

構造物の健全性評価のための 多点同期地震加速度計測システムの研究

Study on simultaneous multi-channel seismic acceleration measurement system for evaluation of the structural integrity of buildings.

株式会社 山武
アドバンスオートメーションカンパニー

古川 洋之
Hiroyuki Furukawa

株式会社 山武
アドバンスオートメーションカンパニー

大浦 肇
Hajime Ooura

株式会社 山武
アドバンスオートメーションカンパニー

田久保 光
Koh Takubo

キーワード

地震、地震被害、構造部診断、加速度計測、同期記録、高速サンプリング、遠隔監視、ADSL 通信

大規模地震発生時の構造物被害の事前対策として、中小規模地震の際の同期が取れた複数ポイントの加速度計測データを用い対象構造物の健全性の評価を行なうことを目的とした研究会に参画している。今回、実フィールドでの実地震計測を目的とした計測システムのプロトタイプを開発し、2005年3月より仙台市内の高層住宅で計測を実施している。その結果2005年8月16日の宮城県沖地震を始め複数の実地震の加速度計測に成功し、構造物の健全性の評価として活用可能な高精度な地震計測を実現したので結果を報告する。

As a precaution against damage to structures caused by major earthquakes, we have participated in a study group aimed at evaluating the structural integrity of buildings using acceleration measurement data from several synchronized points during small-scale and medium-scale earthquakes. As part of this study, we developed a prototype for a measurement system designed for actual seismic measurements in the actual field, and, since March 2005, we have been taking measurements at high-rise apartment buildings located within Sendai City. As a result, we have been successful in measuring the acceleration of several real earthquakes, including the Miyagi-Oki Earthquake of August 16, 2005, and we have achieved highly accurate seismic measurements, which are potentially useful in evaluating the soundness of structures. This paper reports on these successes and achievements.

1. はじめに

1995年の兵庫県南部地震を契機に全国的に地震観測ネットワークが整備され数キロから数十キロの間隔では地域としての地震被害を定量的に判断することが可能となってきたが、地盤の状態は数百メートル離れると異なることがあり、地震被害の影響に差が生じ、また建物の構造の違いによってもその被害は異なってくる。

構造物の地震対策としては耐震補強が現在主流であるが、耐震補強の必要性を判断するためには専門家の現地調査が必要であることから、最近では構造物の健全性の評価を計測により判定する研究が行なわれている。

当社は1998年より東京ガス株式会社殿との共同研究で地区ガバナ（ガス供給設備）でのガスの自動遮断を目的としたインテリジェント地震センサSESシリーズを開発、商品化し、一般販売を含めると2006年現在5000台以上の販売実績がある。この実績を踏まえ、地震計測の新たな研究として財団法人地震

予知研究総合振興会に設立した研究会において東洋大学、東京大学地震研究所、東京ガス株式会社、東京ガスエンジニアリング株式会社と共同で中小規模地震時の構造物の運動を計測することによる対象構造物の健全性の評価を判定する研究を行なっている。その研究の一環として同期をとった複数ポイントで高品質の加速度計測が可能な実験用の計測システムの開発を行ない、仙台市の高層住宅に設置し地震計測を行なっている。

本稿では、①加速度計測装置、②ローカル収集装置、③遠隔監視装置の3つの構成要素により実現した構造物の多点同期加速度計測システムにおける①高速サンプリング計測、②同期記録機能、③高分解能計測、④大容量データ保存、⑤ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Line) を用いた遠隔データ収集の5つの技術に関して述べる。

更に、2005年8月16日の宮城県沖地震の計測結果より構造物の被害推定の指標として有効と考えられる解析結果が得られたので報告する。

2. システム構成

図1の計測システムの構成図に示す様に、①加速度計測装置、②ローカル収集装置、③遠隔監視装置の3つの構成要素により建物の多点同期加速度計測システムを実現している。

仙台市内の高層住宅設置のシステムでは加速度計測装置を3台使用して3ポイントの多点同期加速度計測を行ない、ADSL 公衆回線を使用して遠隔（神奈川県 藤沢市の当社藤沢工場）でデータの収集を行なっている。

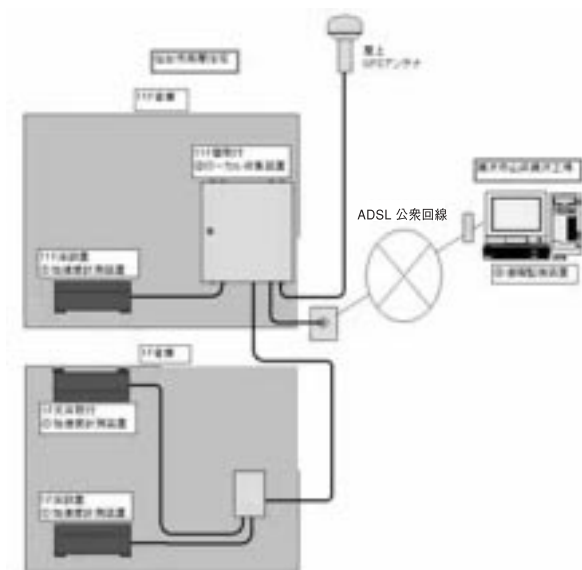


図1. システム構成図

3. 多点同期加速度計測システムの開発

中小規模地震時の構造物の健全性の判定を行なうためには、構造物の運動を計測する必要がある。図2に示す演算フローに従い地上階を基準とした上部階の相対加速度、相対速度、相対変位の計測が必要である。今回開発した加速度計測システムを実現するにあたり①高速サンプリング計測、②同期記録機能、③高分解能計測、④大容量データ保存、⑤ADSLを用いた遠隔データ収集の5つの課題の検討を行なった。

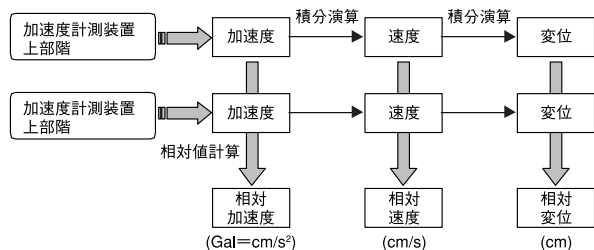


図2. 演算フロー

3.1 高速サンプリング計測（加速度計測装置）

一般的な地震計の100Hzサンプリングでは同期が1サンプリングずれると10msの計測値のずれが生じ、2箇所の加速度計測値を2回積分して得られる相対変位の誤差が大きくなるため、サンプリング時間をできるだけ短くする必要がある。

また、建物の健全性診断に必要とされる加速度データのサンプリング時間の最適値の検討を行なうためにも、できるだけ高速なサンプリングを実現させ、取得データを間引き計測誤差へ

の影響を確認することでサンプリングの最適値の検討を行なうことが可能である。

検討の結果、高速サンプリングを実現するためには「CPU（Central Processing Unit）+AD コンバータ」の一般的な回路構成では、CPUの他の演算、記録、通信等の処理負荷によりADコンバータに対して1kHz以上の高速制御の実現が困難であることが明確になった。従って、ADコンバータの高速制御用に専用インターフェースICを開発し、「CPU+専用インターフェースIC+ADコンバータ」の構成により、ADコンバータの制御に必要なCPUの負荷を10分の1以下にすることを可能にした。結果として一般的な地震計の20倍のサンプリング速度となる2kHzの高速サンプリング計測を実現した。

3.2 同期記録機能（加速度計測装置）

3.2.1 同期記録機能（ハードウェア開発）

構造物の相対変位の最大値を計測するためには、複数の計測ポイントでの同期をとった加速度計測データを取得する必要がある。同期記録の方法としては、複数台の加速度センサのアナログ信号を計測器まで延長し同期記録を行なう手法が一般的であるが、アナログ信号線を数十メートル延長する必要がある、ノイズによる計測誤差の発生が問題となる。従って、個々の独立した加速度計測装置内で加速度データの記録を行ないデジタル信号に変換した後、ローカル収集装置から通信によるデータの収集を行なう方法を採用した。

独立した計測装置の同期を取る手法としては、GPS（Global Positioning System）等を用いた絶対時刻補正が考えられるが、計測装置ごとにGPS受信機能を保有させるので高価となり、衛星を捕捉するためにアンテナの設置場所の制約が生じることから不採用とした。

今回は絶対時刻精度の必要はなく各加速度計測装置間の相対的な記録データの同期精度が保たれていることが必要であるため、デジタル信号を用いた有線同期方式を採用した。

地上階に設置したマスタとなる加速度計測装置が記録条件を満足した場合に記録開始トリガ信号としてデジタル出力信号（オープンコレクタ）をONさせ、スレーブとなる加速度計測装置のデジタル入力で受信する有線同期記録機能を実現した。同期信号線は総延長300mの以内の配線であれば100 μ s以下の同期精度である。結果、2kHzの高速サンプリングと有線同期記録機能により、トータルで「1サンプリング時間+有線同期信号の伝達遅延」による ± 0.6 ms以下の高精度の多点同期記録が可能となった。

3.2.2 同期記録機能（ソフトウェア開発）

上記同期記録信号を受け加速度計測データの記録を行なうが、地震記録データの解析の際に有効と考えられる以下の3つ仕様を満足するプログラムを開発した。

- ①同期記録信号受信時より30s前に遡って記録を行なう。
- ②記録が中断した際も他の加速度計測装置と同期が取れた記録を行なう。
- ③加速度計測装置のCPUクロックのずれを補正可能とする。

(1) 記録開始信号受信より前の小さな加速度データも地震波形解析の際に必要とされるため、記録開始信号受信から遡ってデータを記録に残す必要がある。従って、記録メモリアは

リングメモリを採用し常時加速度データの記録を行ない、記録開始信号を受信した際に30s間以上記録がある場合は30s間遡って記録を残し、トータルで120s間の記録を行ない次の記録エリアに移動させる。なお、記録開始信号受信時の記録が30s未満の場合は終了時間を延長しトータルで120s間の記録とする。

(2) 停電等で記録が中断した場合も他の加速度計測装置と同期が取れた記録データを残すために、記録中断状態から復帰した際には、記録開始信号が70s間以上ONしていないことを確認した後に記録可能とする。

図3に動作説明を示す。図の上段の加速度波形がしきい値5Galを超えた場合に、マスタ機器から出力される記録開始信号がONとなる。

図3の①～③の動作を説明する。

- ① スレーブ側の加速度計測装置の動作が再開したが、記録開始要求の立ち上がりエッジが未検出であり記録は行なわない。
- ② 記録開始要求の立ち上がりエッジを検出したがOFF時間が70s未満のため記録は行なわない。ここで記録を開始した場合は他の機器と30s ずれた記録データとなる。
- ③ 記録開始信号の立ち上がりエッジを検出しOFF時間が70s以上であるため記録を開始する。

判定時間の70s間は、連続記録の際の最長OFF時間40s 間(図3のT1)と記録開始信号前の遡る時間の最大値30s(図3のT2)を足した値である。

(3) 加速度計測装置のCPUのクロックにずれが生じるとサンプリング時間に差異が生じ、120s間の記録の終盤で他の記録データと同期が取れなくなる可能性がある。従って、マスタ機器から出力される記録開始信号のON時間を80s間固定とし、各加速度計測装置でON時間を計測した値を加速度記録データの情報として保存する。この計測値を使用して、解析の際に記録時間のずれの補正が可能となり、定期的に確認しCPUのコンペアマッチカウンタを調整することでクロックの補正も可能である。

3.3 高分解能計測(加速度計測装置)

計測加速度を2回積分して変位を求める際に、加速度計測値のノイズ成分による誤差が演算結果に蓄積されるため、加速度のノイズ成分の影響が小さい高分解能計測が必要である。また、計測加速度データに対するソフトウェアフィルタ処理の最適化の検討を行なうためにも、ソフトウェアフィルタ処理を行っていない状態での加速度計測精度の向上が必要である。従って、高周波ノイズを除去するために地震時の加速度計測に不要な高周波成分をカットするアナログローパスフィルタの採用と高精度ADコンバータの採用の検討を行なった。

検討の結果、計測加速度3軸対して独立したカットオフ周波数50Hzの6次のパワース型アナログローパスフィルタと24bitデルタシグマ型ADコンバータを採用し、ソフトウェアフィルタ処理を行っていない状態で±1Gal (cm/s²) 以内の加速度分解能を実現した。

3.4 大容量データ保存

(加速度計測装置、ローカル収集装置)

加速度計測装置の1波形の加速度記録データは2.88MByte(3成分、32bit、2kHzサンプリング、120s間データ)であり、加速度計測装置内の高速メモリSRAM(Static Random Access Memory) 24MByteでは記録データが6波形までの制限が生じる。従って、加速度計測装置の高速記録が完了後にローカル収集装置から自動でRS485(105,600bps) 通信を使用してデータを収集し、メモ리카ード512MByteに保存を行なう。今回仙台市の高層住宅に設置した実験用の計測システムでは加速度計測装置を3台使用しており、1セット(3台分)では8.64MByteの大容量加速度記録データとなるが、メモ리카ードをバッファとして使用することにより、最大50セット(3台分)の記録を保存することが可能である。

3.5 遠隔データ収集

(ローカル収集装置、遠隔監視装置)

図4に仙台市設置の計測システムのネットワーク構成図を示す。仙台市設置のローカル収集装置と当社藤沢工場実験室の遠

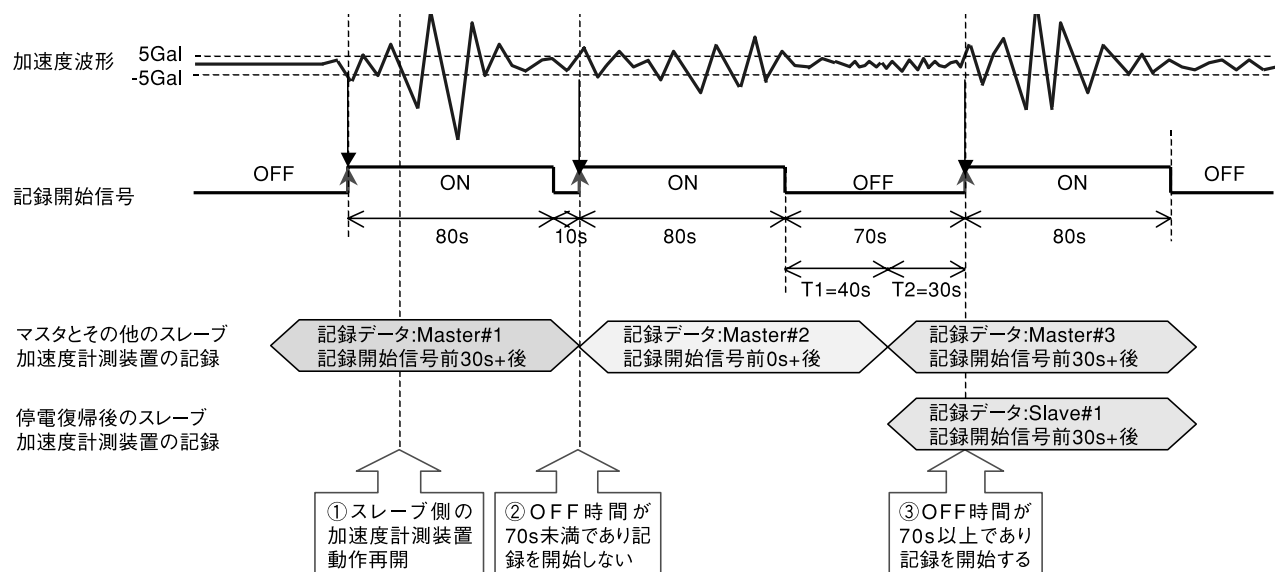


図3. スレーブ加速度計測装置記録復帰動作

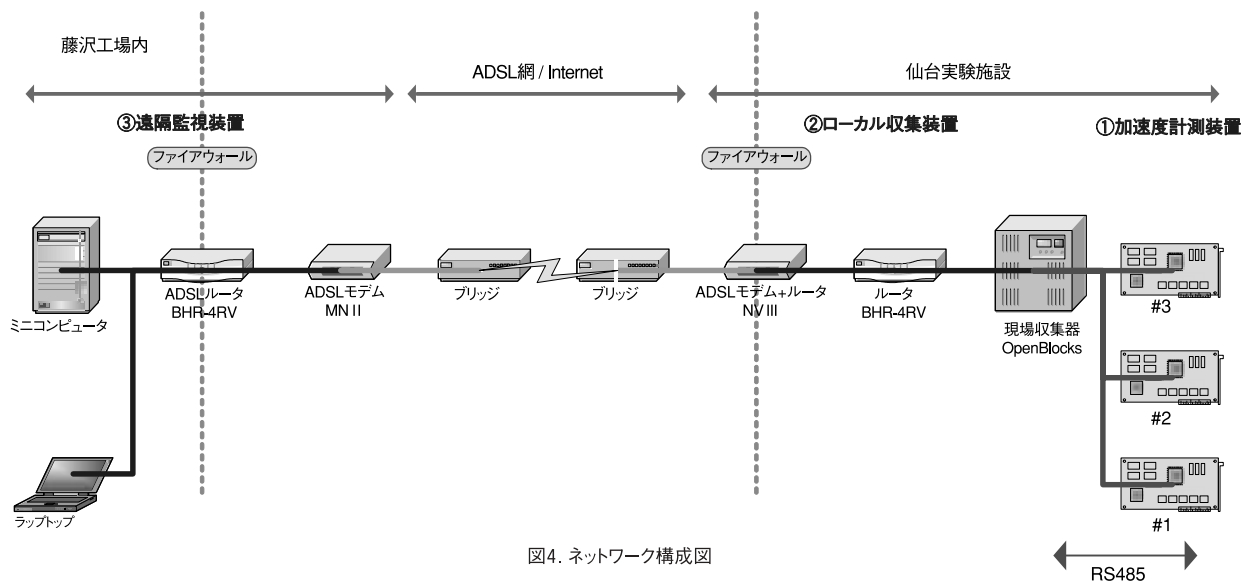


図4. ネットワーク構成図

隔監視装置間はADSLで接続している。

両端とも固定グローバルIPアドレスを有するため、不正アタックを受ける可能性があるため、対策としてVPN (Virtual Private Network) を採用した。構成機器はすべて民生品である。

仙台実験施設のローカル収集装置にあるボックスコンピュータ (以後Box PC) と藤沢工場実験室の遠隔監視装置のPC (Personal Computer) が各々サーバ/クライアントとなり、藤沢側から仙台側機器をすべて遠隔制御できる。両コンピュータもOS (Operating System) にLinuxを採用しており、通信との親和性は高い。

地震加速度速度データファイルは3台の加速度計測装置が収集した生データに管理情報を加えて、1回の地震分で8MByteを超える。このデータファイルの転送はftp (File Transfer Protocol) を使用した。ファイルの圧縮は行っていないが、1ファイルを45s程度で転送できる。

4. 計測システムの仕様

今回実験用に開発した、①加速度計測装置、②ローカル収集装置、③遠隔監視装置の3つの構成要素からなる構造物の多点同期加速度計測システムにより構造物の健全性の評価に必要な加速度計測を実現した。システム構成図を図1、システム概略仕様を表1に示す。

項目	仕様
加速度センサ	サーボ型加速度センサ
周波数特性	DC-50Hz (-3dB)
最大加速度	±2200Gal
分解能	1Gal以下 (デジタルフィルタ未処理)
成分	X, Y, Z 3成分
AD分解能	24bit
サンプリングレート	2000Hz
記録開始しきい値	5Gal
記録開始方法	マスタのDO信号で起動可能
同期精度	0.6ms以下
時刻	内部クロック (GPSにより補正±2s)
記録時間	120s
波形保存	6波 (加速度計内) 150波 (boxコンピュータ内)

表1. 計測システム仕様

4.1 加速度計測装置

多点加速度計測の同期記録、加速度の高分解能計測、高速サンプリング技術により高品質な加速度計測を実現し、高速メモリを使用して計測加速度データの保存を行なう。

仙台設置システムでは、加速度計測装置を1階の床、1階の天井、11階の床に設置し、1階床のマスタ機器が加速度記録条件5Gal (変更可能) を満足した場合に3台同時に記録を開始する。

- ・同期記録: 有線自動同期計測機能により3台の加速度計測装置間の同期精度±0.6msを実現した。
- ・加速度分解能: X, Y, Z方向3軸に対して独立したカットオフ周波数50Hzの6次バターワース型アクティブローパスフィルタと24bitデルタシグマ型ADコンバータにより、ソフトウェアでの

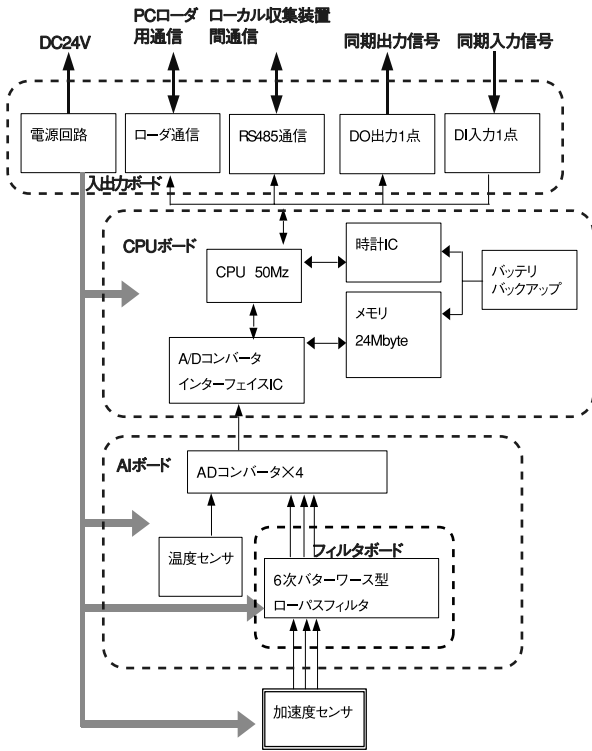


図5. 加速度計測装置 回路ブロック図

デジタルフィルタ処理を行わない状態で $\pm 1\text{Gal}$ 以下の分解能を実現した。

- ・ サンプルング:3 系統のADコンバータの高速制御を実現するため専用のインターフェースICを開発し 2kHz (0.5ms) サンプルングを実現した。
- ・ データの記録:高速メモリのSRAMを 24MByte 搭載し大容量の高品質加速度のデータを6波 (1波 120s 間) 保存することが可能であり,SRAMはバッテリーバックアップされている。

図5に回路ブロック,図6に内部構成写真を示す。

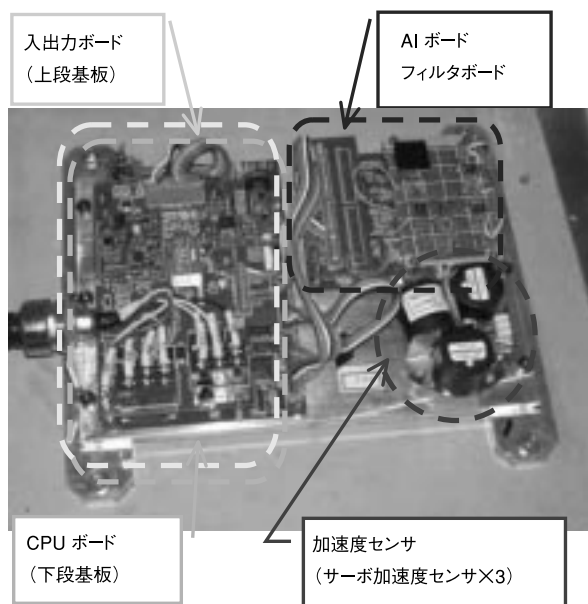


図6. 加速度計測装置 内部写真

4.2 ローカル収集装置

3台の加速度計測装置の波形記録が更新された場合にRS485通信を使用して自動的に記録データの収集を行ない大容量メモリカード 512MByte に50波 $\times 3$ 台の保存が可能である。また, ADSL通信を使用して高速で加速度記録データの転送が可能である。停電時の加速度計測装置の電源を含む電源バックアップ機能を搭載している。

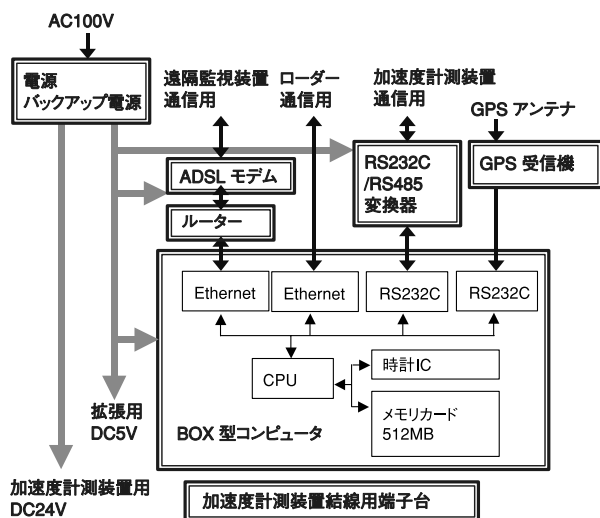


図7. ローカル収集装置 構成ブロック図

時刻の大きなずれを補正するためGPSから時刻データを取

得し,Box PCと地震センサのクロックを定期的に補正している。但し,Box PCのOS処理とRS4通信の遅延により補正精度は $\pm 2\text{s}$ 以内である。

Box PCのサーバ機能を実現するソフトウェアは,加速度計測装置の監視,パラメータ設定,地震加速度波形データの収集とデータファイル作成,GPS機器との通信の機能を統合した。クライアントソフトはtelnetを使用した。

図7に構成ブロック図,図8に内部構成写真を示す。

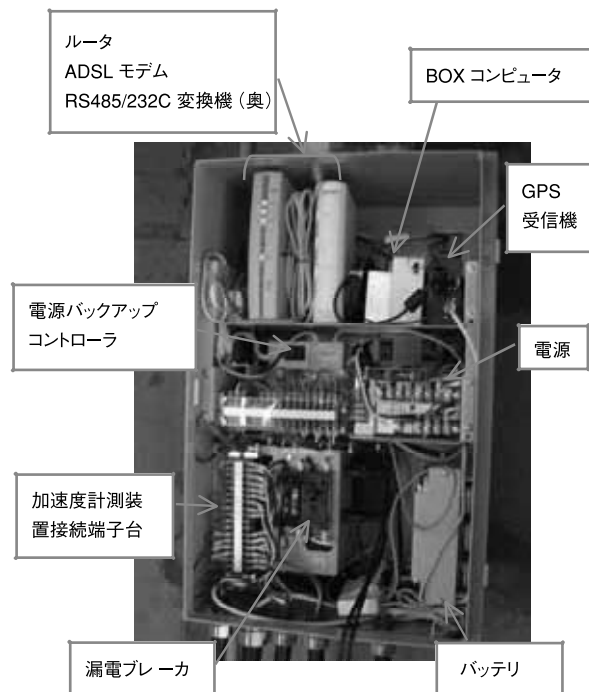


図8. ローカル収集装置 内部構成写真

4.3 遠隔監視装置

ADSL公衆回線を使用して遠隔 (当社 藤沢工場) よりローカル収集装置の記録波形データの読出しが可能であり,ローカル収集装置,加速度計測装置の内部情報の確認ならびに設定値の変更を遠隔より実行することが可能である。

安価な通信手段での時刻精度を調べるための実験を目的としてADSL経由でNTP (Network Time Protocol) サーバに接続して時刻データを取得している。

5. 計測データ

仙台市内の高層住宅への多点同期加速度計測システムの設置が2005年3月に完了しフィールドテストを実施している。図9に現場写真を示す。仙台市との契約で3ヵ年のテストを予定しており2006年3月の1ヵ年が経過した時点では, 2005年8月16日の震度5強の宮城県沖地震の際に 100Gal を越える地震データを記録したのを筆頭に数Galの小規模地震を含めると10波以上の実地震データを計測した。

図10に2005年8月16日の地震加速度データを示す。下の段から1 階床,1 階天井,11 階床の順であり前列から加速度のX方向 (東西方向),Y方向 (南北方向),Z方向 (上下方向) の順となっている。

図11に建物の被害推定の指標の一つとして検討されてい

る1F床と11F床のY軸方向の加速度データを用いて横軸に相対変位、縦軸に相対加速度にプロットすることにより正確な復元力特性のグラフを描くことができた。その結果、構造物の健全性評価の指標として有効と考えられる基礎データの分析結果が得られた。

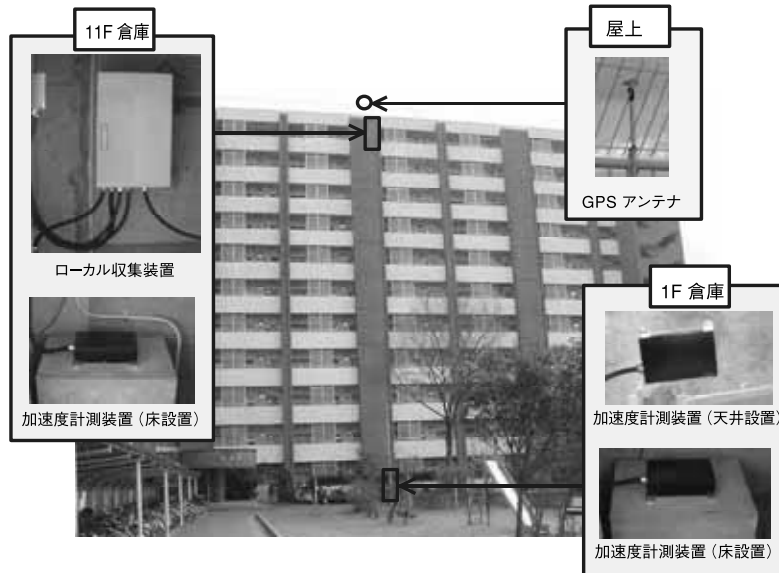


図9. 仙台市高層住宅設置現場写真

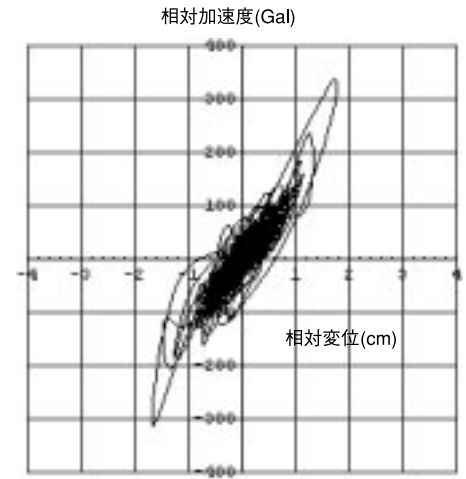


図11. 復元力特性図 (1F 床-11F 床,Y 軸)

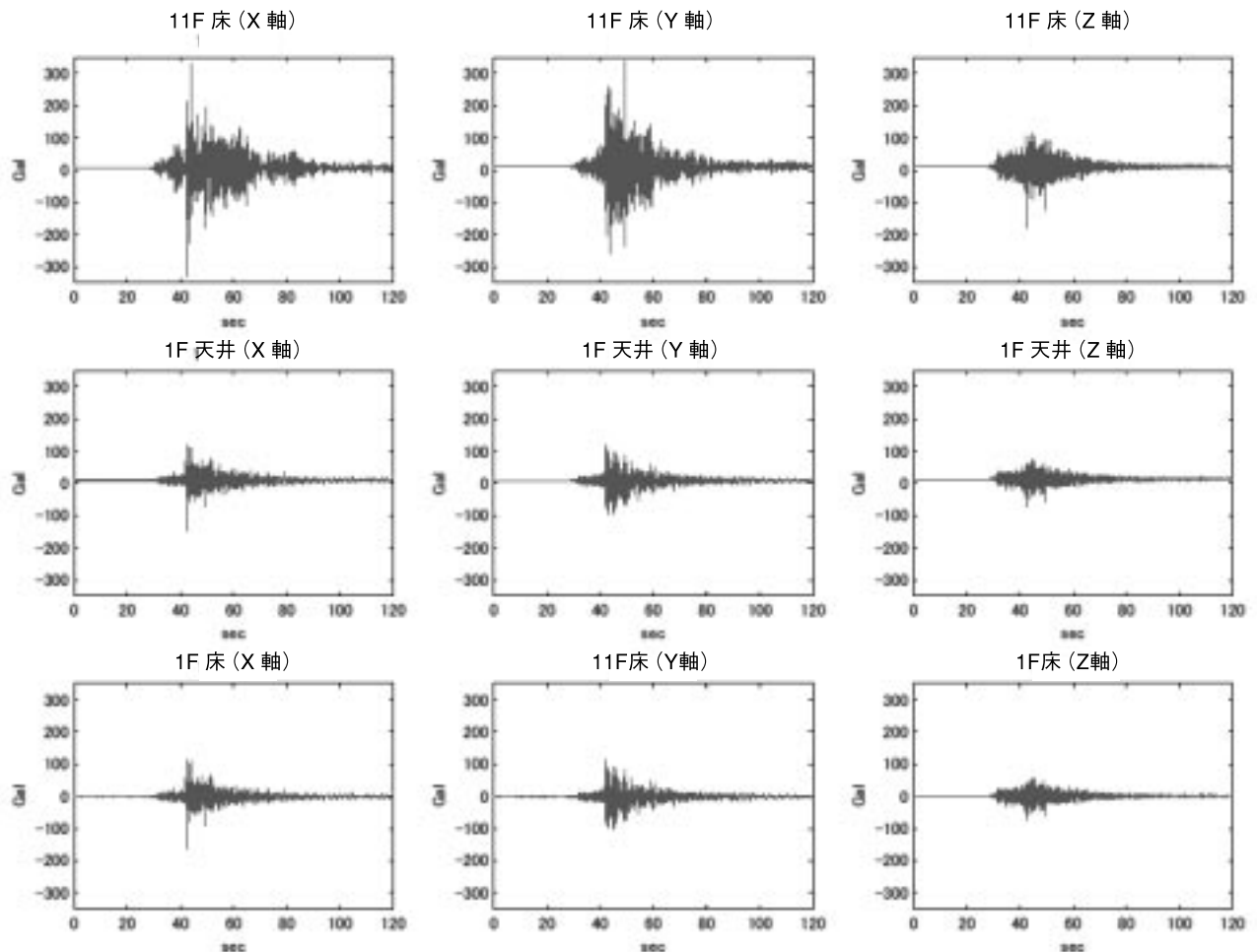


図10. 計測加速度波形 (2005 年8月16日宮城県沖地震)

6. おわりに

今回実験用に開発した計測システムは設置後1年半を経過したが、その間大きな問題もなく継続して地震時の加速度計測を行なっている。

今後は、取得した加速度データを基に、研究会の中で建物の健全性評価として実用的なアルゴリズムの考案と、計測システムに必要な仕様をまとめていく予定である。

謝辞

本研究、開発にあたりましては研究会をまとめて頂きました池田潤一氏をはじめとする共同研究者の東洋大学の鈴木崇伸教授、東京大学地震研究所の堀宗朗教授、東京ガス株式会社の菜花健一氏、山内亜希子氏、東京ガスエンジニアリング株式会社の菊池克彦氏には計測システムの仕様決めに際してご指導頂きました。東北大学大学院工学研究科災害制御研究センターの源栄正人教授には、仙台市の計測システム設置にあたりご指導を賜りました。また仙台市都市整備局の担当者の方々には、観測システムの設置にあたり多大なご協力を賜りました。お礼申し上げます。

参考文献

1. 株式会社山武（2004年4月）：「インテリジェント地震センサ SES60」 No.CP-PC-1430（カタログ）
2. 古川、田久保、築田、市田、清水、小金丸、中山（1999年）：インテリジェント地震センサの開発、「Savemation Review」VOL.17, 株式会社山武, p2-11

商標

SES は、株式会社山武の登録商標です。

著者所属

古川 洋之	アドバンスオートメーションカンパニー開発2部
大浦 肇	アドバンスオートメーションカンパニー CPマーケティング部6グループ
田久保 光	アドバンスオートメーションカンパニー開発2部

※本論文は財団法人 計測自動制御学会 計測部門「第23回 センシングフォーラム」に掲載した内容に加筆したものです。