象についても、同様に IC タグの破壊を応用することでモニタリングが可能になることが期待できる。これらの様々なセンシング機能を持つセンサタグを組み合わせることで、構造物の寿命を統合的に評価し、高精度かつ効率的な構造物の寿命管理を可能とすることができる可能性がある。このような手法は、経済性・利便性に優れており、急増するインフラの老朽化問題に対するひとつの解決手法となり得ると期待する。

橋梁等の鋼構造物は多数の溶接部を有しており、疲労損傷を正確にモニタリングするためには、多点計測がかかせない。従来のひずみゲージ法では、経済的側面から計測箇所に限界があった。本研究の疲労センサタグを用いれば、安価に多数のタグを設置でき、アンチコリジョン機能による一斉送受信によって広範囲の疲労センシングを簡便に行える。また足場の悪い現場であっても容易にデータ収集が可能である。したがって、従来の非破壊検査手法に代わる手段のひとつとして、非常に有望であると考えられる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 1 件)

1. 白岩隆行: "鋼床版の疲労モニタリングのための無線式損傷記憶センサの開発" 高速道路と自動車, Vol.59, No.9, pp. 30-31, 査読無, 2016.9.

〔学会発表〕(計 3 件)

1. 佐々木翼, 白岩隆行, 榎学: "低サイクル疲労評価用金属薄膜疲労センサの開発" 日本金属学会 2016 年春期 (第 157 回) 講演大会 (2016/03/23) 東京理科大学 (東京都葛飾区)
2. 佐々木翼, 白岩隆行, 榎学: "金属薄膜におけるき裂発生による電気特性変化を用いた疲労センサの検討" 日本金属学会 2015 年秋期 (第 156 回) 講演大会 (2015/09/16) 九州大学(福岡県・福岡市)
3. P. Chivavibul, T. Shiraiwa, T. Murakami and M. Enoki: "Sensor

Properties of Smart Stress-Memory
Patch fabricated from
Nano-Crystalline ED Ni" 日本金属学
会 2015 年秋期 (第 156 回) 講演大会
(2015/09/16) 九州大学 (福岡県福岡市)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

<http://rme.mm.t.u-tokyo.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

白岩 隆行 (Takayuki SHIRAIWA)
東京大学・大学院工学系研究科・助教
研究者番号：10711153