



構造ヘルスマモニタリングの実用化に関する研究 —データモデルを含む基盤システムの構築—

小川 修一¹⁾、亀田 浩紀²⁾、佐藤 宏³⁾、三田 彰⁴⁾

- 1) 正会員 慶應義塾大学大学院理工学研究科、博士課程(前期)
e-mail : kkk-18-ogw@auone.jp
- 2) 慶應義塾大学大学院理工学研究科、博士課程(前期)
e-mail : kame0410@a3.keio.jp
- 3) 慶應義塾大学理工学部システムデザイン工学科
e-mail : hiroshi@a8.keio.jp
- 4) 正会員 慶應義塾大学、教授 Ph.D.
e-mail : mita@sd.keio.ac.jp

要 約

本研究では、実用化に向けた構造ヘルスマモニタリング(SHM :Structural Health Monitoring)システムとそのデータモデルを提案し、プロトタイプを構築した。また、センサ情報や計測データの登録を自動化することで、設置の容易なデジタルスマートセンサを開発した。本SHMシステムは、リレーショナルデータベース(RDB:Relational Database)を使用したデータ管理を行い、WEB(World Wide Web)ページを通じて、いつでもどこでも解析可能なシステムとした。本論文では、提案したSHMシステムを木造模型、金属模型と2つの実建物、合計4つの構造物に実装して実験検証を行った。その結果、本SHMシステムがデータ取得から解析表示までスムーズに動作すること、ルータの設定を変更することなく、計測データの自動登録を行えること、システムが安定的に53日間稼動したこと、適切なレベルの振動であれば建物の一次固有振動数を100%の確率で自動導出できることを確認した。

キーワード： 構造ヘルスマモニタリングシステム、データモデル、センサネットワーク、WEBシステム

1. はじめに

近年、耐震強度偽装事件や大手ゼネコンの施工ミスなどの事件を経て、建物の実際の性能や健全性を診断する構造ヘルスマモニタリング(SHM :Structural Health Monitoring)技術への関心が高まっている。しかし、SHM技術が話題に上るようになって10年以上が経過した現在においても、SHMの普及は限定的と言わざるを得ない。SHM実現のためには、ハード面の整備、信頼におけるソフトの開発、そしてユーザとのコミュニケーションという大きな3つの課題がある。安価で簡単に使用できるセンサの開発や、膨大なデータを蓄積し管理するサーバの構築といったハード面、得られたデータをどのように解析し、どのような情報を用いて健全性の判断を行うのかといったシステムのソフト面、さらに診断結果を誰にどう伝えるのかといったコミュニケーション面での課題である。現在のSHMシステムは地震観測システムをベ

一にしたシステムが主であって、センサとその設置工事にかかる費用が高額になりがちである¹⁾。また、SHM用データベースのモデルが統一されていないため、データを統計的に扱うことが困難である。信頼性の高いソフト開発とコミュニケーションの問題としては、建物のどの情報をどのように比較して、誰に何を開示するのかが定まっていない。これらの克服には、多くの計測データを蓄積し、比較検討することが可能な仕組みを構築する必要がある。しかし、これまでに提案され構築されてきたSHMシステムはそれぞれ独自のもので、データを比較検討するのが困難である。たとえば、SHMと緊急地震速報を連動して振動データを受信するシステムの提案²⁾や地盤や建物の情報を持ち運び可能なセンサを用いて現地で収集するシステムの提案³⁾などがある。筆者らの研究室でも、デジタルスマートセンサやWEB(World Wide Web)解析システムなどの開発や研究を行ってきた^{4),5),6)}。本研究は、これまでの研究成果を統合し、実用化に向けたSHM専用のデータベースのモデルを提案すると共に、そのモデルを使用したデジタルスマートセンサに基づくSHMシステムのプロトタイプを開発することを目的とした。

2. 構築した構造ヘルスマonitoringシステムのプロトタイプ

本研究では、データ取得から蓄積、解析までを一貫して行う構造ヘルスマonitoringシステムのプロトタイプ(以下、SHMシステム)を開発した。SHMシステムは、本研究で開発したSHM用デジタルスマートセンサ(以下、スマートセンサ)と3台のサーバから構成される。システムの概要を図1に示す。スマートセンサは、ネットワークに接続されるとセンサ情報をXML(eXtensible Markup Language)形式でサーバに転送し、自動登録を行うため、LAN(Local Area Network)に接続し、電源を入れることで設置準備が整う。その後、スマートセンサの設置情報をWEBページから登録することで、計測データとその属性データであるメタデータをSHMサーバのデータベースに自動登録できる用意が整う。スマートセンサとデータ取得アルゴリズムの詳細については2.1節と2.4節で記述する。

SHMシステムは、スマートセンサから送信されたデータを受信し、データベースに登録するSSSサーバ、WEBインターフェイスやデータベースを管理するSHMシステムの中心となるSHMサーバ、負荷のかかる数値解析を専門に行うMATLABサーバの3台のサーバから構成される。各サーバの詳細とデータベースのデータモデルに関しては2.2節と2.3節に記述する。

スマートセンサと各サーバが連携することにより、自動蓄積した計測データやセンサ情報などをWEBページから閲覧でき、システム同定等の解析も行うことができる。解析結果はSHMサーバのデータベースに蓄積され、統計情報として利用することが可能となる。システム同定ツールの詳細は2.5節で記述する。また、ユーザのアクセス制御も行っており、権限のない情報は閲覧することができない。アクセス制御を行うことで、SHMシステムを複数のユーザが共同で利用できる設計となっている。今後、ユーザ名や建物名を伏せた形で、計測データに関する統計情報を共有することを目指している。

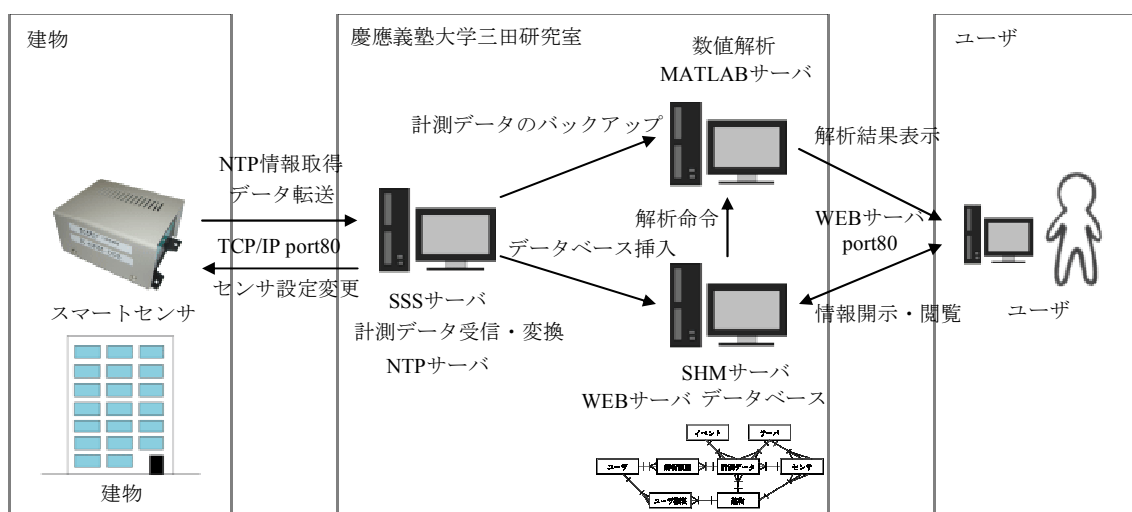


図1 構造ヘルスマonitoringシステム (SHMシステム) の構成概要

2.1. スマートセンサ

地震観測システムをベースとしたセンサシステムでは、アナログケーブルの設置費用や収録用サーバの維持管理費用などが高く、なかなか普及に繋がらない。本研究では、センサにプロセッサを持つSUZAKU-Vを搭載し、センサそのものに処理機能を持たせた。スマートセンサは三田研究室と株式会社東京測振が共同で開発したセンサをSHM専用更に改良を加えたセンサである。周波数特性は、DC～100Hzであり、分解能は0.004gal以下、A/D変換分解能は24bitと高性能なハードウェアを用いている。表1にSHM用スマートセンサの仕様、図2と図3にその概観図を示す。スマートセンサをLANに接続し、電源を入れるとまずセンサ情報がXML形式でSSSサーバに送信され、SHMサーバのデータベースに自動登録される。この後、WEBページを用いてスマートセンサの設置情報を入力することで、スマートセンサの使用が可能となる。計測データは、計測後すぐにデジタル変換され、メタデータと共にネットワークを介して、サーバに自動登録される。本センサシステムはアナログケーブルや建物内の収録用サーバが不要となるため、アナログセンサシステムと比較し、安価で設置が容易となる。

センサの改良点は次の3点である。1つ目は、ポート80番を使用したデータ転送方式に変更した点である。大多数のネットワークでは、セキュリティのため多くのポートが閉じられているが、ポート80番はWEBアクセスに使用されるため、ほとんどの場合開放されている。従って、ルータなどの設置建物側の設定変更を行うことなく、安定的なデータ転送が可能となる。2つ目は、計測に伴うメタデータのやり取りをXML形式に変更した点である。XML形式でデータ定義を行っているため、項目を増やすことや設定変更を行うことが容易となり、汎用性の高いセンサとなる。3つ目は、トリガにより計測データを自動的にアップロードする方式に変更した点である。そのことで、強震観測と常時微動観測の両方のデータを自動収集できる設計とした。

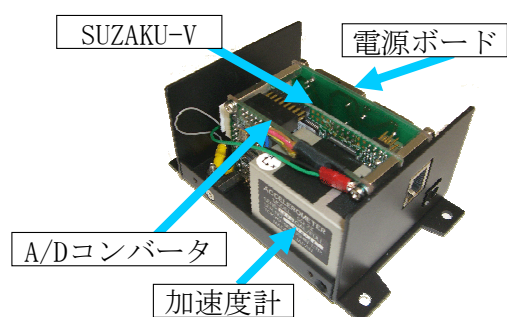


図2 SHM用スマートセンサ(カバーなし)



図3 SHM用スマートセンサ(カバーあり)

スマートセンサのハードウェア構成は図2のように、サーボ型加速度計(SQ-32)、A/Dコンバータ、そしてデータの転送・センサのコントロールを行うSUZAKU-Vと電源ボードから構成される。加速度計で計測された振動は、A/Dコンバータでデジタル変換され、SUZAKU-Vに送られる。そして、SUZAKU-Vでメタデータを付加した後、ポート80番を使用し、SSSサーバへデータ転送される。

SUZAKU-V上では、1つのプログラム(cv_read.c)が動作している。このプログラムは、起動時のセンサ情報の出力、計測データの出力、トリガの設定、スレーブセンサへの計測命令、A/Dコンバータの自動調整、計測震度や最大加速度の計算などを行っている。スマートセンサはマスタとスレーブの2種類に分類される。マスタセンサはトリガが設定されており、トリガがかかった際、ブロードキャストを用いて、ネットワーク内のスレーブセンサに計測開始の命令を出す。現在は、時間と振動の2種類のトリガを設定している。特定の時間となるか5gal以上の振動を感知した時、トリガがかかる。計測時間は1回の計測で3分間に固定した。3分以上振動を計測した場合は、計測済みデータを転送しながら、引き続き計測を行う。例えば9分間となる場合のデータ取得アルゴリズムを図4に示す。5gal以上の振動を1度感知するとそこから10秒遡って3分間計測を行う。計測終了30秒前、つまり、計測開始から150秒経過後に5gal以上の振動を感知した場合は、継続してもう3分間の計測を行う。その間、1回目の計測データは、メタデータ、計測データの順にサーバへ転送される。2回目の計測終了

30 秒前、つまり、1 回目の計測開始から 330 秒経過後に 5gal 以上の振動を感知した場合は、継続して
もう 3 分間の計測を行う。その間、2 回目のメタデータおよび計測データはサーバへ転送される。そし
て、9 分間全ての計測を終了後、3 回目のメタデータと計測データをサーバへ転送する。分割された計
測データは SSS サーバで 1 つに結合される。

表 1 SHM 用スマートセンサ仕様

インターフェイス部	イーサネット	10Base-T/100Base-TX(RJ-45)
	プロトコル	TCP/IP(ポート 80 番使用)
	波形転送	計測データを 3 軸リアルタイム出力
センサ部	加速度計	小型サーボ型加速度計(SQ-32)
	成分数	3 軸(X 軸 Y 軸 Z 軸の 3 成分)
	測定範囲	±2000gal
	周波数特性	DC~100Hz
データ部	分解能	0.004gal 以下
	A/D 変換分解能	$\Sigma \Delta$ 、24bit
地震記録	サンプリング周波数	100Hz(最大 200Hz)
	記録容量	合計 7 時間(180 秒×3ch×50 波)
	トリガレベル	5gal
	プレトリガ	10 秒
時刻部	ポストトリガ	30 秒
	内部時計	10ppm カレンダー時計
	時刻同期	SSS サーバから 10 分間隔で NTP 情報を取得
連動起動	マスタセンサが計測すると同ネットワーク内のスレーブセンサも計測開始	
電源部	DC6V~9V(専用 AC アダプタ付属)	
寸法	84mm(W)×120mm(D)×56mm(H)	
重量	約 750g	
データ転送容量	メタデータ	2,220~2,260byte(オフセットや最大加速度で変化)
	計測データ	162,000byte(3 分間)
	センサ情報	553byte

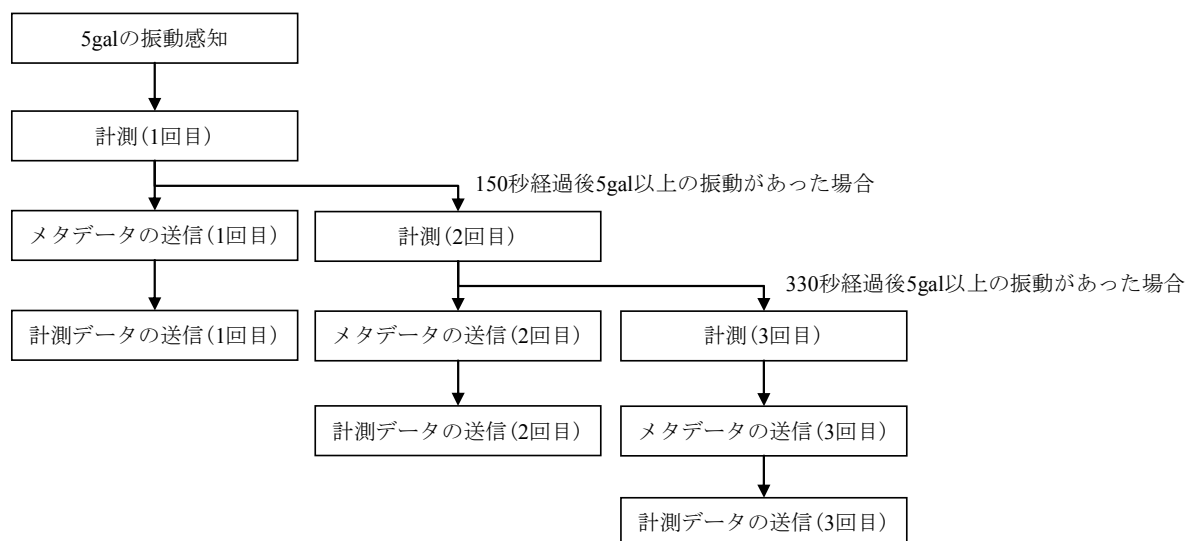


図 4 スマートセンサのデータ取得アルゴリズム(9 分間の場合)

2.2. サーバの仕様と構成

SHMシステムのサーバは、図1のような3台のサーバ構成とした。スマートセンサとデータのやり取りを行うSSSサーバ、数値解析を行うMATLABサーバ、データベースを管理し、WEBサーバとして機能するSHMサーバから構成される。SHMシステムでは、スマートセンサとポート80番による通信を行っているため、計測データを受信するサーバでは、同じポート80番を使用するWEBサーバを起動することができない。このため、SSSサーバをデータ受信サーバとして独立させた。また、システム同定などの高負荷な解析時には、CPUコアの1つが使用率100%近くなる。他のシステムへの影響を避けるため、数値解析専門のMATLABサーバを構築した。表2に各サーバの仕様を示す。MATLABサーバとSSSサーバは外付HDD(Hard Disk Drive)を保持している。計測データは外付HDD1と外付HDD2に保存される。

表2 SHMシステム用サーバの仕様

サーバ	OS	CPU	メモリ	HDD 容量	外付 HDD 容量
SSS サーバ	Fedora 9	Athlon 64 X2 2.0GHz	2GB	80GB	外付 HDD1:400GB
SHM サーバ	Fedora 9	Intel Pentium4 3.2GHz	1GB	120GB	なし
MATLAB サーバ	Fedora 6	Athlon 64 X2 2.0GHz	2GB	80GB	外付 HDD2:400GB 外付 HDD3:400GB

(1) SSSサーバ

SSSサーバはスマートセンサからの接続を待ち、常時待機している。役割は主に2つある。1つ目はスマートセンサからの計測データの受信と登録である。データ取得アルゴリズムの詳細に関しては、2.5節で述べる。2つ目の役割は、時刻同期サーバである。各スマートセンサは、SSSサーバからNTP(Network Time Protocol)により時刻同期情報を取得している。NTPはLANで200 μs以下の誤差での時刻同期が可能である⁷⁾。時刻同期に関しての詳細な技術的検討は参考文献8)を参照されたい。計測データはSSSサーバの外付HDD1に保存される。この計測データはMATLABサーバの外付HDD2と同期ソフトを用いて同期を行っており、計測データは双方の外付HDDに保存される。3分間の計測データ容量は、

$$100\text{Hz} \times 180 \text{ 秒} \times 3\text{ch} \times 3\text{byte}(4\text{bit} \times 6 \text{ 桁}) = 162,000\text{byte} \quad (1)$$

である。つまり、400GBの外付HDDに約247万個の計測データを保存できる。月に3回微小地震などによる振動を測定し、毎日常時微動を計測したと仮定すると、計測データは年間約400個となる。従って、1,000台のスマートセンサの計測データを約6年間保存できる。計測データのセキュリティ面に関しては、計測データは外付HDDに保存するため、SSSサーバに異常が発生した際でも、消去されることはない。また、片方の外付HDDに異常が発生した場合でも、もう片方にバックアップを保存しているので、計測データが消滅する可能性は極めて低い。多数のスマートセンサの同時アクセスによる負荷回避に関しては、計測データの送信時間を分散し、アクセスのピークを回避する設計とSSSサーバを各地域に複数設置し、アクセスの総数を減少させる設計の2種類の対策を現在検討している。

(2) SHMサーバ

SHMサーバは、データベースを管理しており、計測データを除くSHMに必要な全てのデータを管理している。データベースは、有償のデータベースに匹敵する性能を持つPostgreSQL(SQL:Structured Query Language)を用いた。WEBサーバとしてapacheが起動しており、ユーザとのインターフェイスとなる。SHMシステムで行える処理機能を表3に記す。SHMシステムでは、PHP(Hypertext Preprocessor)を用いたアクセス認証を行っており、ユーザによって3つのアクセス制御を設定した。ユーザの権限はシステム管理者、建物管理者、一般ユーザの3段階に分かれている。システム管理者は、表3の全ての権限を持っている。建物管理者は、表3のうちユーザとサーバ、イベントに関する操作を行うことができない。

一般ユーザは、表3の中で解析とプロフィール情報しか閲覧できない。こうした権限の設定は建物ごとに可能とした。1つの建物に関して権限をまとめたものを表4に示す。SHMサーバは各サーバの稼動状態をサーバのモニタリングツール、Nagiosで監視しており、SHMサーバ自身を含め、各サーバで異常が発生した際、システム管理者へ警告を出すなど、SHMシステムの中心的役割を担っている。

表3 SHMシステムのWEBページからできる内容

情報名	内容
ユーザ	ユーザの登録や権限の変更を行える
サーバ	SSSサーバの情報確認を行える
イベント	イベント情報の入力を行える
建物	建物情報の閲覧や新規追加、編集を行える
センサ	スマートセンサの初回利用登録やスマートセンサ情報の閲覧・編集を行える
解析	計測データを用いたシステム同定や波形表示などの数値解析を行える
プロフィール	自分の所属やパスワードなどの設定変更を行える

表4 ユーザ権限の振り分け一覧

ユーザ権限	システム管理者	建物管理者		一般ユーザ	
		可	不可	可	不可
書き込み権限	可	可	不可	可	不可
ユーザ情報	ユーザ追加	○	×	×	×
	ユーザ権限変更	○	×	×	×
サーバ情報	サーバ情報閲覧	○	×	×	×
イベント情報	イベント追加	○	×	×	×
建物情報	建物情報変更	○	○	×	×
	建物情報閲覧	○	○	×	×
センサ情報	センサ情報変更	○	○	×	×
	センサ情報閲覧	○	○	×	×
解析情報	解析結果変更	○	○	○	×
	解析結果閲覧	○	○	○	○
プロフィール	読み書き	○	○	○	○

(3) MATLABサーバ

MATLABサーバは、数値解析の役割を担っている。本研究では、行列演算がC言語と比較して容易であり、豊富な関数が用意されている数値解析ソフトMATLABを解析に用いた。MATLABサーバでもapacheを起動しており、解析ページのみを管理している。WEBページからMATLABを利用する際、MATLABエンジン機能を用いている。MATLABエンジン機能とは、C言語で書かれたプログラムの中に、MATLAB言語を組み込み、プログラム実行時にMATLABの関数や数値計算機能呼び出す機能である。WEB解析のデータフローを図5に示す。

図5に示す通り、MATLABサーバ上で解析要求理解プログラムがSHMサーバから解析手法と建物情報を受け取り、建物情報から解析に利用する計測データを自動決定する。決定した計測データを用いて、C言語で書かれた解析プログラムを実行する。解析プログラムは、MATLABサーバにインストールされているMATLABを呼び出し、結果を返している。解析に必要な建物とセンサ情報をMATLABアプリケーションの1つであるdatabase toolboxを用いて、SHMサーバのデータベース(SHMDB)から引き出し、解析に利用している。そして、解析結果をユーザに表示し、解析履歴をSHMDBに登録している。

現在は、計測データの波形表示、周波数伝達関数の導出とARX(Auto-Regressive eXogeneous)モデルを用いたシステム同定、システム同定によって求めた1次固有振動数を時系列上に表示する解析プログラムを用意している。今後、ねじれの解析などその他の解析を行えるように拡張を予定している。

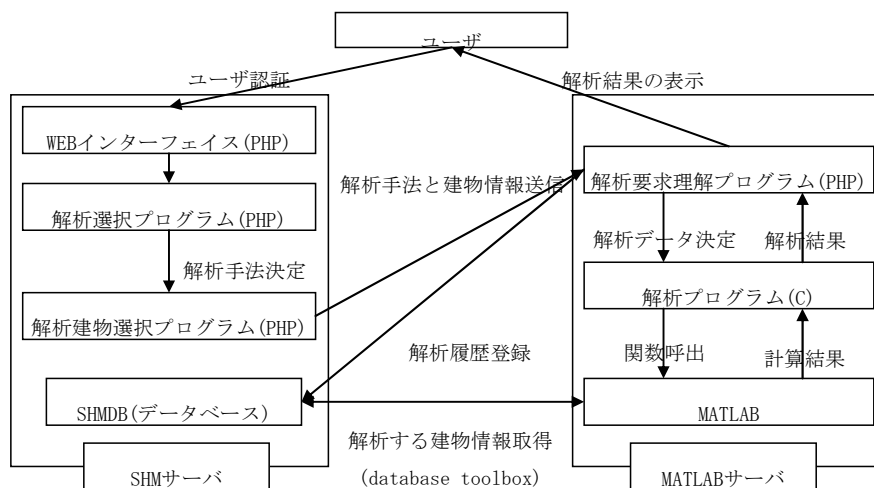


図5 WEB解析データフロー

2.3. データモデル

本研究では、スマートセンサや建物情報を管理するためにデータベースを導入した。データベースによるデータ管理を行うことで、データを効率よく処理し、大量のデータに対して高速なアクセスが可能となる。本研究では、データベースの中で主流であるリレーショナルデータベース(RDB:Relational Database)を用いた。RDBは全てのデータを2次元の表(テーブル)として管理することが可能である。RDBを用いたSHMシステムを実用化に向けて開発するため、SHM専用のデータベースモデル(データモデル)を構築した。SHMの分野では、RDBやスマートセンサを用いた実用化システムのデータモデルはまだ確立されていない。SHM専用のデータモデルを標準化することで、各ユーザ間でのデータ共有も可能となり、安価なセンサシステム開発に寄与する。以下、データモデルについて記述する。

まず、データ間の関連によってデータ構造をモデル化するために、ER(Entity Relationship)図を用いた検討を行った。実用化に向けたSHMに必要な項目(エンティティ)を考察した。候補としたエンティティを表5に示す。計測データを管理する計測データテーブル、スマートセンサの情報を管理するセンサテーブル、スマートセンサを設置した建物情報を管理する建物テーブル、スマートセンサと通信を行うSSSサーバの情報を管理するサーバテーブル、震源に関する情報を管理するイベントテーブルである。ここまでの、計測データ取得に関するエンティティである。次に、解析に焦点をあてたエンティティの検討を行った。SHMシステムを利用するユーザ情報を管理するユーザテーブル、解析履歴を管理する解析履歴テーブルの2つである。ユーザ権限のテーブルに関しては次節で説明する。図6にデータテーブルの詳細を記述する。データの中身はSHMシステムを実用化するために、最低限の内容にまとめた。今後、必要に応じてデータの拡張を行える設計となっている。図6の黄色の項目はセンサにより自動登録され、水色はシステムにより自動登録される。紫色はユーザによる入力で登録が行われる。

表5 データテーブルの内容

エンティティ	内容
計測データ	計測に伴うメタデータの管理
センサ	スマートセンサの仕様や設置情報の管理
建物	スマートセンサを設置した建物情報の管理
解析履歴	1次固有振動数などの解析結果の管理
ユーザ	SHMシステムに関わるユーザ情報の管理
ユーザ権限	ユーザのアクセス権限の管理
サーバ	SSSサーバに関する情報の管理
イベント	震源情報の管理

建物	解析履歴	センサ	計測データ
建物 ID(PK)	解析履歴 ID(PK)	センサ環境 ID(PK)	計測データ ID(PK)
建物名	ユーザ ID(FK)	センサユニット ID	センサ環境 ID
建設年月日	建物 ID(FK)	センサ製造者	建物 ID
改修年月日	解析日時	センサモデル	イベント ID
管理者	X軸1次固有振動数	プロセッサボードのモデル	サーバ ID
施工業者	Y軸1次固有振動数	プロセッサボードのメモリ	連続記録番号
構造タイプ	Z軸1次固有振動数	センサのMacアドレス	計測日時
建物用途	X軸1次減衰定数	ADコンバータ性能	計測データファイル名
郵便番号	Y軸1次減衰定数	サンプリング周波数	計測メタデータファイル名
所在地(市町村まで)	Z軸1次減衰定数	サンプリング周波数単位	計測データのフォーマット
所在地(市町村以下)	解析手法	集計サーバ ID(FK)	計測開始形式
地上階数	計測データID	建物 ID(FK)	サンプリング間隔
地下階数	計測データ日時	センサ設置階	サンプリング間隔単位
センサ設置位置	解析履歴詳細ファイル	センサ設置部屋	計測長さ
建物外観図	解析履歴詳細	センサ設置位置X方向	計測長さ単位
建物詳細ファイル		センサ設置位置Y方向	サンプリング周波数
建物詳細		センサ設置位置Z方向	サンプリング周波数単位
		1チャンネルセンサタイプ	1チャンネル最大値
		1チャンネルセンサ詳細	1チャンネル最大値単位
		2チャンネルセンサタイプ	1チャンネルオフセット
		2チャンネルセンサ詳細	1チャンネルオフセット単位
		3チャンネルセンサタイプ	1チャンネルトリガ値
		3チャンネルセンサ詳細	2チャンネル最大値
		センサ関係	2チャンネル最大値単位
		センサ詳細ファイル	2チャンネルオフセット
		センサ詳細	2チャンネルオフセット単位
			2チャンネルトリガ値
			3チャンネル最大値
			3チャンネル最大値単位
			3チャンネルオフセット
			3チャンネルオフセット単位
			3チャンネルトリガ値
			トリガ継続時間
			計測震度
			センサMacアドレス
			集計サーバIPアドレス
			最大記録チャンネル数
			記録チャンネル総数
			溯り計測時間
			常時微動トリガ
			計測データ詳細

サーバ	ユーザ
サーバ ID(PK)	ユーザ ID(PK)
サーバIPアドレス	姓
サーバOS	名
サーバ郵便番号	最終ログイン日時
所在地(市町村まで)	メールアドレス
所在地(市町村以下)	パスワード
サーバ詳細	所属
	ユーザ詳細

イベント	ユーザ権限
イベント ID(PK)	ユーザ権限 ID(PK)
イベント名	ユーザ ID(FK)
イベント発生日時	建物 ID(FK)
イベントタイプ	ユーザ権限
マグニチュード	建物権限
最大震度	ユーザ権限詳細
イベント詳細ファイル	
イベント詳細	

図6 データテーブルの詳細

続いて、それぞれのエンティティを関係性(リレーションシップ)で結んだ。リレーションシップで結ばれたエンティティの関係は、1対1、1対多、多対多のいずれかの関係に該当する。計測データテーブルがデータの最小単位となるため、本データモデルの中心とした。導き出したER図を図7に示す。図7の各線はデータの関係性を表している。例えば、1つのセンサは多数のデータを計測する関係にあることから、計測データテーブルと1対多の関係であることが分かる。従って、図7はセンサから計測データに向かって3本の線が伸びている。続いて、1つの建物には多数のセンサが設置される関係にあることから、建物テーブルとセンサテーブルも1対多の関係にあることは明白である。この関係では、建物テーブルから計測データテーブルにアクセスするためにデータの結合が必要となり、システム構成上よいデータモデルとはいえない。RDBにおいて、データの結合処理は最も負荷がかかる処理の一つである⁹⁾。そこで、計測データのテーブルにも建物IDを持たせ、図7のように建物テーブルからセンサと計測データのテーブルに直接アクセスを可能とした。最後に、ユーザと建物の関係に着目した。この関係は、多対多の関係となる。1人のユーザは多数の建物を参照でき、1つの建物は多数のユーザによって参照される関係にある。これを一意な関係とするには、ユーザ権限のテーブルを追加する必要がある。このテーブルを仲介することにより、ユーザと建物の関係を一意に結びつけた。

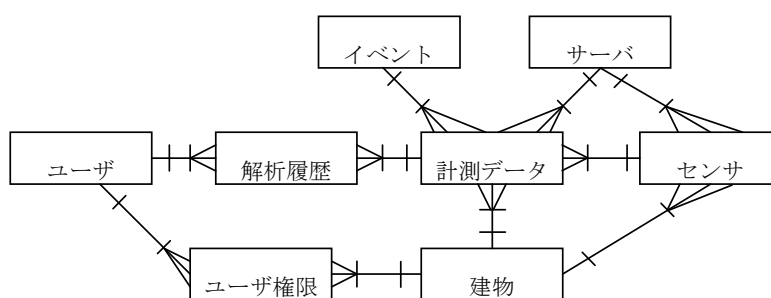


図7 ER図

2.4. データ取得までのデータの流れ

ここでは、計測データの取得から、登録を行うまでの流れを説明する。SSSサーバでは、スマートセンサから計測データを受信するプログラム(cv_read_v1.c)、メタデータをデータベースに登録し、計測データを加工するプログラム(new_environment.pgc)、起動時のセンサ情報を登録するプログラム(sample2.pgc)の3つが動作している。図8に計測データを保存するまでの流れを示す。

(1) 受信プログラム

このプログラムは、スマートセンサからポート80番を用いて計測データを受信し、計測データとメタデータを計測日時.データ作成番号.AD.txtと計測日時.データ作成番号.AD.xmlのファイル名で、SSSサーバの/media/HD-PSU2/raw_dataのフォルダに一時保存する。この時、計測データはAD値(センサの出力電圧をデジタル変換した値)であり、16進数の24bitの符号つき整数で3軸のデータを1列に記述している。本プログラムは同様にスマートセンサの起動時に送信されるセンサ情報も受信し、日時とセンサユニットID.FIRST.xmlのファイル名で、/media/HD-PSU2/connection_dataのフォルダに一時保存する。

(2) データベース登録プログラム

このプログラムは、C言語の中にSQLを組み込んでおり、/media/HD-PSU2/raw_dataに保存されたメタデータを読み込み、中に記述されている計測データの情報をSHMDBに登録する。自動登録する情報は、図6の計測データテーブルの黄色の項目である。データ登録後、PostgreSQLが計測データテーブルに一意のIDを自動で振り分けるため、IDの重複はない。本プログラムは、3分を超える計測のため分割された計測データを1つに結合すると共に、1列の16進数のAD値を10進数に変換し、3軸のデータに振

り分けている。また、メタデータに記述されているオフセットの情報を読み込み、AD変換された出力電圧を物理的な加速度値に変換している。最後に、計測データのファイル名を計測データID.txtに変換し、/media/HD-PSU2/edit_dataの中のセンサIDごとのフォルダに保存する。データ保存後、MATLABサーバの/media/HD-PSU2/edit_dataのフォルダと同期プログラム(rsync)によりバックアップしている。

(3) センサ情報登録プログラム

このプログラムは、スマートセンサ起動時に、送信されたセンサ情報をSHMサーバのデータベースであるSHMDBに自動登録する。このプログラムもSQLを組み込んでいるため、データベース操作が可能である。自動登録される項目は、図6のセンサテーブルの黄色の項目である。このテーブルもPostgreSQLが一意的IDを振り分ける。センサ情報登録後、WEBページより、センサ設置情報を登録することで、スマートセンサの計測準備が整う。

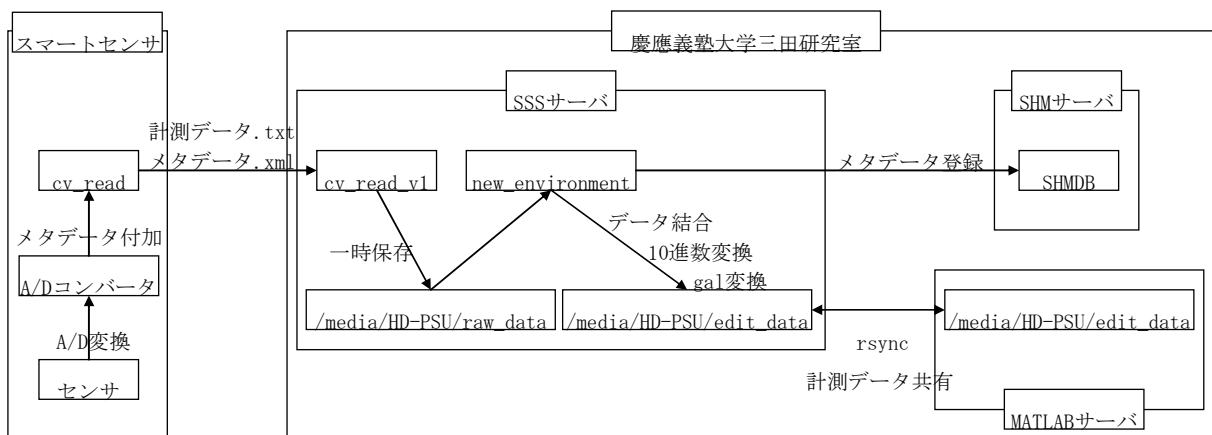


図8 計測時の計測データとメタデータを保存するまでの流れ

2.5. システム同定ツール

SHMシステムでは、建物の解析手法として、周波数伝達関数を導出するノンパラメトリックな解析とパラメトリックな解析を行っている。システム同定手法の詳細は例えば参考文献(10),(11)を参照されたい。本研究では、高速に同定可能なARXモデルによるシステム同定を用いた。SHMシステムでは、システム同定に用いる計測データや前処理、次数、推定区間設定などを自動で行う。また、伝達関数や極の安定性を用いて、1次固有振動数を自動推定する。専門家の知識が必要なこれらの項目を自動化することで、専門家の知識がないユーザでも建物の1次固有振動数を推定でき、建物のモニタリングを行うことが可能となる。

(1) 各パラメタの決定手法

建設省告示第1793号における設計用1次固有周期の略算式(2)に基づき、SHMDBに登録されている構造タイプと階数 N から1次固有振動数に目安をつける。この時、高さ h は階数 N に比例すると仮定すると、(3)式となり、(3)式をもとに各パラメタ決定を行っている。ここで、木造と鉄骨造の場合、 $const$ を0.1。鉄筋コンクリート造と鉄骨鉄筋コンクリート(SRC)造の場合、0.07とした。

$$T = h(0.02 + 0.01a) \quad (2)$$

$$\omega = \frac{1}{const \times N} \quad (3)$$

表6に ω の範囲から決定したリサンプル R (サンプリング周波数より低い周波数でサンプリングしたデータに変換すること)と1次固有振動数の存在する推定範囲 F 、最大モデル次数を記す。5gal以上の振動の場合は、表6のリサンプル、推定範囲、最大次数を用いており、最大振幅の1秒前から15秒間と最大振幅の2秒後から15秒間の2つの推定区間のフィット率のよい区間を用いた。常時微動では、振動レベルが低くSN比が低いため、推定区間を全区間とし、最大モデル次数は ω の範囲をもとにリサンプルと解析時間を考慮した設定とした。ARXの次数の決定にはAIC(赤池情報量規範)を用いている。

表6 リサンプルと固有振動数の推定範囲、常時微動の同定次数の決定表

ω [Hz]	リサンプル R [Hz]	推定範囲 F [Hz]	最大モデル次数
$0 < \omega \leq 1$	20	$0 < F \leq 2$	55
$1 < \omega \leq 2$	20	$0 < F \leq 4$	55
$2 < \omega \leq 5$	50	$0 < F \leq 10$	40
$5 < \omega \leq 10$	100	$2 < F \leq 15$	35
$10 < \omega \leq 20$	100	$5 < F \leq 20$	35

(2) 1次固有振動数自動推定

1次固有振動数の自動推定手法について述べる。まず、減衰の値に着目した。減衰は鉄骨造の場合は10%未満、木造の場合は20%未満に設定した。また、表6の ω の範囲によって、1次固有振動数の推定範囲 F の区間外の値を除外する。初めに減衰と推定範囲 F によるフィルタリングを行うことで、1次固有振動数候補を絞ると共に、推定処理の計算負荷を軽減させている。次に極の安定性に着目した。次数を変化させても固有振動数が $\pm 7.5\%$ 以内に連続で導出されたなら、その固有振動数は推定範囲 F の範囲内であれば、1次固有振動数である可能性が高いと判断した。最後は、伝達関数の増幅率に着目した。伝達関数が極大となる振動数を固有振動数の候補とし、安定して抽出された極の振動数と比較する。この2つの振動数が、 $\pm 7.5\%$ 以内の振動数である時、1次固有振動数であると推定した。また、2箇所推定された場合は、高い振動数の方は2次固有振動数の可能性が高いので、低い振動数を1次固有振動数と推定する。推定結果なしと判断された場合は、WEBページから伝達関数と極の安定性の情報から手動で選定することも可能である。

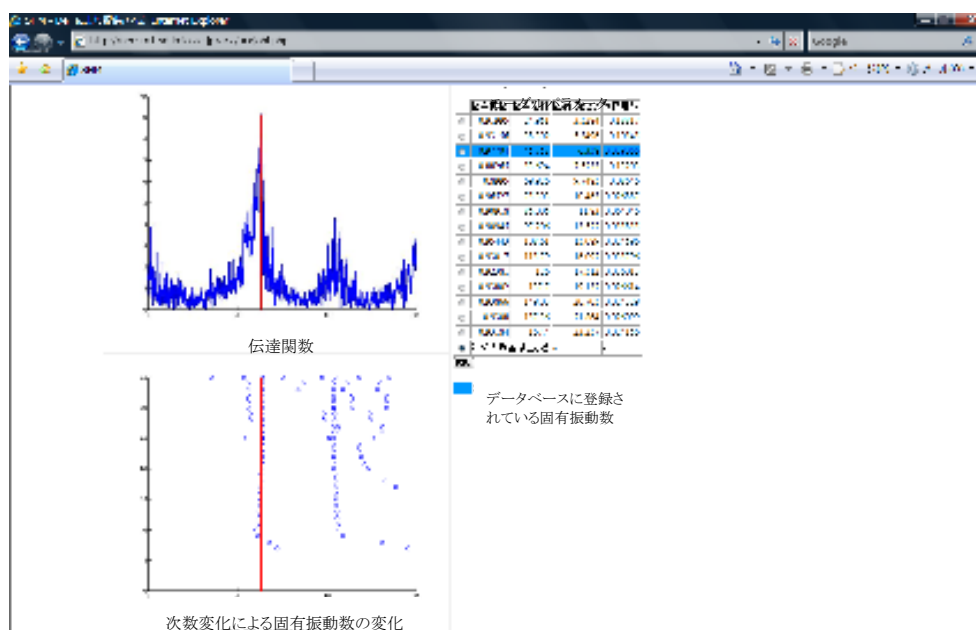





図9 自動推定のWEBページの一例

3. 実験による検証

SHM システムを木造模型と金属模型、木造と鉄骨造の実建物の合計 4 つの構造物に実装し、実験を行った。検証項目は 3 つ。1 つ目は、木造模型、金属模型の両構造物へ SHM システムが適応可能か検証を行った。2 つ目は、SHM システムの安定性の検証を行った。3 つ目は外部ネットワークから安定的な通信が可能か検証を行った。本実験では、スマートセンサを各建物に 2 個ずつ設置した。建物情報を表 7 に記す。

表 7 実験に用いた建物情報一覧

建物名称	木造模型	金属模型	S 館	O 邸
構造タイプ	木造	鉄骨造	鉄骨造一部 SRC 造	木造
建設年月日	2007 年 4 月 1 日	2003 年 4 月 1 日	2000 年 4 月 1 日	1982 年 11 月 1 日
改修年月日	改修なし	2008 年 12 月 15 日	改修なし	1993 年 4 月 1 日
建物階数	地上 2 階	地上 5 階	地上 7 階地下 2 階	地上 2 階
建物用途	システム同定実験	システム同定実験	学校校舎	住居
所在地	神奈川県横浜市	神奈川県横浜市	神奈川県横浜市	神奈川県鎌倉市
上センサ位置	屋根裏	屋上	6 階	2 階
下センサ位置	1 階	2 階	地下 2 階	1 階
計測開始日	2008 年 12 月 23 日	2008 年 12 月 1 日	2008 年 12 月 19 日	2008 年 12 月 19 日
最終計測日	2008 年 12 月 28 日	2009 年 1 月 30 日	2009 年 1 月 30 日	2009 年 1 月 30 日
検証目的	木造模型金属模型でのパラメタ推定試験 金属模型において安定性確認試験		別ネットワークでの通信試験	
外観写真				

4. 結果

4.1. 検証 1 木造模型と金属模型の比較

木造模型と金属模型を三段階に変化させ、1 次固有振動数の推移を観測した。木造模型は、初めの 3 日間は 1 階 2 階とも筋交りの状態、次の 3 日間は 2 階筋交を取り除いた状態、最後の 3 日間は筋交なしの状態で計測を行った。金属模型は、最初の 5 日間は健全な状態、次の 5 日間は 4 階の柱を細いものにした状態。最後の 5 日間は更に 3 階を細い柱に変更して計測を行った。図 10 と図 11 は木造模型と金属模型の計測データから 1 次固有振動数を推定した結果である。赤線は、常時微動の計測データから自動推定した 1 次固有振動数である。青線は、7 日目の自動推定の結果を WEB ページから手動で訂正した結果である。緑色のシンボルは、5gal 以上の自由振動を用いて自動推定を行った 1 次固有振動数である。図のように、木造模型、金属模型共に 1 次固有振動数が導出できた。常時微動に関しては、木造の 1 データを除いて自動推定ができた。自動推定に失敗したデータは、2 次固有振動数を 1 次固有振動数と誤って推定したことが判明している。また、自由振動の場合は振動レベルが大きいため、100% 自動推定ができた。よって、SHM システムは、木造模型と金属模型の両方に対して、問題

なく適用できることを確認した。

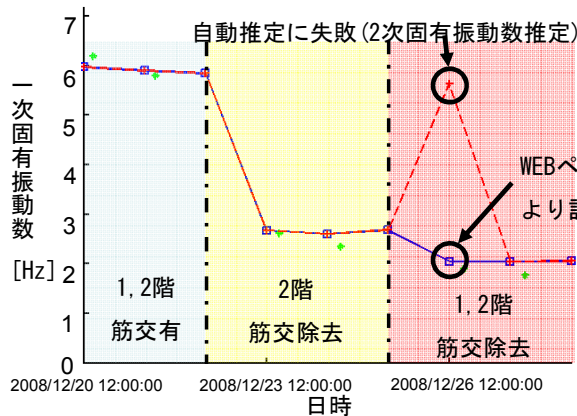


図10 木造模型1次固有振動数の推移

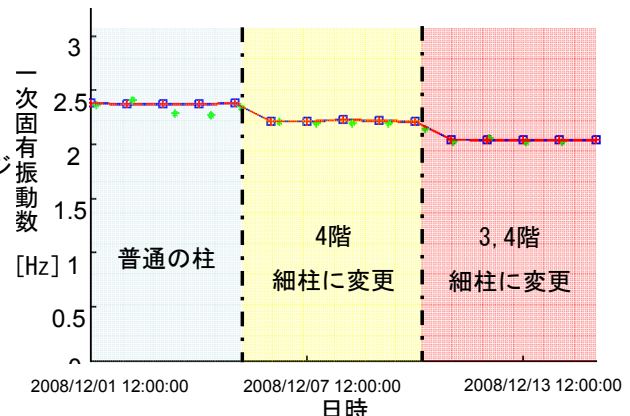


図11 金属模型1次固有振動数の推移

4.2. 検証2 SHMシステムの安定性検証

図12は金属模型の常時微動計測データから、1次固有振動数を導出した結果である。最初の15日間は検証1を行ったため、1次固有振動数が3段階に変化している。計測後、建物の柱を最初の状態に戻し、計測を続けた。12月29日～1月5日の間キャンパス閉鎖のため、各サーバの稼動を止めた。よって、8日間の計測データが欠落している。この結果、8日間を除いて53日間、スマートセンサから計測データを取得し続けたことを確認した。2つの計測データを除き安定的に1次固有振動数を求めることができている。推定失敗の原因は、1つは、1次固有振動数の固有値が導出されず、2次固有振動数を推定したことにより、もう1つは、伝達関数の極大値と安定した極を結びつけられなかったことにある。自由振動の場合は、こうした問題は生じていない。

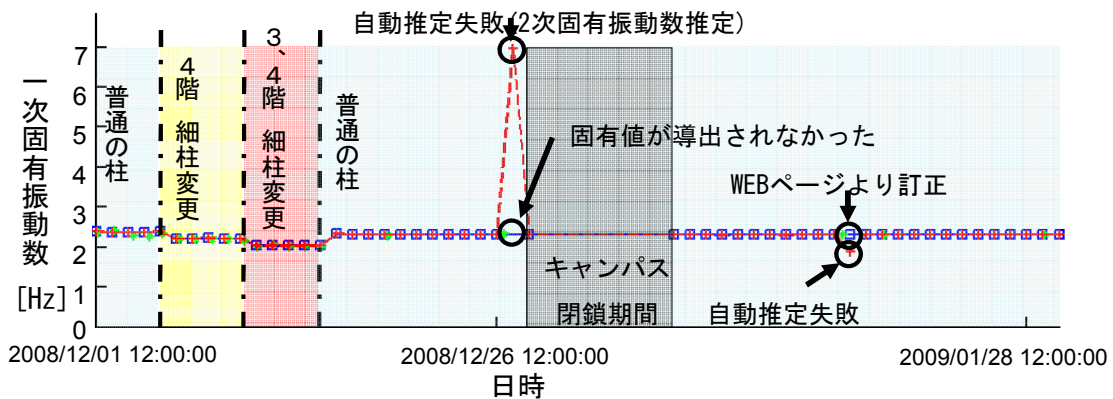


図12 金属模型1次固有振動数の推移

4.3. 検証3 別ネットワークでのモニタリング

大多数のネットワークでは、セキュリティ対策が施されており、外部との通信にはファイアウォールを通過しなければならない。SHMシステムを実用化するためには、開発したスマートセンサが研究室以外のネットワークにおいても、ルータなどの設定変更を行うことなく、安定的に計測データの取得が可能か検証を行う必要がある。スマートセンサでは、安定した通信を行う方法としてポート80番を使用したデータ通信を行った。本検証の対象建物は、神奈川県横浜市のS館と神奈川県鎌倉市の一般木造住居の2つの建物を観測対象とした。その結果、キャンパス閉鎖の8日間を除いて37日間、センサシステムが稼動し続けたことを確認した。また、本SHMシステムによって導き出したS館の1次固有振

動数はアナログの地震観測システムによって得られたデータを解析した結果とほぼ一致した。計測データ自体は高性能なスマートセンサを用いているため、他のセンサと遜色ないことを示し、データの欠損もないことを確認した。よって、ルータの設定を変更することなく、計測データをSSSサーバに転送できることを示した。これにより、ポート80番を使用することで、一般的なネットワーク環境でも環境を変更することなく、本SHMシステムを利用できることを示した。

5. まとめ

本研究では、実用化に向けたSHMシステムとそのデータモデルを提案し、プロトタイプを構築した。センサ情報や計測データの登録を自動化することで、設置の容易なデジタルスマートセンサを開発した。また、提案したSHMシステムを木造模型、金属模型と2つの実建物の合計4つの構造物に実装して実験検証を行った。なお、解析手法については限定的なものにとどまっております、今後その充実と検証を続けることで、本システムを実用に近づけたい。本研究での成果と今後の課題をまとめると次の通りである。

○まとめ

- ・ XML を用いて、自動設定可能なデジタルスマートセンサを開発した。
- ・ 実用化に向けた SHM システムのデータモデルを提案した。
- ・ 振動の計測から、収録、解析までを一貫して行う SHM システムのプロトタイプを構築した。
- ・ 金属模型にスマートセンサを実装し、53 日間安定的に稼動していることを確認した。
- ・ 適切な振動振幅であれば 1 次固有振動数を 100%自動導出できることを確認した。
- ・ ルータの設定変更なく外部ネットワークから 37 日間、安定的に通信できることを確認した。
- ・ SHM システムを木造、鉄骨造の実建物に実装し、外部ネットワークに接続した場合でも安定的に適用できることを確認した。

○課題

- ・ 実用的な解析手法を実装し、SHM システムとしての費用対効果の検証をする。
- ・ 建物の損傷度を定量的に導出し、リスクマネジメントに活用できるようにする。

本研究はこれまでの慶應義塾大学理工学部三田研究室の研究成果を統合し、実用化に向けて開発を行ったものである。今後、本研究成果が SHM システムのプラットフォームとなることが期待される。

謝 辞

本研究は、民間会社16社に参加いただいている慶應義塾大学理工学部の共同研究プロジェクト「構造ヘルスマニタリング(略称、K-SHM)」の一環として行われたものである。また、株式会社東京測振技術部の高橋秀雄氏には、スマートセンサのソフトウェア開発を御担当いただいた。ここに記して謝意を表したい。

参考文献

- 1) 三田彰：ヘルスマニタリングから建築空間の生命化へ、新都市ハウジングニュース、Vol.50、2008、pp.12-15
- 2) 源栄正人、本間誠、セルダル クユク、フランシスコ アレシス：構造ヘルスマニタリングと緊急地震速報の連動による早期地震情報統合システムの開発、日本建築学会技術報告集、第 14 巻、第 28 号、2008、pp.675-680
- 3) 飛田潤、福和伸夫、佐武直紀、原徹夫、太田賢治、小出栄治：地盤・建物振動特性の現地簡易評価のための常時微動観測分析システムの開発、日本建築学会技術報告集、第 15 巻、第 29 号、2009、pp.61-64
- 4) 岩城英朗、岡田敬一、白石理人、柴慶治、三田彰、武田展雄：制震・免震構造物へのヘルスマニタリングシステムの適用、JCROSSAR2003 論文集、2003、pp. 583-590

- 5) 三田彰、岩澤脩：建築空間の生命化のためのスマートセンサネットワーク、日本建築学会大会学術講演梗概集（九州）B-2、2007、pp.67-68
- 6) 小川修一、三田彰：建築空間の生命化を目指した構造ヘルスマニタリング用データベースに関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集（九州）B-2、2007、pp. 69-70
- 7) Mills D. L., "Internet time synchronization: the Network Time Protocol," IEEE Transaction Communications, Vol. 39, Issue 10, 1991, pp. 1482-1493
- 8) Ishikawa, K. and A. Mita., "Time Synchronization of a Wired Sensor Network for Structural Health Monitoring," Smart Materials and Structures, Vol. 17, No.1, 2008, 015016 (6pp) doi:10.1088/0964-1726/17/01/015016.
- 9) 弓場秀樹・武田喜美子：よくわかる実践データベース、翔泳社、2001
- 10) Farrar, C.R. and Sohn, H., "CONDITION/DAMAGE MONITORING METHODOLOGIES," Invited Talk, The Consortium of Organizations for Strong Motion Observation Systems (COSMOS) Workshop, Emeryville, CA November 14-15, 2001. LA-UR-01-6573
- 11) Farrar, C.R. and Doebling, S.W., "DAMAGE DETECTION II: Field Applications to Large Structures," in Modal Analysis and Testing, J. M. M. Silva and N. M. M. Maia, eds., Nato Science Series, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands, 1999.

（受理：2009年2月2日）
（掲載決定：2009年8月17日）

Development of Prototype System for Structural Health Monitoring Aimed at Practical Application

OGAWA Shuichi ¹⁾, KAMEDA Hiroki²⁾, SATO Hiroshi ³⁾ and MITA Akira ⁴⁾

1) Member, Graduate Student, Keio University

2) Graduate Student, Keio University

3) Undergraduate Student, Keio University

4) Member, Professor, Keio University, Ph.D.

ABSTRACT

The structural health monitoring (SHM) is a key technology for visualizing structural health. In this paper, a prototype system for SHM aimed at practical application was proposed and developed. In order to implement a database system into the prototype, a database model for SHM was also proposed. As a key unit for the system, a smart sensor system that has automated data acquisition and communication with the server was developed. We verified good and stable performance of the SHM system. The prototype SHM system could continue functioning for 53 days. The system identification algorithm based on ARX modeling implemented into the SHM system could estimate the first natural frequency of wooden buildings and steel buildings successfully from free vibration as well as micro tremors. We expect the developed SHM system would be our platform for future SHM systems.

Key Words: Structural Health Monitoring System, Data Model, Sensor Network, WEB System