

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 9 日現在

機関番号：12601

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2013～2014

課題番号：25889014

研究課題名(和文)電子タグの破壊による革新的な構造物診断センサ

研究課題名(英文)Structural Health Monitoring Sensor Using RFID Tags

研究代表者

白岩 隆行(Shiraiwa, Takayuki)

東京大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：10711153

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では疲労損傷を記憶する新しい無線センサタグを提案した。基本的なセンサ原理としては、疲労損傷の累積に伴い電子タグのメモリ部分が順々に破壊されることにより、記録データが変化し、それをRFIDの技術で読み出すことで疲労損傷度を計測するものである。これにより無配線で簡便に設置でき、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を提案することができた。このような手法は、経済性・利便性に優れており、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。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。

研究成果の概要(英文)：We have proposed a new wireless sensor tags to evaluate the fatigue damage. The basic sensor principles is based on the fracture of RFID tags, and the garbled data. The fatigue damage parameters such as stress range and cyclic number of structures can be measured by reading the data in RFID tag wirelessly. These tags can be easily installed without wiring and batteries. Our approaches are excellent in economic efficiency and convenience, and it is very promising for one of an alternative to conventional non-destructive inspection technique. It expects to be capable of becoming one of the resolution approach to the aging problem of the infrastructure.

研究分野：信頼性材料工学

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

## 1. 研究開始当初の背景

橋梁等の構造物における信頼性確保は、安全安心な国民生活の基盤を構築するための重要な課題である。昨年の笹子トンネル崩落事故に代表されるように、我が国の構造物は近年急速に高経年化が進行しており、また検査作業に習熟した作業員も減少しているため、従来の定期検査のみでは安全の確保が難しい状況になりつつある。したがって、既存の構造物に対応できる非常に経済的な劣化診断・寿命管理技術が必要とされている。

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。従来のひずみゲージを用いた方法では経済的側面から限界があった。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ため、適用できる範囲は限られる。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。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。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。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。

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。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合わせることができれば、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。

## 2. 研究の目的

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、疲労損傷を記憶する新しい無線センサタグを提案することである。基本的なセンサ原理としては、疲労損傷の累積に伴い電子タグのメモリ部分が順々に破壊されることにより、記録データが変化し、

それを RFID の技術で読み出すことで疲労損傷度を計測するものである。これまでに様々な疲労監視技術が提案されているが、新規の計測システムへの置換には莫大な予算が必要となるため、適用できる範囲が限られる。そこで本研究では、最近の無線タグ技術を応用することで、実際の現場で簡便に使用でき、非常に経済的な疲労センシング技術の構築を目指す。具体的には、(1)疲労センサタグの設計、(2)疲労記憶特性の評価、(3)構造物への適用と寿命予測を行う。構造物へ適用においては、鋼製の材料を対象として、最大応力 (~300MPa) と繰返し回数 (~10<sup>8</sup>) の疲労荷重を受ける際の寿命予測を行う。さらに、多数のタグを用いた RFID センサネットワークの構築を目指す。

## 3. 研究の方法

まず、疲労センサタグによる基本的な計測手法を確立するために、タグの構成や形状、基板に用いる材料について検討し、センサタグ単体に疲労荷重を与えることで、考案した原理に基づき疲労損傷の検出が可能であるか検討する。次に損傷記憶の特性を評価するために、疲労荷重と不揮発性メモリにおけるデータ損失の関係を実験的に調べ、その結果を破壊力学的側面から考察する。具体的には疲労き裂進展におけるパリス則や、ひずみと応力状態 (応力多軸度) に依存する破壊のクライテリアを利用することを検討している。さらに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する。また得られた計測結果を、構造物の疲労特性 (S-N 曲線) に適用することで余寿命推定を行い、実際の破断回数と比較することで、その推定精度を検討する。RFID タグのデータの取り出しには、長距離通信が期待できる UHF 帯の RFID リーダーを利用する。さらに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目指す。

## 4. 研究成果

### (1) 疲労センサタグの設計・作製

まず、疲労センサタグの設計及び作製を行った。このセンサタグの目的は構造物の繰返し回数と応力振幅を推定すること、そしてそれらの推定した値と対象物の応力振幅と破断繰返し回数の関係から対象物の疲労損傷度を見積もることである。メリットとして配線が必要ないこと、無線通信可能なこと、低頻度の計測で疲労評価可能であることが挙げられる。疲労記憶センサタグは、予き裂入りの不揮発性メモリと制御用の IC、アンテナ、耐候性カバーから構成される (図 1)。揮発性メモリの基板としては、一般に使用される半導体基板では安定したき裂成長が期待できないため、微細な結晶粒を有する金属 (電着銅等) を使用した。

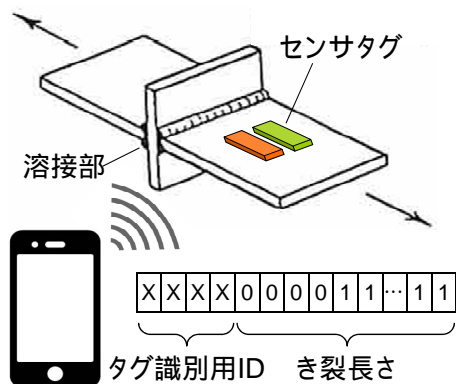


図1 疲労センサタグの適用イメージ

(2) RFID センサネットワークの構築

図2に示すように、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。パッシブ型電子タグでは通信距離が十分とれなかったため、省電力近距離無線規格の ZigBee を用いて、ネットワークを構築した。さらに、ZigBee と 3G のネットワークをつなぐゲートウェイを作成し、インターネットに接続することで遠隔地モニタリングを可能とする監視システムを構築した。

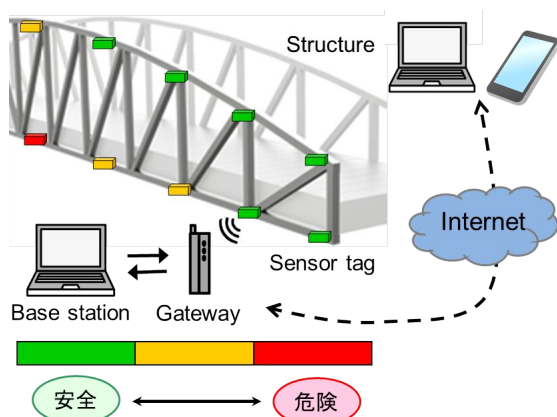


図2 疲労センサタグによるワイヤレスセンサネットワーク

これまでに構造物の健全性を監視する手法としては、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。本研究で使用する RFID タグは、一個あたりの価格が 100 円以下であり、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。このように 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 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。本研究で計画しているセンサタグは、タグのメモリ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。このような手法は、経済性・利便性に優れており、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。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。

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 2 件)

1. Fang Yuan, T. Shiraiwa and M. Enoki: "Effects of Fabrication Method, Shape, Strain and Temperature on Conductive Properties of Smart Stress-Memory Patch", Materials Transactions, Vol. 55, No. 9 (2014), 1464-1470.
2. T. Shiraiwa and M. Enoki: "Effect of specimen shape on fatigue behavior in thin pure copper sheet for smart stress-memory patch", ISIJ international, Vol. 54, No. 10 (2014), 2342-2348.

[学会発表](計 16 件)

1. ○T. Shiraiwa, T. Murakami and M. Enoki: "Development of sensor network for structural health monitoring" KRIS-University of Tokyo Joint Workshop on Structural Health Monitoring, Daejeon, Korea, 2015 年 3 月
2. ○T. Murakami, T. Shiraiwa and M. Enoki: "Evaluation of properties of smart stress memory patch under real loading environment" KRIS-University of Tokyo Joint Workshop on Structural Health Monitoring, Daejeon, Korea, 2015 年 3 月
3. ○榎学, 白岩隆行, 村上岳央: "疲労・腐食ワイヤレスセンサネットワークの高度化とその設備診断への応用" 日本鉄

- 鋼協会 2014 年春期講演大会、東京、2015 年 3 月
4. ○白岩隆行, 村上岳央, 榎学: "方向変動荷重を受ける損傷記憶スマートパッチの疲労き裂進展挙動" 日本金属学会 2015 年春期講演大会、東京、2015 年 3 月
  5. ○村上岳央, 白岩隆行, 榎学: "損傷記憶スマートパッチのき裂進展挙動における応力頻度分布の影響" 日本金属学会 2015 年春期講演大会、東京、2015 年 3 月
  6. ○佐々木翼, 白岩隆行, 榎学: "疲労荷重を受ける金属薄膜のき裂発生挙動と疲労センサへの応用" 日本金属学会 2015 年春期講演大会、東京、2015 年 3 月
  7. ○T. Murakami, T. Shiraiwa and M. Enoki: "Evaluation of fatigue life under variable loading conditions by smart stress memory patch" the 3rd Japan-China Joint Symposium on Fatigue of Engineering Materials and Structures, Takayama, Gifu, 2014 年 11 月
  8. ○T. Shiraiwa, T. Murakami and M. Enoki: "Design and fabrication of smart stress-memory patch with high-sensitivity to fatigue loading" the 3rd Japan-China Joint Symposium on Fatigue of Engineering Materials and Structures, Takayama, Gifu, 2014 年 11 月
  9. ○白岩隆行, 村上岳央, 榎学: "応力記憶スマートパッチの応力振幅検出限界の向上" 日本鉄鋼協会2014年秋期講演大会、名古屋、2014年9月
  10. ○村上岳央, 白岩隆行, 榎学: "応力記憶スマートパッチを用いた過荷重を含む荷重履歴の評価" 日本鉄鋼協会2014年秋期講演大会、名古屋、2014年9月
  11. ○榎学, 白岩隆行, 原芳, 村上岳央: "構造ヘルスマニタリングのための応力記憶スマートパッチの設計および精度向上" 日本材料強度学会平成 25 年度総会学術講演会、東京、2014 年 6 月
  12. ○T. Shiraiwa and M. Enoki: "Fatigue and corrosion monitoring by wireless and Internet communications" the Fifth US-Japan NDT Symposium, Maui, Hawaii, 2014 年 6 月
  13. ○榎学, 白岩隆行: "設備診断のための疲労・腐食ワイヤレスセンサネットワーク" 日本鉄鋼協会 2014 年春期講演大会、東京、2014 年 3 月
  14. ○白岩隆行, 原芳, 村上岳央, 榎学: "応力記憶スマートパッチの最適設計と測定精度" 日本鉄鋼協会 2014 年春期講演大会、東京、2014 年 3 月
  15. ○F. Yuan, T. Shiraiwa and M. Enoki: "Improvement of simultaneous measurement of fatigue and corrosion by smart patch and ACM sensor" 日本金属学会2014年春期(第154回)講演大会、東京、2014年3月
  16. ○村上岳央, 白岩隆行, 榎学, 古屋勇樹, 石井夏美, 小幡義彦: "荷重方向による損傷記憶スマートパッチのき裂進展特性変化" 日本金属学会 2014 年春期(第 154 回)講演大会、東京、2014 年 3 月
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