

平成 26 年 6 月 10 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24656403

研究課題名(和文)大型構造物の劣化損傷度評価のためのワイヤレスセンサネットワーク

研究課題名(英文)Wireless sensor network for evaluation of damage in large structures

研究代表者

榎学(ENOKI, Manabu)

東京大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：70201960

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円、(間接経費) 960,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、構造ヘルスマonitoringのためのワイヤレスセンサネットワークの構築を目的に、まず、各センサの小型・無線化を目指した。損傷記憶スマートパッチについては、耐環境性と現場での扱いやすさを考慮して、センサ形状やパッケージの変更を行った。また、ACM型腐食センサについては、より小型で低消費電力の計測装置を開発した。次に、近距離無線通信規格を利用して、各センサを互いに無線で接続することで、疲労と腐食の同時監視が可能なワイヤレスセンサネットワークの構築を行った。

研究成果の概要(英文)：The objective of this research is to establish the wireless sensor network and develop the small and wireless sensors for structural health monitoring. Sensor shape and package of damage memory smart patch were modified to improve the environmental resistance and handling in fields. Small and low-power type measurement equipment was developed for ACM corrosion sensor. Wireless sensor network for simultaneous fatigue and corrosion monitoring system was established using the standard of a short distance wireless network and the wireless connections between sensors.

研究分野：構造・機能材料

科研費の分科・細目：インテリジェント・安全・安心材料

キーワード：インテリジェント材料 安心・安全材料 構造ヘルスマonitoring 疲労損傷センサ 腐食損傷センサ

1. 研究開始当初の背景

材料・構造物の信頼性確保は、様々な意味での国民生活の安全性を保障するための重要な課題である。材料工学的な研究としては、従来 2 つの方向からのアプローチがあった。1 つは材料特性を向上させた材料を開発し、予測される力学的環境に耐えられる構造物を作製することであった。もう 1 つは定期的に非破壊検査を行い、損傷が発見された場合にスクリーニングあるいは補修を行うものである。構造物中に発生する疲労損傷を予測するためには、応力状態の時間的推移を計測する必要があるが、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。そこで本研究では、構造物に発生する応力とその繰返し回数を簡便に測定するための疲労損傷記憶センサを開発し、この簡便かつ低コストな手法を広く普及させることにより、橋梁などの大型構造物の予寿命評価を可能にしてより安心安全社会の実現を目指す。

今までの概念を用いた構造材料の開発は成熟を迎えており、真の意味でのブレークスルーをもたらすような材料の開発は必ずしも容易ではない。また、我々は社会として十分なインフラストラクチャーを有しており、経済状況あるいは財政状況の悪化に伴い、新規の材料開発よりは既存の構造物の保守の方が重要な課題となりつつある。一方、最近研究が進められている知的構造材料システムにおいても、新規の材料への置換には莫大な資金が必要となるという問題がある。したがって、現在求められているのは、現状のインフラストラクチャーに対応できる非常に経済的な、信頼性確保技術であると考えられる。本研究で対象としているワイヤレス疲労損傷スマートパッチは、このような目的にかなうものである。

本研究では、経済性を十分考慮して既存構造物の安全性を確保するためには、従来の非破壊評価手法にこだわらないで、有効な手法を探索する必要があると考える。そこで、そのためのひとつの手法として本研究で開発を計画している、疲労損傷記憶センサは有効であると思われる。また、これまでの研究で得られた知見は、本研究のワイヤレス疲労損傷スマートパッチの開発において、十分活用されるものと考えられる。

2. 研究の目的

本研究では、上記のワイヤレスセンサネットワークの構築を目的に、まず、各センサの小型・無線化を目指す。損傷記憶スマートパッチについては、耐環境性と現場での扱いやすさを考慮して、センサ形状やパッケージの変更を行う。また、ACM 型腐食センサについては、より小型で低消費電力の計測装置を開発する。次に、ZigBee 等の近距離無線通信規格を利用して、各センサを互いに無線で接続することで、疲労と腐食の同時監視が可能なワイヤレスセンサネットワークの構築を

行う。さらに、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る。以上により、鉄鋼製造プロセスにおける設備診断のための新しいワイヤレスセンサネットワークを提案することを旨とする。

3. 研究の方法

(1) 損傷記憶スマートパッチ

従来の疲労診断では、保全員による目視検査やひ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、またひ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。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。

(2) ACM 型腐食センサ

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、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。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 と対数アンプとしては低いので、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。

(3) ワイヤレスセンサネットワーク

スマートパッチと ACM センサを利用することで、低頻度なサンプリングであっても疲労や腐食といった損傷劣化を評価できるセンサネットワークの構築を目的に開発を進めた。無線センサネットワークは多数のセンサから構成され、広範囲な情報を収集することができる。無線通信規格は様々あるが、通信速度、距離、消費電力、周波数帯域、コストなどが異なるため、用途に合わせて適切な規格を選ぶことが重要である。本研究では、導入や測定作業を容易にするため、低消費電力の無線通信技術である ZigBee を利用した。既に無線センサノードのプラットフォームがいくつか存在するが、これらは比較的高速な通信を目的としているため、スマートパッチのき裂長さを数日おきに送信するために使うにはオーバースペックであり、導入コストも高い。本ネットワークでは、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、測定頻度も低いいため、高速なデータ通信は必ずしも必要ではない。既製品のプラットフォームでは制御用マイコンに多ピンで大容量の ATmega シリーズ (Atmel 社) や PIC16F シリーズ (Microchip 社) を使用しているが、低機能で低消費電力のマイコン (ATtiny や PIC12F シリーズなど) により無線ノードを作製できれば、低頻度計測に適した性能を得られると考えられる。そこで本研究では、提案したセンサネットワークに最適な無線センサノードを自作することとした。

4. 研究成果

(1) 損傷記憶スマートパッチの開発

本研究では、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 2mm 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。今後、実際の橋梁に取り付け、大気暴露試験を行い、長期間使用した際の特性変化について評価した。

(2) ACM 型腐食センサ

本計測装置の計測範囲は 0.1nA ~ 10mA であった。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 100pA から 10 mA 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。

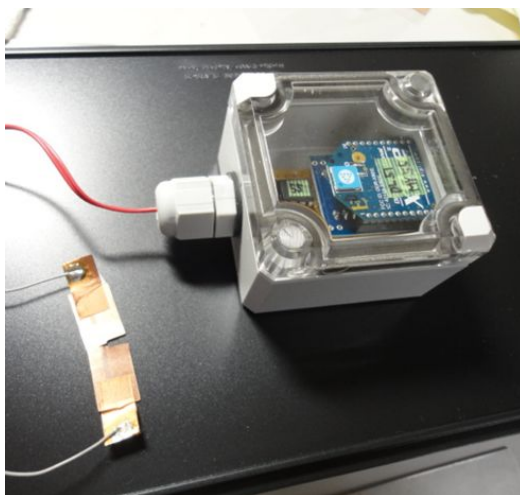


図1 無線スマートパッチ

(3) ワイヤレスセンサネットワーク

実際に作製した無線センサを図1および図2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



図2 無線 ACM センサ

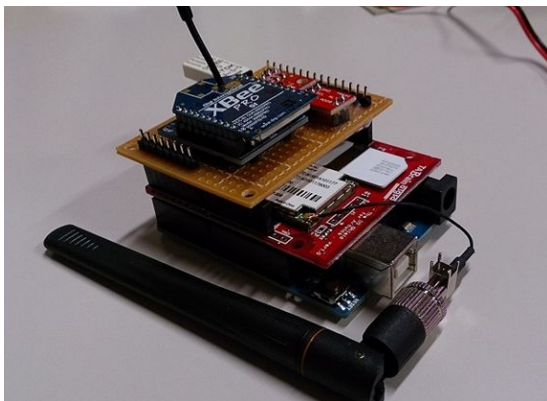


図3 3G 中継器

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。図3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。センサネットワークの構成を図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適用が容易でないことなどが問題であった。本研究では、スマートパッチやACMセンサ等を用いて、低頻度のサンプリングであっても構造物の劣化損傷を評価できるセンサネットワークを提案することができた。

(4) まとめ

・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。

・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。

・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。

・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。

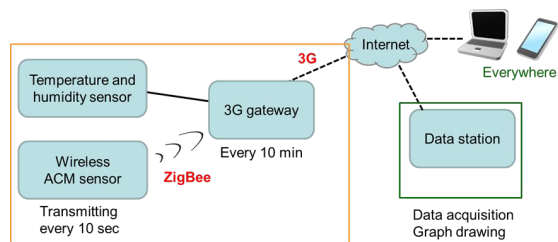


図4 ワイヤレスセンサネットワークの構成

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計2件)

T. Shiraiwa, M. Enoki, Effect of specimen shape on fatigue behavior in thin pure copper sheet for smart stress-memory patch, ISIJ International, 54, 2014, in press, 査読有

T. Shiraiwa, M. Enoki, Strain-Controlled Fatigue Behavior in Thin Pure Copper Sheet for Smart Stress-Memory Patch, Materials Transactions, 53, 2012, 690-695, 査読有 DOI:10.2320/matertrans.MBW201117

〔学会発表〕(計19件)

Fang Yuan, Takayuki Shiraiwa, Manabu 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, 2014年3月23日, 東京工業大学(東京都)

大橋成彰, 白岩隆行, 榎学, RFID タグを用いた 構造用接着剤の破壊検知, 日本金属学会2014年春期(第154回)講演大会, 2014年3月23日, 東京工業大学(東京都)

白岩 隆行, 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年春季(第167回)講演大会, 2014年3月23日, 東京工業大学(東京都)

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 年春季 (第 167 回) 講演大会, 2014 年 3 月 22 日, 東京工業大学 (東京都)
白岩 隆行, 榎 学, AE 法によるゴムコア通電ポールの圧縮破壊挙動の評価, 第 19 回 AE 総合コンファレンス, 2013 年 12 月 6 日, 関西大学 (大阪府)

Fang Yuan, Takayuki Shiraiwa, Manabu Enoki, Evaluation of the accuracy of the estimated crack length by the conductive film on the smart stress-memory patch, 日本金属学会 2013 年秋期 (第 153 回) 講演大会, 2013 年 9 月 19 日, 金沢大学 (石川県)

白岩 隆行, 榎 学, 篠原 正, 腐食疲労評価のためのセンシングシステムの検討, 日本金属学会 2013 年秋期 (第 153 回) 講演大会, 2013 年 9 月 19 日, 金沢大学 (石川県)

村上岳央, 白岩隆行, 榎学, 損傷記憶スマートパッチによる変動荷重の評価, 日本金属学会 2013 年秋期 (第 153 回) 講演大会, 2013 年 9 月 19 日, 金沢大学 (石川県)

Fang Yuan, Takayuki Shiraiwa, Manabu Enoki, Tadashi Shinohara, Development of a wireless sensor for simultaneous measurement of fatigue and corrosion, The 13th International Conference on Fracture, 2013 年 6 月 18 日, Beijing, China

Takayuki Shiraiwa, Manabu Enoki, Near-threshold Fatigue Crack Behavior of Thin Copper Sheet and its Application for Structural Health Monitoring, The 13th International Conference on Fracture, 2013 年 6 月 18 日, Beijing, China

M. Enoki, T. Shiraiwa, Advanced Industrial Security System Project, The 3rd Asia-Arab Sustainable Energy Forum & the 5th Int. Workshop on SSB, 2013 年 5 月 5 日, 弘前大学 (青森県)

榎学, 白岩隆行, ワイヤレスネットワークによるグローバル損傷評価, 第 56 回材料強度と破壊総合シンポジウム, 2013 年 4 月 10 日, 東京大学 (東京都)

榎学, 白岩隆行, 篠原正, 設備診断のための損傷記憶センサと ACM センサの高度化, 日本鉄鋼協会第 165 回春季講演大会, 2013 年 3 月 27 日, 東京電機大学

村上 岳央, 白岩 隆行, 榎 学, 損傷記憶スマートパッチの耐環境特性, 日本金属学会 2013 年春期大会, 2013 年 3 月 27 日, 東京理科大学

Fang Yuan, Manabu Enoki, Takayuki Shiraiwa, Evaluation of the accuracy of the estimated crack length by the conductive film on the smart stress-memory patch, 日本金属学会 2013 年春期大会, 2013 年 3 月 27 日, 東京理科大学

白岩 隆行, 原 芳, 榎 学, 電着銅薄板の下限界近傍疲労き裂進展挙動とスマートパッチへの応用, 日本金属学会 2013 年春期大会, 2013 年 3 月 27 日, 東京理科大学

Takayuki Shiraiwa, Yuan Fang, Manabu

Enoki, Tadashi Shinohara, Wireless sensor network for long-term monitoring of fatigue and corrosion, ASNT 22nd Research Symposium, 2013 年 3 月 18 日, The Peabody Memphis

白岩隆行, 原 芳, 榎 学, 篠原 正, 応力記憶スマートパッチと ACM センサによる疲労と腐食の同時計測, 日本鉄鋼協会第 164 回秋季講演大会, 2012 年 9 月 17 日, 愛媛大学

Takayuki Shiraiwa, Manabu Enoki, Development of Wireless Stress-memory Patch for Fatigue Damage Monitoring, NIMS Conference 2012, 2012 年 6 月 4 日, Epochal Tsukuba

6. 研究組織

(1) 研究代表者

榎 学 (ENOKI, Manabu)

東京大学・大学院工学系研究科・教授

研究者番号: 70201960