

平成 23 年 3 月 31 日現在

研究種目：若手研究 (B)  
 研究期間：2009 ～ 2010  
 課題番号：21760442  
 研究課題名 (和文) 建築物の快適性と安全性評価のための自律分散型建築モニタリングシステムの開発  
 研究課題名 (英文) Autonomous-Decentralized Monitoring System for Structural Health Monitoring and Environment Monitoring  
 研究代表者  
 仁田 佳宏 (NITTA YOSHIHIRO)  
 足利工業大学・工学部・准教授  
 研究者番号：10318834

## 研究成果の概要 (和文)：

本研究では、ほぼリアルタイムの自動的な損傷検知が可能となるマイコン搭載センサー端末を開発した。まず、開発したマイコン搭載センサー端末を用いた鉄骨構造物の柱-梁接合部に対する構造ヘルスマニタリングシステムを提案し、実大規模の鉄骨高層構造物試験体により、その有用性を確認した。次に、開発したマイコン搭載センサー端末と検査ロボットの協調による天井部材に関する安全確認のためのモニタリングシステムを提案し、実大天井試験体による有用性を確認している。最後に、開発したマイコン搭載センサー端末と検査ロボットの協調による環境モニタリングシステムを提案し、屋内計測により有用性を確認している。

## 研究成果の概要 (英文)：

The smart sensors for autonomous-decentralized monitoring system are developed in this research. At first, this research presents an autonomous-decentralized scheme of beam-to-column joint damage detection for buildings based upon developed sensor board with microcontroller. The effectiveness of the proposed system has been demonstrated by the full-scale building model experiments conducted at E-defense. Next, this research also presents the basic concept of a structural health monitoring scheme in cooperation with smart sensors and inspection robot. The validity of the proposed scheme is demonstrated by damage monitoring of the ceiling elements. Also, the environmental monitoring system utilizing the developed smart sensor and inspection robot is proposed. The effectiveness of this system is presented by monitoring illumination intensity and temperature in rooms.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
21 年度	500,000	150,000	650,000
22 年度	400,000	120,000	520,000
年度			
年度			
年度			
総計	900,000	270,000	1,170,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学（建築構造・材料）

キーワード：防災，スマートセンサ情報システム，モニタリング，構造工学・地震工学

### 1. 研究開始当初の背景

ここ10年ほどの間に、建築構造物の考え方が大きく変化し、「スマート化」をキーワードに、建築構造物自体が頭脳を持ち、周囲を取り巻く環境の変化に柔軟に対応できるスマート構造の研究および開発が進んできている。このような中で、半導体技術と情報技術の発達を背景としたマイコンを搭載したスマートセンサは、建築構造物のモニタリングおよび周囲の環境への適応が可能となることから、次世代の建築構造物を構成する重要な要素となりえる。しかし、既往のスマートセンサの多くは、地震などの非常時の構造ヘルスマニタリングのみを対象としているため、コスト的な面から居住者や建築主の理解を得られず、住宅も含めた幅広い建築構造物への普及には至っていない。そこで、より幅広い普及のために、地震時の構造ヘルスマニタリングのみではなく、日常時に必要とされる環境モニタリング機能をも組み込んだ統合的なスマートセンサによるモニタリングシステムの開発が必要とされている。

また、これまでのモニタリングシステムの多くは、中央情報集積システムであり、建築構造物全体の情報をただ一つのコンピュータに集積し、評価を行う方式を採用している。中央情報集積システムでは、一つでもセンサが故障すると、システムとして機能しなくなる可能性が高く、冗長性に欠ける問題がある。また、多量の情報を一度に扱う必要があり、迅速な評価や場所ごとの詳細な評価が行いにくい場合がある。さらに多くのセンサの配置による配線のコストや日常的なメンテナンスを考慮すると、中央情報集積システムは現実的ではない。これに対して、本研究で開発するマイコンを搭載したスマートセンサ端末によるモニタリングシステムは、分散配置されるセンサ端末ごとに判断して評価を行う自律分散型システムである。そのため、冗長性が高詳細かつ迅速な評価が可能となる。また、センサ端末ごとに評価を行えるため、階層ごともしくは部屋ごとの快適性評価や使用エネルギー評価およびフレームごともしくは部材ごとの損傷が検知可能となる。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、スマートセンサを用いた、日常時の環境モニタリングと非常時の構造ヘルスマニタリングを統合したスマートセンサによる自律分散型モニタリングシステムを開発し、その有効性を明らかにするとともに、このようなシステムに適したセンサ選択、快適性評価手法および安全性評価手法を確立することである。本研究で開発するスマートセンサによる自律分散型モニタリングシステムは、日常時および地震時などの非常時双方に対する機能を持つことから、建築物における重要な一機能を担うことが可能となる。そのため、モニタリングシステムの住宅までも含めた幅広い建築物への普及へとつながり、より高度な地震防災を意識した建築物および都市の構築に寄与する。よって本研究の成果は大地震における構造物の安全性の確保を目的とする構造制御学の発展に大きく寄与するものと考えられる。

本研究では、常時には住空間の環境を計測し、快適性に関する環境モニタリングを行い、地震などの非常時には建築構造物の安全性の判断に関する構造ヘルスマニタリングを行う、スマートセンサによる統合的なモニタリングシステムの開発を行う。

### 3. 研究の方法

本研究は、スマートモニタリングの普及を目的として、常時における生活空間の快適性のための環境モニタリングと、地震時における住空間の安全性のための構造モニタリングの両方を行う統合的な建築モニタリングシステムの確立を目的として、マイコンを搭載したスマートセンサによるモニタリングシステムおよびモニタリング手法を開発する。開発においては、「どのような状態量を計測し、それをどのように建築物の快適性と安全性にいかすか」という点に重点をおいて研究を行う。開発したセンサー端末を使用したモニタリングシステムとして、①柱-梁溶接部に対する安全性モニタリングシステム、②天井部材に対する検査ロボットと開発したセンサー端末の協調による安全性モニタリングシステム、③開発したセンサー端末と小型車両ロボットによる環境モニタリングシステムの3つを開発している。

#### 4. 研究成果

##### (1) マイコン搭載センサー端末の開発

マイコンのひとつである dsPIC を用いて Figure 1 に示すようなマイコンセンサー端末を開発している。使用した dsPIC33F シーリーズは、16bit のマイコンであり、18ch の A/D 入力と 2 個の 12bit の A/D 変換器を持っている。開発したマイコンセンサー端末は、アナログローパスフィルターとデジタルローパスフィルターを内蔵し、LAN によるデータの送受信と SD カードへのデータ保存が可能である。開発したセンサー端末の特徴として、次の 3 点があげられる。

- ① センサーおよび通信装置を含めて、1 台約 4 万円程度であり、従来の計測システムと比較して安価である。
- ② マイコンを搭載しており、ほぼリアルタイムの自動的な損傷検知が可能である。
- ③ センサー端末上のモニターに、損傷の有無を表示可能である。

##### (2) 柱-梁溶接部に対する構造ヘルスマニタリングシステム

開発したセンサー端末を用いて、柱-梁溶接部に対する構造ヘルスマニタリングシステムを提案し、Figure 2 に示すような高さ 80m 程度を想定した 21 層鉄骨高層建物の下層 4 層と上層部を 5 層程度ごとに縮約した実大規模の鉄骨構造試験体の現場溶接接合部となる 2 層部分の 4 隅の柱-梁接合部の短辺方向を対象として、実証実験を実施する。開発したマイコンセンサー端末に接続するセンサーとして、近接センサーとひずみゲージを用いている。ひずみゲージは、梁の塑性化しにくい接合部から離れた位置に Figure 4(a) に示すように貼付している。近接センサーは、Figure 4(b) に示すように反射板とセンサー間の距離を計測するため、梁に反射板を設置し、柱から支持部材を用いて近接センサーを設置する。

鉄骨高層構造物への入力地震波としては、初日に El Centro 波、気象庁波、東扇島波および三の丸波で加振し、2 日目に、東京都庁波および三の丸波で加振している。ただし、2 日目の三の丸波については、接合部に損傷が生じるまで、繰り返し入力することとする。接合部の損傷は、2 日目の三の丸波加振 5 回目に、Sensor 1 および Sensor 2 の設置位置で、亀裂が生じている。ただし、Sensor 3 は、三の丸波加振 3 回目以降に生じた鉄骨部材の表面剥落により、ハードウェアが損壊し、三の丸波加振 3 回目以降、モニタリングを行っていない。ひずみゲージと近接センサーの組合せによるマイコンセンサー端末 Sensor 1、Sensor 2、Sensor 3 および Sensor 4 による、柱-梁接合部の構造ヘルスマニタリング結果として、損傷が生じていない東扇島波と損傷が生

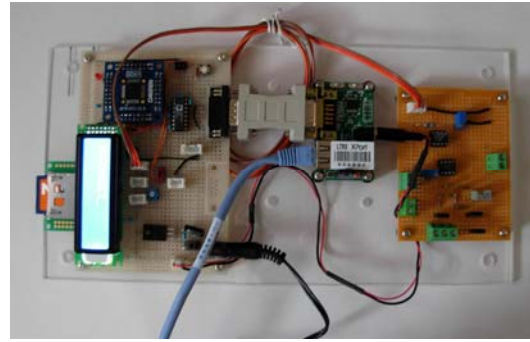


Figure 1 マイコンセンサー端末



Figure 2 鉄骨高層建物

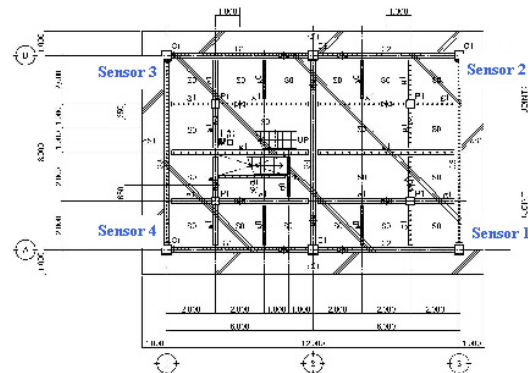


Figure 3 センサーの設置場所

じた三の丸波加振 5 回目を示す。Figure 5 に東扇島波のモニタリング結果を、Figure 6 に、三の丸波加振 5 回目のモニタリング結果を示す。ただし、前述したように三の丸波加振 5 回目については、マイコンセンサー端末 Sensor 3 は損壊したため、結果を示すことは出来ない。Figure 5 より、東扇島波においては、応力を示唆するひずみと回転角を示唆する変位の履歴がほぼ直線となっており、損傷が生じていないことが明らかに確認できる。東扇島波の加振実験終了後の目視検査



(a) ひずみゲージ



(b) 近接センサー

Figure 4 センサーの設置状況

によっても損傷が生じていないことを確認している。

Figure 6 より、三の丸波 5 回目においては、Sensor 1 および Sensor 2 のひずみと変位の履歴が大きなループを描いたのち、剛性の傾きが低下しており、塑性化したのち、損傷が発生している様子が確認できる。Sensor 4 については、履歴のループのみが見られ、剛性の低下は見られないため、塑性化はしているが、損傷は発生していないと考えられる。三の丸波加振 5 回目の加振実験終了後の目視検査より、Sensor 1 および Sensor 2 の設置位置において、亀裂が生じており、Sensor 4 の設置位置では損傷が生じていないことを確認している。Figure 7 における Sensor 1 および Sensor 2 の設置位置における溶接部の亀裂の様子を示す。

これらの結果により、ひずみゲージと近接センサーを用いて、マイコンセンサー端末により、簡便にかつ迅速に溶接接合部の損傷検知が行えることを確認している。

### (3) マイコン搭載ロボットを併用した天井部材モニタリング

マイコンセンサー端末とマイコン搭載検査ロボットの協調による天井部材の安全性モニタリングを提案している。提案する構造ヘルスモニタリング手法の有効性を確認する目的で実証実験を行う。実証実験は、広島県にある小学校体育館を模擬した実大規模の吊り天井試験体の加振実験を対象とする。吊

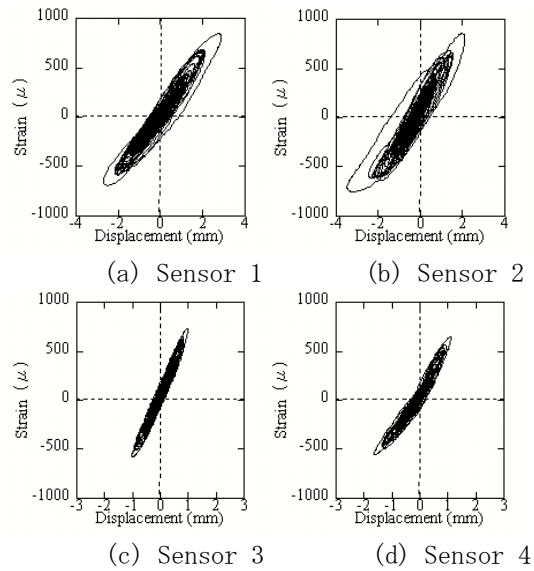
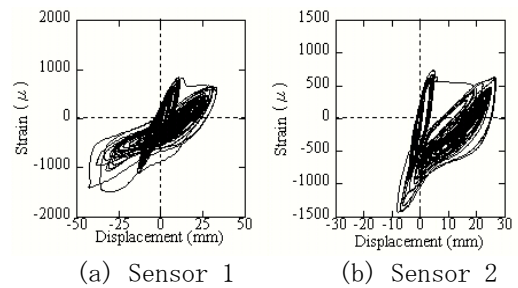
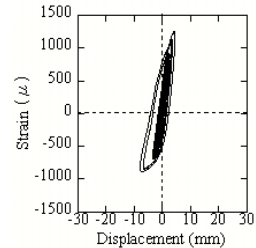


Figure 5 東扇島波



(a) Sensor 1 (b) Sensor 2



(c) Sensor 4

Figure 6 三の丸波 (5 回目)



(a) Sensor1



(b) Senso2

Figure 7 溶接部の損傷

り天井試験体の寸法は、5.0m×5.0m であり、天井板として石膏ボードが貼られ、振動台上の鉄骨フレームにボルトにより吊り下げられている。Figure 8 に吊り天井試験体を示す。加振中は、マイコンセンサー端末により、野縁と野縁受けを接合するクリップのひずみを常時モニタリングし、損傷発生の検知を行い、加振後に検査ロボットにより、目視検査を行う。

マイコンセンサーによる入力レベル 40%時のモニタリング結果を Figure 9 に、入力レベル 80%時のモニタリング結果を Figure 10 に示す。また、検査ロボットからの損傷箇所の画像を Figure 11 に示す。入力レベル 40%時では、加振開始時に、大きなひずみがみられるが、残留ひずみもなく、損傷の発生はみられない。加振後の検査ロボットによる目視検査でも、損傷は生じていないことを確認している。入力レベル 80%時では、大きなひずみの変動と残留ひずみが見られ、損傷が生じていることが検知できる。加振後の検査ロボットによる目視検査から、野縁と野縁受けを接合しているクリップがはずれ、大きな損傷が生じていることを検知している。また、ひずみゲージ設置箇所では損傷が生じていないが、損傷発生を検知できていることから、センサー設置箇所以外の損傷発生も検知できることを確認している。

提案したシステムでは、マイコンセンサーにより簡易な損傷発生の検知を、検査ロボットにより損傷箇所の検知と損傷状況の把握を行っており、既往の検査手法と比較して、より容易に損傷状況の把握が行うことが可能となる。



Figure 8 天井実験体

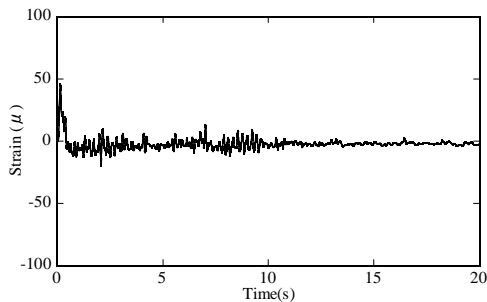


Figure 9 入力レベル 40%時のひずみ波形

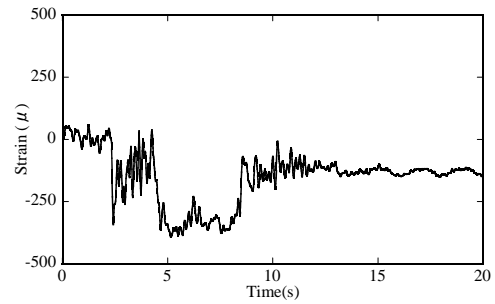


Figure 10 入力レベル 80%時のひずみ波形



Figure 11 検査ロボットから損傷箇所の映像

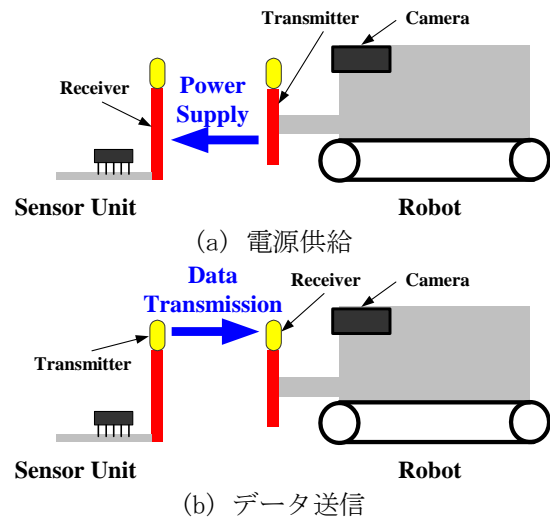


Figure 12 システム概要

#### (4) マイコン搭載センサー端末と小型車両ロボットによる温度計測

開発した環境モニタリングシステムは、天井部材の安全性モニタリングにも用いた検査ロボットとワイヤレスで給電できるように拡張したマイコンセンサー端末から構成されている。また、環境モニタリングは、静的な計測となるため、データ送信も LAN だけでなく、ロボットを用いた赤外線通信によっても送信できるように改良している。ワイヤレス給電とデータ計測の模式図を Figure 12 に示す。屋内計測実験により、照度センサーによる明暗、温度計測などが可能となることを確認している。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 0 件)

[学会発表] (計 6 件)

- ① 蔡一正, 仁田佳宏, 石田正美, 尾内俊夫, 星野祐美, 西谷章: dsPIC による構造物の応急損傷発生検知システムの開発 その 1 dsPIC によるモニタリングシステムの開発, 日本建築学会学術講演梗概集(東北) B-2, pp. 663-664, 2009. 8, 査読無
- ② 仁田佳宏, 石田正美, 蔡一正, 尾内俊夫, 西谷章, 星野祐美: dsPIC による構造物の応急損傷発生検知システムの開発 その 2 応急損傷発生検知手法の提案, 日本建築学会学術講演梗概集(東北) B-2, pp. 665-666, 2009. 8, 査読無
- ③ 仁田佳宏, 西谷章, 石田正美: マイコンによる構造物の応急損傷発生検知システムの開発, 第 11 回「運動と振動の制御」シンポジウム講演論文集, pp. 129-132, 2009. 9, 査読無
- ④ 蔡一正, 仁田佳宏, 石田正美, 尾内俊夫, 西谷章: マイコンセンサー端末とワイヤレスカメラ搭載ロボットによるモニタリングシステムの開発, 日本建築学会学術講演梗概集(北陸) A-2, pp. 489-490, 2010. 9, 査読無
- ⑤ Y. Nitta, A. Nishitani, T. Nagae, X. Ji, M. Nakashima : Damage Detection of Beam-Column Joint in Full-Scale Model Building Experiments, Proceedings of 5th World Conference on Structural Control and Monitoring, USB, 2010. 7
- ⑥ Y. Nitta, A. Nishitani, M. Watakabe, S. Inai and I. Ohdomari : Structural Monitoring Utilizing Smart Sensors and Inspection Robot, Proceeding of 3rd Asia-Pacific Workshop on Structural Health Monitoring, DVD-ROM, 2010. 11

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

無し

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

仁田 佳宏 (NITTA YOSHIHIRO)

足利工業大学・工学部・准教授

研究者番号: 10318834

### (2) 研究分担者

無し

### (3) 連携研究者

無し