

戦略的創造研究推進事業 CREST  
研究領域「先進的統合センシング技術」  
研究課題「都市基盤の災害事故リスクの監視とマネジメント」

## 研究終了報告書

研究期間 平成18年10月～平成24年3月

研究代表者：藤野 陽三  
(東京大学大学院工学系研究科、教授)

## § 1 研究実施の概要

### (1) 実施概要

#### 研究チーム全体

本研究は、都市基盤、中でも建築物や鉄道や道路などの交通基盤において、事故災害リスクを低減するために、センシングを使った監視システムを埋め込むことを目標に行うものである。

グループB センサを含むネットワーク

グループC 光を用いた多自由度変位センシング

グループD 電磁波による降雨環境センシング

グループE 光ファイバ分布センシング

においては、センシング手法を中心に個別技術を推進し、そこにおいても実務への展開をはかりつつも、

グループA リスク統合センシング

において、都市基盤モニタリングの効用を当該者に認識させる研究例を推進しつつ、実装の促進を図るために、センシング情報の利活用マネジメントを含めた研究開発を実施してきている。以下に、各グループの研究実施の概要を述べる。

#### 「A. リスク統合センシング（東大・藤野）」グループ

都市基盤における災害や事故防止による安全・安心の実現に向けて、リスクを定量的に評価・監視し合理的なリスクマネジメントを支援する統合センシングシステムを開発する。長期的防災保全費用の最小化、災害事故の事前防止、さらに災害事故が発生した場合の影響波及の最小化の達成を目的に、1) 都市基盤施設のリスクをリアルタイムに監視するセンシングシステムを開発し、2) リスク特性を明らかにした上で対応の合理化・迅速化を実現するマネジメントを提案するのが本研究のねらいである。

都市基盤のハザードや脆弱性に関わるセンシングと統合リスク評価に向け、振動センシングに関する基盤技術の高度化を図るとともに実装化へ向けたシステム開発を進めている。

その一環として、同期振動センサネットワークシステムを新たに開発し、東京大学キャンパス内の建築物に、学内LANを利用した実装を行い、それに伴うデータ管理、配送技術の洗練化を行った。その後、改良を重ね、CPUを組み込んだCI-740を開発した。

また、平成20年度後半から今年度にかけては、高層建築物を対象に長期安全保証、緊急安全確認のためのセンシング基本計画を構築した。そこでは、センシング技術と構造性能評価手法、モニタリングデータの利活用方法の実用化へ向けたケース・スタディとして、1) 新たに開発するGPSを組み合わせたLAN同期センサによる建屋内地震応答高密度計測、2) 構造物の安全性確認のためのデータ解析手法、3) 準リアルタイム地震応答状況の館内掲示ディスプレイ等を通じた情報発信システムの開発を進めてきた。具体的な対象建築物は、L字形の大規模な偏心構造物であり、かつ、免震構造であって、モニタリングの構造工学的意義も高い芝浦工業大学豊洲校舎であり、同大学と連携しながら、研究を進めてきた。その結果、幸運にも2011年3月11日の東日本太平洋地震の前震、本震、余震群の記録に成功し、世界で初めて複雑免震建屋の高密度大振幅地震計測に成功し、その挙動を理解する上で極めて重要なデータであることを定量的に示した。また、本システムでは、地震の揺れに関する情報を管内のディスプレイに示す、モニタリングの一般者への「見える化」も行っており、時代の先を行くユニークなシステムとして今後の発展が大いに期待できるシステムと言える。

また、交通基盤を主たる対象に、移動体(自動車、列車)との協調センシングによる移動体モニタリングの研究にも着手し、線状都市基盤に適したモニタリング手法としてパイロット実装を念頭に、短期的モニタリングの実績を高速鉄道、高速道路で内外で積み、その有用性を示すと

もにワイヤレスセンシングの同期、マルチホップデータ転送技術等の開発も並行して進め、成果を挙げてきた。また、移動体を利用した橋梁の健全性判定、構造パラメータ同定についても新しい手法を提案し、実橋梁において検証実験を行った。

構造物の損傷と直接的に関係する変位の計測法については、グループCの課題であるが、これまで簡便でコストの低い加速度計測を用いる手法についても別途検討した。具体的には地震損傷検知の方法として、ランダム振動理論を援用した、加速度記録から最大変位予測などを開発してきた。

これらをあわせ、今後、益々の普及が見込まれる高層ビルや交通基盤における地震リスクや劣化の監視技術とリスクマネジメント技術の両者を有機的に繋げた方法を展開してきた。なお、前述のように、芝浦工大での地震応答・振動計測がよい例であるが、測定結果を蓄積だけでなく、館内の学生・教職員に迅速に知らせるリスクマネジメントについても検討を進め、実装した。

### 「B. ネットワーク（東大・中山，同・藤野）」グループ

本研究では、構造物に加速度センサ・変位センサ・歪センサ・風速計測センサなどを高密度に配置し、高精度の測定を行うセンサ群を都市規模に配置した構成において、各センサからの情報を常時リアルタイムに収集しながら、災害損傷検出・被害予測や復旧予測などを行うために必要となるセンサノードからの観測データを災害時でも安定して収集することができるネットワーク技術の研究開発を行うことを目的としている。

これまでの研究において、A.リスク統合センシンググループが配置したセンサノードからのデータを集約するためのデータベースやネットワークにかかる負荷を継続的に監視し、現状で特に問題ないことを確認した。また、セキュリティを向上させたオンラインデータベースを設置し、計測データの保持の堅牢性および使用性を飛躍的に高めた。さらに、計測フィールドを大学外の施設とした場合の、データ配送について、第三世代の携帯電話網を中心に適用の可否や問題点の検討を行った。芝浦工大での実装実験から豊洲地区への展開を考えて、扱うデータ量の増加、多種多様なデータの扱いの検討を行った。

### 「C. 多点多自由度変位センシング（東大・安藤，三菱電機）」グループ

本研究の目的は、自由空間中での光波伝搬を媒体として用いた静的・多次元・高精度の位置姿勢計測能力を有する多点多自由度静的変位計測センサネットワークシステムの実現にある。すなわち、非常に狭いビーム幅で高い精度での位置姿勢計測を可能にし、橋梁などの大型構造物に多い1次元的な連なりで横幅が確保できない構造に対して高い精度の実現を図る。

基礎研究として、6軸変位計測用の19次多重零点ビームを設計、ホログラムを作成し、時間相関イメージセンサによりビーム複素波面を検出し変位計測パラメータ検出用の複素画像解析アルゴリズムを開発、実装した。

これらによりnmレベルでの精度で相対変位検出の可能性を確認した。さらに、遠隔で自律的にヘテロダイン干渉を可能にするために必要なヘテロダイン周波数について、荷重積分法という新たな数学的方法論に基づき、数学的に厳密かつ代数的に演算可能な周波数推定法の方法論を確立した。平成21年度より光・電磁応用システムグループとの共同開発を開始しデモ機を開発。フィールド上での微小変位検出を確認、90m伝播を目指し多重零点ビーム同士を干渉させる2号機を作製し、基本性能を確認した。これにより長距離化の可能性も確認できた。

### 「D. 光・電波応用システム（三菱電機，東大・藤野）」グループ

本研究では、送受信の漏洩同軸ケーブル(LCX)対により集中豪雨を線状にモニタリングする技術の実用化を目的とする。

送信 LCX の漏洩電磁界には、放射波によるグラウンドなどからのクラッターの受信信号への影響を軽減し、LCX に付着した雨滴による LCX 極近傍のみの電界のゆらぎを捉えるために、電磁エネルギーが evanescent(非伝搬)状態となる「表面波モード」を動作させることを提案した。

電磁遮蔽された低外来雑音レベルの試験場で人工降雨実験を行った結果、受信信号強度

の差分ゆらぎの大きさと降雨強度との間に高い線形相関があり、豪雨のモニタリングには表面波モードが有効であることを確認した。一方、屋外では非定常ランダム過程かつ高レベルの連続性雑音と衝撃性雑音とで構成される外来雑音が受信信号に重畳されていたため、これらから降雨による微弱なゆらぎのみを抽出するデジタル信号処理理論に基づくアルゴリズムを構築した。本アルゴリズムにより降雨強度約 30mm/h(気象庁定義で「激しい雨」)以上の実豪雨をリアルタイムに捕捉することに成功した。本研究成果により LCX に沿ってリアルタイムかつ数 m の高時間分解能で豪雨をモニタリングする技術の基礎を確立できたといえる。

## 「E. 光ファイバ (茨城大学)」グループ

光ファイバ計測器の PPP-BOTDA について、従来はひずみ測定精度  $\pm 25 \mu \varepsilon$  程度であったが、プリポンプ光の形状およびそれと主ポンプ光間距離の最適化等の実施により、測定精度が  $\pm 25 \mu \varepsilon$  の範囲で安定化され、 $\pm 10 \mu \varepsilon$  のレベルに高められる可能性も示した。また、処理アルゴリズムの改善等によるひずみ測定の超高速化が図られ、従来 10 分程度/1 計測であったが、100Hz でもある程度安定した計測を実現できた。

従来の通信用光ファイバをセンサに用いると、被覆と光ファイバ間にすべりが生じて測定精度が低下することを実験的に明らかにしたうえで、連続繊維複合材との複合化により被覆すべりを制御して、ひずみ測定の高精度化、実質的な空間分解能の改善、そして高感度化を図った。また、被覆や定点接着化によりセンサの長期耐久性・耐候性を高めた。製作工程の考案と試験製作を行い、実構造物に試験実装を行って、適用性や汎用性を初歩的に検討した。

以上のように、PPP-BOTDA 方式を使った光ファイバにひずみ計測において、静的のみならず動的計測に格段の進展をもたらすことができた。

さらに、茨城県内の RC 橋梁を選定して高精度光ファイバの試験実装を実施し、計測の安定性や汎用性を検討した。また、分布型センシングによる直接的な損傷検知方法、損傷が生じない箇所を参照歪とした間接的な損傷検知方法を提案し、その有意性を実装実験により一次的な段階ではあるが、実証できた。これらにより、光ファイバを用いたひずみ計測による構造ヘルスマニタリングシステムの構築に向けて大きな一歩を踏み出した。

### (2) 顕著な成果

#### 1. センシング技術の実装化と構造損傷同定手法の確立へ向けた理論的アプローチの実データによる実証

概要：都市基盤構造物のセンシングにおける要件である時刻同期とデータ転送に主眼をおいた高精度センサを(株)東京測振と共同して開発し、高層免震建物の高密度加速度モニタリングに実装し、検証した。一方で、慣性計測から最大変位を推定する手法を開発し、実データによる実証を行った。上記モニタリングシステムにおいては、2011年3月11日東北地方太平洋沖地震の前震から本震、余震に至る一連の地震を観測でき、構造工学・地震工学上に貴重なデータを取得した。

#### 2. ヘテロダイン周波数推定の実現と低次数LGビームの重ね合わせによる高次数LGビームの生成の考案

概要：LG(ラグールガウシアン)ビームを変位計測に応用し、遠隔で自律的にヘテロダイン干渉による高精度な計測を可能にするために必要なヘテロダイン周波数について、数学的に厳密かつ代数的に演算可能な推定法の方法論を確立した。また、6軸変位の計測にほぼ最適と思われる多重零点ビームとして、干渉させる2ビームのそれぞれを9次とすることで18次の多重零点光ビームを生成できることを示した。

#### 3. PPP-BOTDA およびセンサ構造の改良と橋梁の健全性評価への実装

概要：pump 光に着目して PPP-BOTDA の測定精度を高度化、安定化する手法を構築し、ま

た、処理アルゴリズムの改善等により安定して超高速計測を実現した。また、センサの被覆すべりを制御することにより、高精度化、実質的な空間分解能の改善、高感度化、耐久性・耐候性の向上が図られた。さらに、これらを実橋の変位(歪)計測実験に実装し、分布型センシングによる新たな損傷検知方法の可能性を実証した。

## § 2. 研究構想

### (1) 当初の研究構想

都市基盤における災害や事故の防止による安全・安心の実現に向けて、リスクを監視し、合理的なリスクマネジメントを支援する統合センシングシステムを開発する。長期的防災保全費用の最小化、災害事故の事前防止・影響波及の最小化の達成を目的に、1) 都市基盤施設のリスクをリアルタイムに監視し、2) その特性を明らかにした上で対応の合理化・迅速化を図るのが本研究のねらいである。都市基盤は、道路・鉄道・建物群など、線のあるいは面的に広がる構造物群とその周辺環境から構成され、その災害・事故のリスクは、主として原因事象である「ハザード」と、それを受ける構造物システムの「脆弱性」により決定される。そこで、下図に示すように、広域における多様で高密度なネットワークセンシングを実現して、リスクの統合的評価を目指す。具体的には、

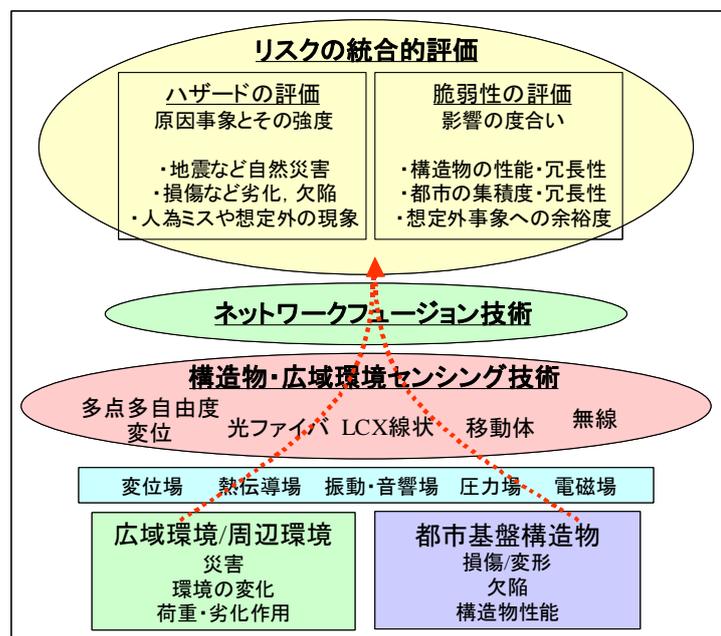
A. 「RLI(リアルタイムロックインイメージング)多点多自由度変位センシング」と「PPP(パルス・プリポンプ)光ファイバ分布センシング」と既存のセンサから構成される高密度高精度構造物センシング、「無線・有線センサ・ネットワーク」と「LCX線状センシング」からなる広域社会基盤・環境センシング

B. 線状、空間分散、ならびに移動体の多様なセンシングプラットフォームの連携によって、時空間にフレキシブルな情報伝達を可能とし、迅速かつ信頼性の高いセンシングの達成を支援する「ネットワークフュージョン技術」

C. 通常ノイズとして扱われる環境外乱を利用した、低エネルギーかつ高信頼性の「セミアクティブ原理」に基づく「ハザード・脆弱性の統合的評価によるリスク監視・マネジメント技術」

の開発を目標に研究を進め、センシングシステムとして統合化する。フィールドにおける検証を各研究フェーズで取り入れ、実用性を高めた研究開発を目指す。

具体的には、建物、高架橋を含む橋梁に、実際にモニタリングシステムを実装し、その有意性を社会に広く知らしめ、その有用性を広く社会に伝え、この分野の一層の振興を図る。



## (2)新たに追加・修正など変更した研究構想

研究の方向性については大きな変更はない。

しかし、研究を開始する時に考えていた状況と異なる状況が判明・発生したために、あるいは中間審査においていろいろとご指摘いただいた点を踏まえ、具体的な研究内容に変化が生じたところはいくつかある。

研究の集中化と社会への実装の重要性については理解していたつもりであったが、中間報告においても強調して指摘され、建物の地震時を主たる対象としたモニタリング、橋梁モニタリングに後半は力点を移した。当初は、東京大学地震研究所などの校舎を主なサイトとしていたが、芝浦工業大学の豊洲校舎(免震高層建築)にフィールドを移し、本研究での成果を様々な形で実現するセンサ・ネットワークを構築することができ、2011年3月11日を迎え、本震、その前後の前震、余震のデータを得ることができたのは工学的に極めて幸運であった。これまでに我が国の免震高層建物では初めての密な、振幅レベルの高いデータセットであり、様々なインパクトをもたらすことになると期待される。

また、RLI(リアルタイムロックインイメージング)多点多自由度変位センシングについては、安価な光源としてレーザダイオードをそのまま使う方法では干渉性が低く干渉パターンとして多重零点光ビームの複素波面を得ることが困難であることが判明し、光源の小型化低コスト化および距離方向の精密計測には課題が残されることになった。ただし、それを補う新たな手法が提案されており、小型低コストな代替光源が利用可能になるものと期待しているが、研究的には、困難な課題の解決に時間を要し、少し遅れが生じてしまった。

LCX線状センシングによる降雨の空間時間領域での計測については、本研究で世界でも初めてチャレンジするもので、初期の段階では様々な苦勞を重ねた。中間評価においては、研究全体の方向性の視点からウェイトを落とすように指示を受け、そのような対応を行った。結果的に妥当な判断であったと思われる。独自のアプローチで研究を進め、かなりの成果を挙げられたことは自信につながる事となった。

光ファイバ技術を応用した分布センシングについては、研究開始当初、PPP-BOTDAの高速化目標を1Hz程度のリアルタイムレベルとしていたが、研究を進めていく中で、処理アルゴリズムの新たな改良方法の考案等により飛躍的な高速化が可能となり、構造物の動的ひずみ測定を実現できるようになった。この成果により、モデル実験や実構造物に対する実装実験の目標に動的センシングに関する初歩的な検討を加え、さらに開発技術の実用性を高めることにつながった。

### § 3 研究実施体制

#### (1)「A. リスク統合センシング(東大・藤野)」グループ

##### ① 研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
藤野 陽三	東京大学大学院工学系研究科 社会基盤学専攻	教授	H18.10～
長山 智則	東京大学大学院工学系研究科 社会基盤学専攻	講師	H18.10～
西川 貴文	東京大学大学院工学系研究科 社会基盤学専攻 (23年4月からは長崎大学 工学部助教)	特任助教	H20.4～
水谷 司	東京大学大学院工学系研究科社 会基盤学専攻 (現在, 日本学術振興会特別研 究員(ポスドクトラルフェロー))	博士学生	H20.4～
紺野 克昭	芝浦工業大学工学部土木工学科	教授	H21.4～
水野 裕介	山口大学大学院理工学研究科環 境共生系学域安全環境分野 (元, 東京大学大学院工学系研 究科社会基盤学専攻所属)	講師	H18.10～H20.3 (H20.4より「グルー プ協力者」として参 加)
阿部 雅人	BMC 株式会社	主幹研究員	H18.10～
Dionysius Manly Siringoringo	東京大学大学院工学系研究科 社会基盤学専攻	特任助教	H19.1～H19.3
Su Di	東京大学大学院工学系研究科 社会基盤学専攻	特任助教	H19.9～
Evan Monroig	東京大学大学院工学系研究科 社会基盤学専攻	博士学生 (当時)	H18.10～H21.3
小国 健二	東京大学大学院工学系研究科 社会基盤学専攻	准教授	H18.10～H21.3
長谷川 信幸	東京大学大学院工学系研究科 社会基盤学専攻	修士学生 (当時)	H18.10～H19.3
青木 茂	東京大学大学院工学系研究科 社会基盤学専攻	博士学生 (当時)	H19.1～H19.3

##### ② 研究項目

- (1) モニタリング, データ伝達・処理に関わる実用性の高いシステムの構築
- (2) 都市基盤リスクの統合的評価手法の確立
- (3) 共同研究者グループの開発する要素技術の統合

#### (2)「B. ネットワーク(東大・中山)」グループ

##### ① 研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
中山 雅哉	東京大学情報基盤センター	准教授	H18.10～
齋藤 健太郎	東京大学新領域創成科学研究科 基盤情報学専攻	博士学生 (当時)	H19.4～H20.3

② 研究項目

センサノードにおける観測データ収集のためのネットワーク技術の研究開発

(3)「C. 多点多自由度変位センシング(東大・安藤)」グループ

① 研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
安藤 繁	東京大学大学院情報理工学系研究科 システム情報学専攻	教授	H18.10～
栗原 徹	東京大学大学院情報理工学系研究科 システム情報学専攻	助教	H18.10～
来海 暁	大阪電気通信大学情報通信工学部情 報工学科	准教授	H18.10～
武田 光夫	電気通信大学電気通信学研究科情報 通信工学専攻	教授	H18.10～
岡 和彦	北海道大学大学院工学研究科応用物 理学専攻	准教授	H18.10～
魏 大比	東京大学大学院情報理工学系研究科 システム情報学専攻	博士学生 (当時)	H19.1～H20.3
佐藤 世智	東京大学大学院情報理工学系研究科 システム情報学専攻	博士学生	H19.1～
草野 陽佑	東京大学大学院情報理工学系研究科 システム情報学専攻	修士学生 (当時)	H19.1～H20.3
藤本 生松	東京大学大学院情報理工学系研究科 システム情報学専攻	研究員	H19.5-H19.11 H20.5～H20.9
小野田 浩之	東京大学大学院情報理工学系研究科 システム情報学専攻	技術補佐員	H20.4～H21.3
尾崎 沙世	東京大学大学院情報理工学系研究科 システム情報学専攻	修士学生 (当時)	H20.4～H21.3
斉 宇嵐	東京大学大学院情報理工学系研究科 システム情報学専攻	博士学生	H22.4～
知久馬 成美	東京大学大学院情報理工学系研究科 システム情報学専攻	修士学生 (当時)	H22.4～

② 研究項目

RLI(リアルタイムロックインイメージング)多点多自由度変位センシングの研究

(4)「D. 光・電波応用システム(三菱電機)」グループ

① 研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
仲嶋 一	三菱電機(株)先端技術総合研究所	グループマネージャー	H19.7～
平位 隆史	三菱電機(株)先端技術総合研究所	グループマネージャー	H18.10～ H20.6
鷺見和彦	三菱電機(株)先端技術総合研究所	部長	H20.6～
鹿井正博	三菱電機(株)先端技術総合研究所	主席研究員	H18.10～ H19.6 H21.10～
猪俣憲治	三菱電機(株)先端技術総合研究所	主席研究員	H18.10～ H19.9

			H21.10～
鈴木 直彦	三菱電機(株)先端技術総合研究所	主席研究員	H18.10～ H21.1
中島 利郎	三菱電機(株)先端技術総合研究所	主席技師長	H19.7～
白附 晶英	三菱電機(株)先端技術総合研究所	主席研究員	H19.7～H21.3
渡辺 正浩	三菱電機(株)先端技術総合研究所	主席研究員	H19.10～
佐野 恵美子	三菱電機(株)先端技術総合研究所	研究員	H20.4～
岡 徹	三菱電機(株)先端技術総合研究所	グループマネージャー	H20.10～ H21.9
辻田 亘	三菱電機(株)先端技術総合研究所	研究員	H20.10～

② 研究項目

- (1) LCX による降雨・強風計測アルゴリズムに関し、IQ 平面の変動解析法による侵入者と環境変動の識別アルゴリズムを構築する。
- (2) LCX による計測データ伝送方式に関し、ローノイズアンプ開発により、伝送距離、伝送容量、伝送速度の検証を行う。

(5)「E. 光ファイバ(茨城大学)」グループ

① 研究参加者

	氏名	所属	役職	参加時期
○	呉 智深	茨城大学工学部	教授	H18.10～
	原田 隆郎	茨城大学工学部	講師	H18.10～
	岩下健太郎	名城大学理工学部建設システム工学科(元、茨城大学工学部所属)	助教	H18.10～H21.3 (H21.4よりグループ協力者)
	岸田 欣増	茨城大学工学部	共同研究員	H18.10～
*	彭 昌海	茨城大学工学部	産学官連携研究員	H19.7～H20.3
	張 浩	茨城大学大学院 理工学研究科情報・システム 科学専攻	博士学生(当時)	H18.10～H20.3
	N.H.M. KAMRUJJAMAN SERKER	茨城大学大学院理工学研究 科	博士学生	H20.4～
	黄 璜	茨城大学大学院 理工学研究科情報・システム 科学専攻	博士学生	H21.4～

② 研究項目

- (1) 分布光ファイバセンシングの精度向上に関する研究
- (2) 都市基盤の分布型構造ヘルスマonitoring手法の構築

## § 4 研究実施内容及び成果

### 4. 1 リスク統合センシング(東京大学・藤野)グループ

#### (1)研究実施内容及び成果

##### ① 振動センシングシステムとセンサ・ネットワークの構築, 集録データの解析

東京大学構内における建物の地震応答計測を2006年12月より開始し,「B.ネットワーク(東大・中山)」グループと連携を取り,その計測記録を継続的にファイルサーバおよびデータベースへ蓄積した.計測記録は広く学術・教育目的で利用できるようインターネットを通じて公開している.

地震応答を集録するシステムとして,初年度には図1に示すプロトタイプシステム(Model I)を開発した.これは,小型PCにA/Dコンバータを介して加速度センサを接続し,GPSから取得する時刻・位置情報とともに,計測ノードの振動計測を実現するものである.データの蓄積・解析を担う小型PCは既設のネットワークを経由した遠隔操作が可能であり,センサ・ネットワークの構築に非常に有用である.また,非常にコンパクトであるためシステムの運搬・導入・運用が容易なことも大きな特長のひとつである. Model I を利用したフィールド計測実験では,複数の東京大学校舎の地震応答を計測し,モード解析や周波数解析を行った結果,建物の耐震補強前後での振動モードの変化,固有振動数の変化傾向から,耐震補強の効果である剛性の増加を定量的に評価することに成功した.

さらに,第2年度からは,計測精度とシステムの運用性の向上を目的に,組込PCとリアルタイムOSを用いたロバストな計測機器の開発に取り組んだ.図2に示す2世代目となるこのシステムは, Model I のデータ解像度を14bit から16bit へ向上させることで,計測分解能を格段に向上させたものである.また,組込システムを用いることにより,システムの安定性が向上するとともに,計測システム全体の簡素化,省電力化,小型化を実現している.



図1 振動計測システムプロトタイプ「Model I」



図2 振動計測システム「CI-740」

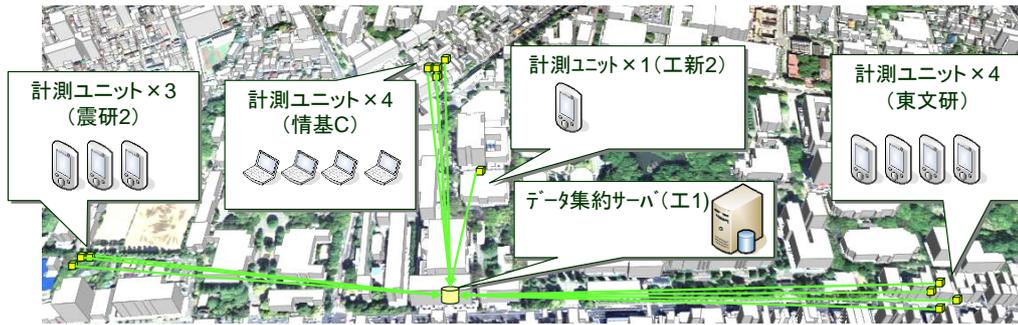


図3 東京大学キャンパスにおけるセンサネットワークの構築

これらの開発した振動計測ユニットをキャンパス内の各所建物に設置してセンサ・ネットワークを構築した(図3)。これを用いて長期的に振動モニタリングを実施し、有感地震に対する応答解析によって耐震性能の評価や構造損傷の検知・同定手法を構築するための実データを蓄積した。データの転送は既設の学内LANによって行い、データ管理・配送技術についても安定化や合理化について検討を行った。地震研究所の耐震補強の工事中の計測では、補強工事の進捗とともに、固有振動数の増加が明確に確認された。また、実際の地震応答では、想定以上にねじれ振動が発生しているのが、地震研究所、情報基盤センターなどの応答観測結果において明らかとなった。

② センシング技術の実装化とモニタリングデータの利活用

センシング技術と構造性能評価手法、モニタリングデータの利活用方法の実装化へ向けて、時刻同期とデータ転送に主眼をおいた高精度センサを開発した。また、ケース・スタディとして建屋内地震応答高密度計測を、東京測振(株)とも協力して実施した。ケース・スタディの対象は、図4および図5に示すL字形の大規模な偏心構造、かつ免震構造である芝浦工業大学豊洲校舎である。

LAN同期センサを図5のように配置して建屋内地震応答高密度計測を行い、構造物の安全性確認のためのデータ解析手法および準リアルタイム地震・耐震性情報発信システムの開発に取り組んだ。本研究でこれまでに得られた結果を次にまとめる。

- 地震記録の集積およびWEB公開を行っている。公開例を図6に示す。表の各欄には、全加速度計(25基)の最大加速度, 最大速度, 最大変位, SI値, 計測震度の結果が, 地震ごとにリンクされている。
- 建物内の震度分布を図化し, 場所による揺れの大きさの違いなどを把握できるようにし, WEB



図4 テストフィールドとした芝浦工業大学校舎(豊洲)

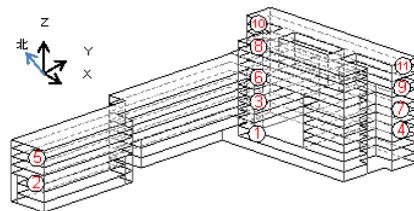


図5 センサ配置図

No.	観測点	観測器	観測器仕様		観測器の位置	観測器の向き	観測器の設置高さ	観測器の設置位置	観測器の設置状況	備考
			観測器の型番	観測器の容量						
001	001	001	001	001	001	001	001	001	001	001

図6 地震観測記録のWEB公開例



図7 各棟の震度分布図例(WEB公開)

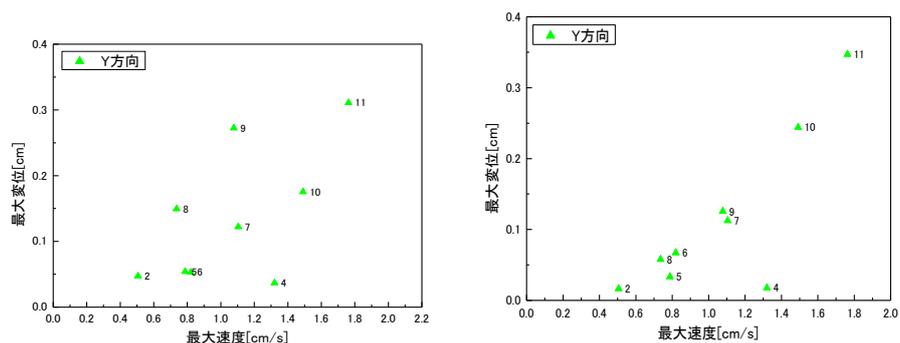


図 8 地盤応答を考慮した Y 方向最大変位と最大速度の関係 (左：地盤特性を考慮しない  
右：地盤特性を考慮)

公開している(図7). 利用方法としては、建物利用者に対して、建物の揺れ方の認識を深めてもらい、地震についての関心を更に深めてもらうことや、1階に常駐する防災センター員が建物上部での揺れを把握すること、などが挙げられる。

特に、311 東北太平洋地震(M9)による免震構造における揺れが高密度な記録としてとれ、その後の余震も継続的に記録できたことは、極めて稀なことであり、これまでの免震建物の記録として最も貴重なものの一つになると考えられる。これまでに一次解析を行い、土木学会、日本建築学会の年次学術講演会等においてその成果と知見を発表した。その後も継続してさらなる入念な解析を進めている。

### ③ 構造損傷同定手法の確立へ向けた理論的アプローチ

既設都市施設の性能・リスク評価の指標としては、最大変位、残留変位、塑性変形量などの変位量が、性能規定設計の枠組みと適合し有効性が高い。しかしながら、変位計測には固定点が必要とされることから、広域の都市社会基盤システムに対して、効率よく変位を計測することは困難である。一方、加速度などの慣性計測は固定点を必要としないため、現状のセンシング技術で、簡易かつ安価に大規模なシステムに導入可能である加速度計測結果から変位量を推定する方法としては、従来から、2 階積分を前提とした各種手法が提案されているが、演算が複雑で計算量が大きいことに加えて、雑音や誤差の影響によって、信頼性・精度が大きく低下することが指摘されている。

そこで、本研究では、慣性計測を活用し、ランダム振動理論を援用や、地震時の応答加速度と変位間にある理論的關係等を利用することで最大変位を推定する、センサ上での実装が可能な計算効率が高い手法を開発した。

地震時の性能評価を行うための指標としては、最大応答変位が有効である半面、変位計測は固定参照点が必要であることから、広域におけるセンシングが困難である。そこで、固定点不要で設置が容易な慣性計測によるセンシングに、不規則振動理論を援用した最大変位推定法に関する研究を進めている。本年度は、提案手法を芝浦工業大学校舎の地震観測に適用するとともに、実装を念頭においた改良を進めた。

図 8 には、提案手法によって推定した地動最大速度と最大応答変位の相関を示した。地動最大速度は地震入力強度の、最大応答変位は建物の性能指標である。左図に示したとおり、両者の相関は必ずしも高くなかったが、地盤の動的特性を考慮して理論を改良したところ、右図のように高相関の結果が得られ、指標としての有効性が明らかとなった。

また、最大応答変位の推定にあたっては、地震波形全体のパワースペクトルを利用するアルゴリズムであったため、推定に先立って地震の発生と終了を判別する必要があった。即応性の更なる向上と、波形判別に伴ってデータ管理が煩雑となることを避けるため、アルゴリズムを改良し、地震終了前であっても、リアルタイムに最大応答変位を推定可能とした。具体的には、区分的にデジタルフィルタを適用することで、パワースペクトルの概略分

布をリアルタイムに算定するアルゴリズムを開発し、組み込むことによって、リアルタイム推定を実現したものである。

図9は、リアルタイム・アルゴリズムによる変位推定精度を数値シミュレーションによって検証したものである。青線はシミュレーションによる最大応答変位で、赤線でスペクトルとあるのは、全波形のパワースペクトルを用いた推定結果である。緑で示したリアルタイム推定に

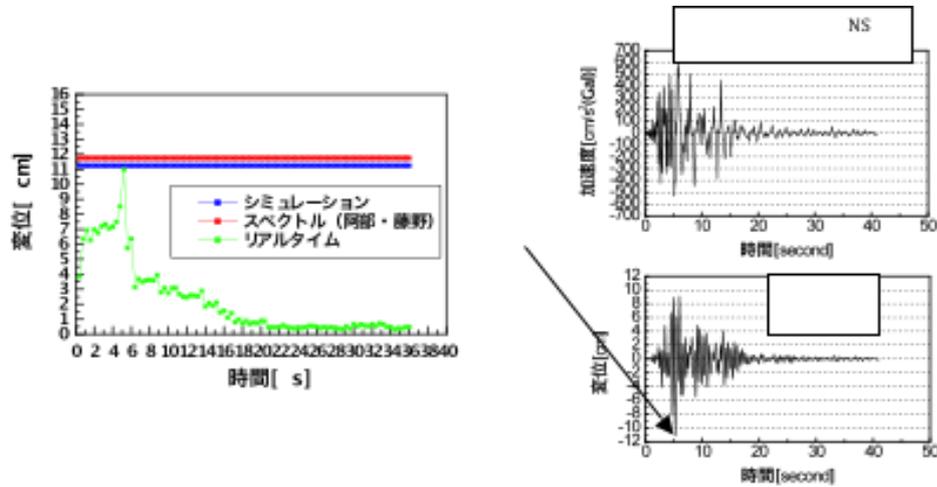


図9 変位推定結果比較

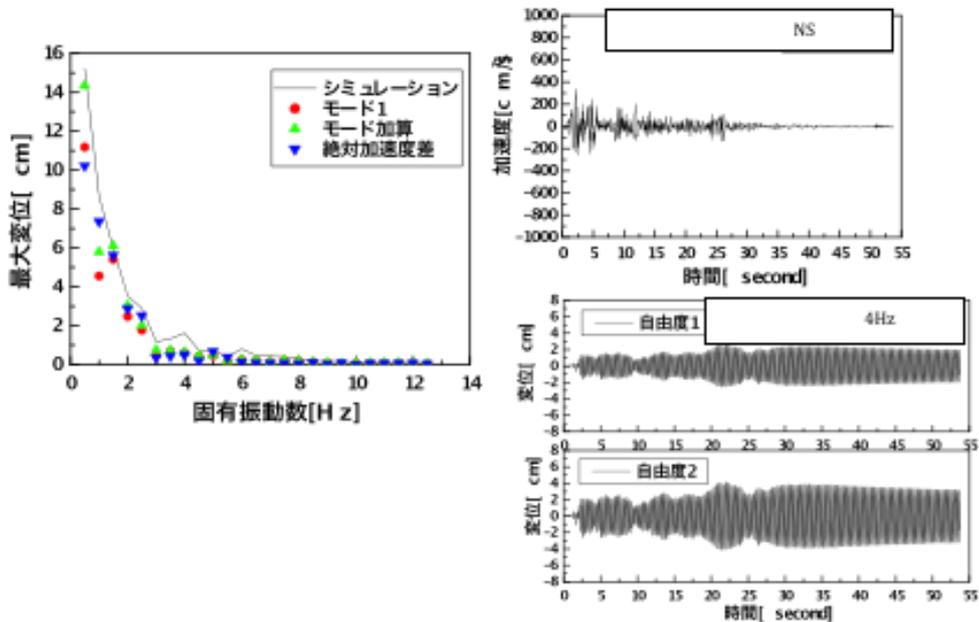


図10 相対加速度を利用した変位推定

よる最大値が良好な結果を与えていることがわかる

また、設計のクライテリアとして利用されている建物各層の層間変位を、同様に算出する方法として、相対加速度を利用した変位推定方法を構築した。さらに、建物等の変位応答においては高次モードが寄与しえることを考慮し、多自由度系への拡張を行い、シミュレーションにより手法の有効性を確認した。図10に2自由度系のシミュレーションによる検証結果を示す。

また、**図 11** は、芝浦工業大学サイトにおけるセンサ間から求めた相対加速度を利用して求めた最大変位と、従来の方法によって絶対加速度を利用して求めた最大変位を比較したものである。いずれも良い推定結果を示しており、提案手法の有効性が示された。

さらに、強風時の応答による建物の振動特性の評価についても、パワースペクトル分布を用いた推定法を構築して検討を行った。**図 12** は、横軸に加速度応答の大きさ、縦軸に固有振動数の推定結果を示したものであり、応答が大きくなるにつれて、ばらつきが減じ、より良好な推定が可能となることがわかる。

性能評価方法として、**図 13** に示すように階層ごとに層間変位を整理することで、設計クライテリアに照らした性能評価が可能となる。**図 14** に示すような累積スペクトルを利用した振動数の同定と合わせて、階層、方向、また設置場所(研究棟、教室棟)等による応答特性の相違を考慮しながら、性能評価方法を実装することが可能である。

このように、芝浦工業大学における計測と検証を通して、実装を念頭に置いた変位推定法の改良、具体的には、

- ・地盤の影響の考慮
- ・リアルタイム化
- ・層間変位推定
- ・強風観測記録の活用

に成功した。また、評価方法を見据えた指標の整理方法について検討を行った。

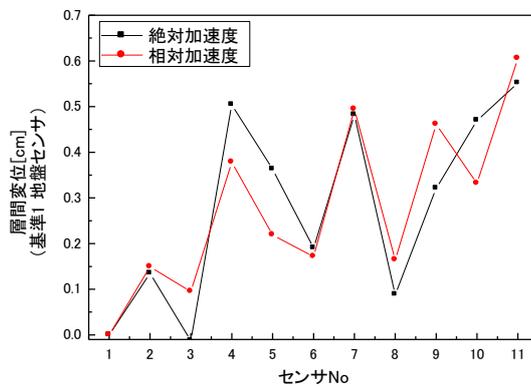


図 11 推定結果 2010 年 11 月 30 日 12 時 26 分 Y 方向

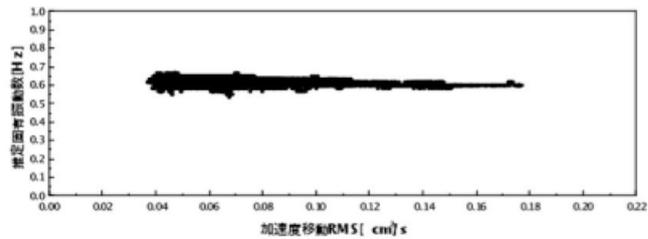


図 12 移動 RMS と推定固有振動数の関係 (X 方向)

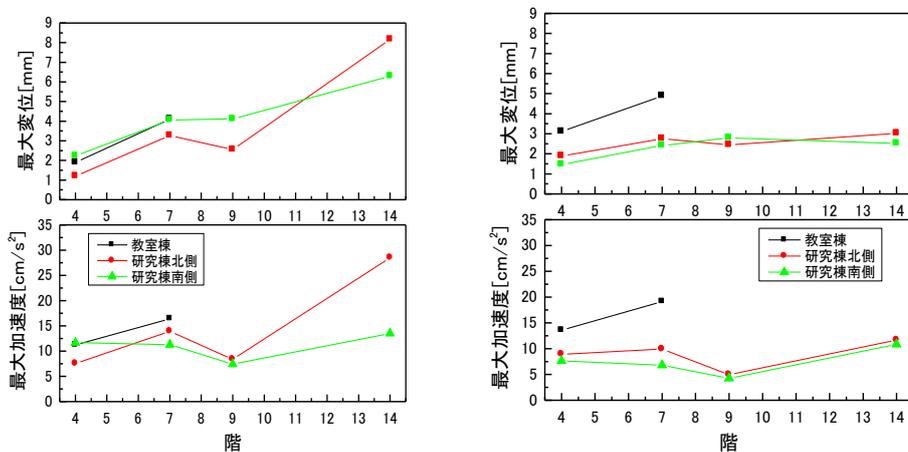


図 13 階層別の層間変位評価 (左: Y 方向 右: X 方向)

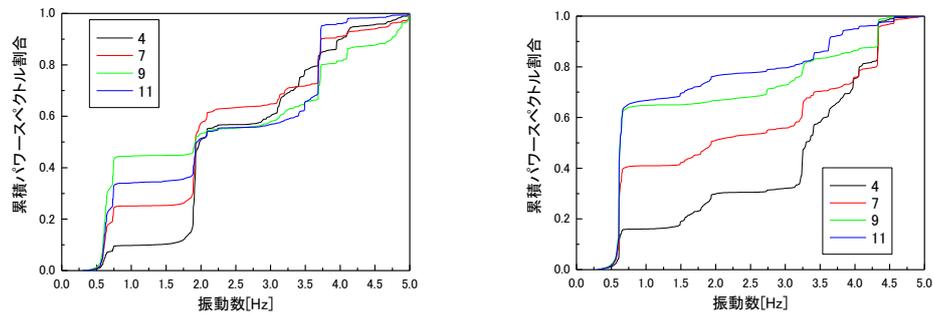


図 14 固有振動数の評価 (左: Y 方向 右: X 方向)

#### ④ 移動体との協調センシング

都市基盤において、災害・事故対策や情報収集は現場で行う必要があることに着目し、車などの移動体をセンシング・情報処理・運用の主たるプラットフォームと位置づけてシステムの一部として組み込むための研究を行ってきた。交通基盤である、高速鉄道高架橋、高速道路高架橋の一連の短期モニタリングを実施し、経験を積むとともに、橋梁間の応答の個体差などの工学的に極めて有用な情報を得ることができた。

さらに、高架橋の常時微動と自動車・列車による交通振動あるいは地震応答を、効果的に配置したワイヤレスセンサを用いて計測するシステムの構築にも取り組んでいる。高精度な振動データを迅速に取得するため、各センサの制御、センサ間の同期、通信・データ転送等のマルチホップ・マルチセル無線ネットワーク技術について新しい方式を開発し、フィールドで検証を行った。

#### (2)研究成果の今後期待される効果

- 重要高層建築物で地震計測はこれまでも行われてきたが、センサ密度も低く、オフラインで、その結果を建物、エレベータなどの施設ならびに中にいる人間のリスクマネジメントなどに使用する例は皆無であった。ネットワーク・計測技術を利用して、高密度・高精度計測でかつ取得データの利活用も含めたシステムの構築を目指している。
- 今回の芝浦工大豊洲校舎でのケース・スタディは、緊急地震速報(気象庁)の取り込みも想定しており、また、地震時応答をリアルタイムで処理し、校舎内のディスプレイを通じて応答レベル、被害の有無、避難の必要度などを知らせるもので、リスクマネジメントと連動した世界初のシステムになると思われる。また、今回の高密度詳細計測は、近年、幅広く使われてきている免震構造の地震時挙動の把握、さらには免震構造設計の進展にも貢献するものである。
- そこで用いるセンサシステムは、LANを用いた汎用的でかつ同期性に優れたものであり、普及性に優れている。特に、芝浦工大で用いるものは現在市販の中で最もセンサとして優れているものに、同期性を埋め込むもので、今後、社会基盤に関する各種用途への拡張が期待できるものである。
- 高速鉄道、高速道路高架橋の交通振動下での詳細な挙動把握はこれまでほとんど行われていない。ワイヤレスモニタリングシステムなどの計測技術の利用のほか、移動体を含めた系のシミュレーションにより、一連の短期モニタリングを通して、径間間の応答個体差の検知や解明をしており、工学的価値が高い。
- 直接計測や高精度な推定が困難とされてきた変位応答を、ランダム振動理論の援用により、計測が容易な加速度から推定する手法を開発した。既存都市施設の性能評価に

は変位量の利用の有効性が高いことから、その利活用が期待される。

- 以上のようなことから、われわれのチームは都市基盤モニタリングの世界拠点とみなされており、内外の評価も高く、国際会議や国内集会での基調講演の依頼が非常に多い。2700 ページを超える構造ヘルスマニタリング百科事典をヨーロッパ、北米の方と藤野が編集者となってワイリー出版社から平成 21 年春に世界で初めて刊行し、また、学会賞（土木学会、アメリカ土木学会）や国からの章を授与されたのも、高い活動が評価された証と考えている。
- 本研究は、フィールドにおいてセンサ・計測工学、情報工学、通信工学、土木工学、建築学等を統合させることによって実用的なシステムならびにマネジメントを提案するものである。現在、室内実験や理論研究を中心として国際的に熾烈な研究開発競争が繰り広げられているヘルスマニタリングの分野において、実装・実用段階における国際的なリーダーシップを確立することが期待される研究である。

#### 4. 2 ネットワーク(東京大学・中山, 同・藤野)グループ

##### (1)研究実施内容及び成果

本研究では、構造物に加速度センサ・変位センサ・歪センサ・風計測センサなどを高密度に配置して、高精度の変位測定を行うセンサ群を都市規模に配置した構成を研究対象としており、大量のセンサからの情報を常時リアルタイムに収集しながら災害損傷検出・被害予測や復旧予測などで利用できるシステム構成を取る必要がある。都市規模に分散配置されたセンサノードからの観測データを収集するためには、単一な LAN で構成することはできず、幾つかのセンサ群で LAN を構成し、それらを広域網で接続する必要がある。この際、独自の広域網を構築する方法も考えられるが、災害時の代替経路の確保も行うと維持コストが膨大となり現実的ではないため、本研究では既存の TCP/IP プロトコルを利用してセンサ群を接続する構

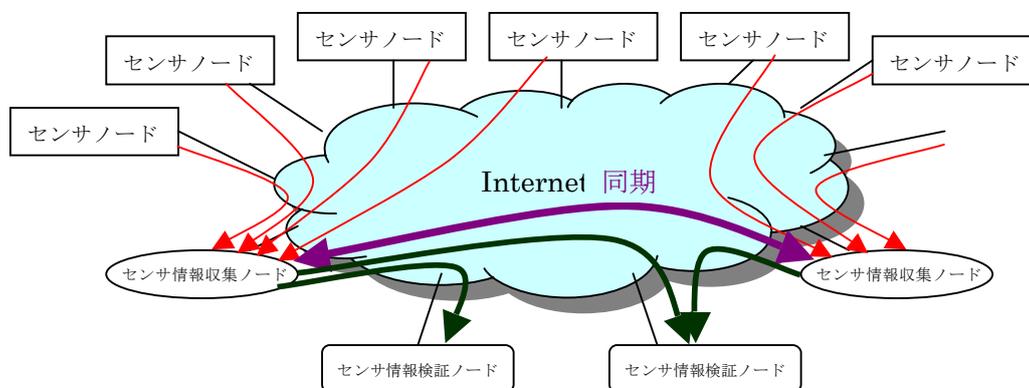


図 15 センサ・ネットワークのシステム構成

成とした(図 15)。

研究項目は以下の2つに大別されるが、それぞれの技術に対して、多種のセンサを埋め込んだセンサルームを構築し基礎的な検証を行うとともに、東大キャンパス、高速鉄道での実証実験により、実用性を高めることとした。

- 高密度・高精度の構造物センシング情報および広域社会基盤・環境のセンシング情報をセンサ情報収集ノードに効率的な集約技術に関する研究

センサ情報収集ノードは分散データベースの働きを持ち、主に平時を想定し、定期的にコンテンツの同期をはかりながらセンサノードの情報を収集する働きを持つ。

- センシング情報収集ノードからセンシング情報検証ノードへの配送技術に関する研究

センサ情報検証ノードは、センサ情報収集ノードに蓄えられたセンサ情報のうち解析に必要な情報を集めて災害損傷検知・被害予測や復旧予測などを行うノードであり、アプリケ

ーション毎に構築される。特に緊急時においては、検証ノードはセンサ情報収集ノードよりも周囲の極めて近くにあるセンサノードのセンサ情報を優先して情報を集める機能を持たせる。

初年度および第 2 年度は、膨大な情報量の集約・配送技術の理論構築とシミュレーションおよび移動を用いたセンサ情報の集約を行うセンサルームにおける通信プロトコル、分散処理技術の実装と検証を行い、本研究で A グループが開発するセンサノードに実装した。第 3 年度以降は東大キャンパス、高速鉄道での実証実験に向けた集約・配送技術の改良とその検証を図った。特に、A グループ項で述べた芝浦工大におけるセンシング技術の実装化とモニタリングデータの利活用のケース・スタディでは、特に計測システムのネットワーク設計とデータの配送・集約に関して、これまでの研究成果の実装を図りながら協力体制のもとで推し進めた。

## (2)研究成果の今後期待される効果

本研究で対象とするインターネットなど TCP/IP ネットワークを通じたセンシングデータの配送・集約に関しては、研究事例や実応用例が多く存在するが、東大キャンパスでの建物の地震応答計測や高速鉄道での実証実験では、非常に実用性の高い分野にネットワーク技術を展開していることと、扱うデータに緊急性や信頼性に対する要求が高いことが特徴として挙げられる。建物の地震応答計測ではデータの時間密度が高く、また継続的に長期間データを運用する必要がある。高速鉄道での計測データは、汎用の通信網を使って高速移動体を対象に安定した通信を実現することに技術的な課題がある。本研究は、建物の地震応答計測や高速鉄道の施設モニタリングといったアプリケーションに特化しつつ、汎用的で安定したネットワーク環境を構築することで、既存技術の問題点の抽出や各要素技術の組み合わせを実証することができる点で研究としての優位性が期待される。

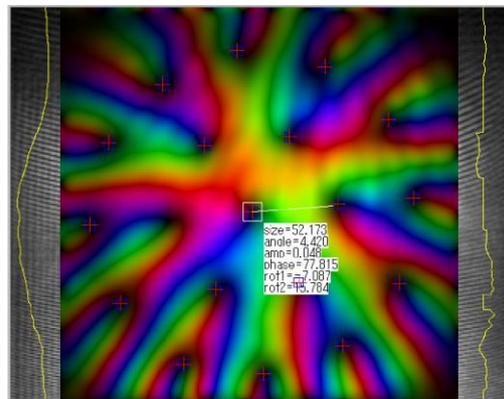


図 16 多重零点ビームの振幅位相分布の検出結果と位置決め結果

## 4.3 多点多自由度変位センシング(東京大学・安藤, 三菱電機)グループ

### (1)研究実施内容及び成果

初年度において、自由空間の遠距離を細いビームを保ちつつ伝搬する波面で 6 軸の静止変位を検出する原理の基礎理論を構築し、時間相関イメージセンサによって検出した振幅位相分布から、レーザービームに垂直な変位と同軸回りの回転変位の 4 軸の変位を最適検出するパターン処理方式の開発と光学台上の基礎実験システムでの検証を行い、残り 2 軸に関しても測定可能性を基本的に確認する成果を得た。平成 20 年度においては、この成果を受けて、RLI(リアルタイムロックインイメージング)多点多自由度変位センシング法を実際に近い環境で適用可能とするための技術の確立を目標にした。すなわち、6 軸変位の計測にほぼ最適と思われる多重零点ビー

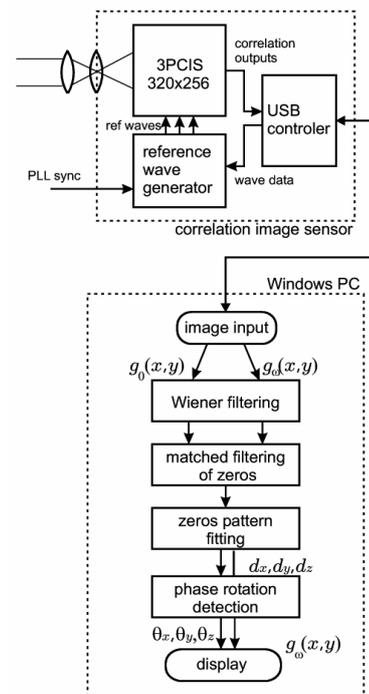


図 17 検出解析システムのブロック図

ムとして、 $1+6+12=19$  次で断面光量分布が平坦の波面を設計し、このホログラムを作成し、まずその検出の容易さを実験により確認した(図 16)。続いて、このビームから変位計測のパラメータを実時間検出するための複素画像解析アルゴリズム(図 17)を開発し、これを実装した。

定量的評価実験は現在も実行中であり、これまでにz軸まわりの角度変位の検出感度が 10 倍以上に向上していること、横変位、角度変位の精度とも昨年度報告よりも格段に向上していること、相対変位の検出感度でナノメートルレベルが可能であること、空気の擾乱に対してもほぼ安定した追従が可能であることを確認した。さらに、ヘテロダイン干渉光学系が自律的に動作するために必須のヘテロダイン周波数の受動的検出に関して、荷重積分法という新たな数学的方法論に基づき、数学的に厳密かつ代数的に演算可能な周波数推定法の方法論を確立した。また、この原理が推定有効性に関するCramer-Raoの下限をほぼ完全に実現することを示し、高い実用性を有することを確認した。平成 21 年度前半においては、実用化に向けたコストダウンの要点となるヘテロダイン光発生部分への新たな方式の導入、ノード間の時間・位相同期の問題に関して、前年度で理論的基礎を得た厳密周波数推定法を時間相関イメージセンサで実時間実現可能であるとの見通しを得た。また、1 次のLGビームをガウス透過率分布を持つ開口を透過させることで、ビーム中心と開口中心の相対位置に応じて零点位置がシフトすることが確認できた。このことは中間ノードの並進シフトの計測に用いることができる可能性を有する。

これらの新たな方法の導入によって、同年度後半以降は、実環境での有用性をさらに高め、さらに理論的体系化に向けて国際的な研究交流も含めて着実に進めた。さらに、平成 22 年度には、これらの技術の検証実験に向けて、戸外あるいは廊下等のレンジの取れる環境で動作させるためのソフトウェアおよびネットワークの整備、性能検証と精度校正のための実験環境の構築を行った。このような独自の研究開発に加えて、三菱電機との共同開発体制のもと、平成 21 年度に試作した機能検証機を用いて、経時変化特性、対外部環境特性等の評価を行い、実用化に向けた課題点を抽出するとともに、改良化検討を実施している。さらに、上記改良化検討結果をもとに、フィールド実証実験に向けた機能実証モデルを試作し、特性評価を実施した。三菱電機においては、実用化に向けた多点多自由度変位センサの構成の検討、試作機の設計を行った。現在、試験機を用いてフィールド上での基本性能の検証及び実用段階で発生する課題の洗い出しを行い、対策を検討している。試作機は多点LGビームの生成光学系と相対傾き等を検出する時間相関 CIS カメラを搭載した基幹ノードと、基幹ノードとの相対位置関係、軸方向回転等を検出する時間相関 CIS カメラを搭載した中継ノードから構成される。

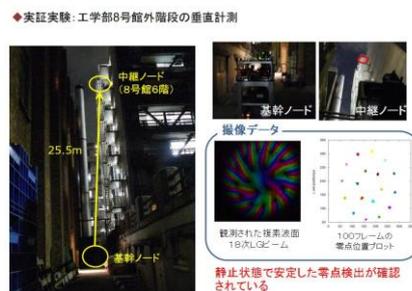


図 18 屋外光ビーム伝送実験

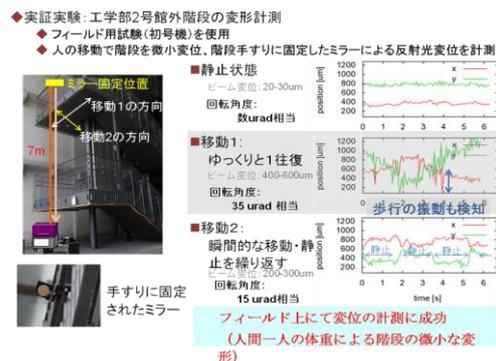


図 19 屋外変位計測実証実験

平成 22 年度には 18 次 LG ビームを用いた試作機初号機を作製し、廊下・戸外での実証実験を行った(図 18)。廊下にてターゲットを変位させ試作機で計測し、実験室内システムと同等の変位検出性能を確認した(図 19)。さらに、東大工学部 8 号館にて 25.5m の距離でフィールド実験を実施、静止状態で安定した零点を確認した。また、東大工学部 2 号館の階段にて、

人の移動で階段を微小変位させ、階段手すりに固定したミラーによる反射光変位を計測した。静止状態、ゆっくりした移動、瞬間的な移動で明らかにビーム変位に差が発生し、階段の微小な変形による変位計測に成功した。ここで、長距離計測の際、18 次ビームのビーム径が拡大し、計測が困難になることが確認されたので、新たに長距離対応を検討した。次数が大きいビームはビーム径が拡大する傾向にあることが判明したが、安定した 6 軸変位計測には 18 次の次数が必要である。そこで、次数を下げた 9 次 LG ビーム同士を干渉させて 18 次 LG ビームを作る新たな方式を考案した。試算によると、18 次 LG ビームのビーム径は 45m 地点で計測可能ビームサイズ 40mm より拡大してしまうが、9 次 LG ビームは 90m 地点で 40mm に達することが判明した。そこで、2つの LG ビームを干渉させる光学系を備えた試作 2 号機(図 20)を設計、作製した。遠距離化にあわせて装置サイズが拡大するため、ファイバ光学系を新規導入し、試作機サイズ拡大を抑えた。実験室内において 2 号機により図 21 に示すような 9 次+9 次 LG ビームの射出・干渉計測に成功した。一方で、光源の小型化低コスト化および距離方向の精密計測には課題が残された。安価な光源としてレーザダイオードをそのまま使う方法では干渉性が低く干渉パターンとして多重零点光ビームの複素波面を得ることが困難であった。共振器を構成し光帰還によりレーザダイオードのスペクトル制御を行うことで可干渉性を高める手法が提案されており、小型低コストな代替光源が利用可能になるものと期待している。またこの光源に波長走査を組み入れることでコストおよびサイズを増加する AOM を使用しない新たな光学系の可能性にも期待できる。

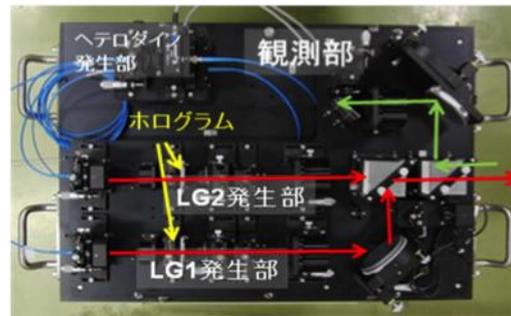


図 20 H23 年度 LG ビーム干渉型フィールド試験装置

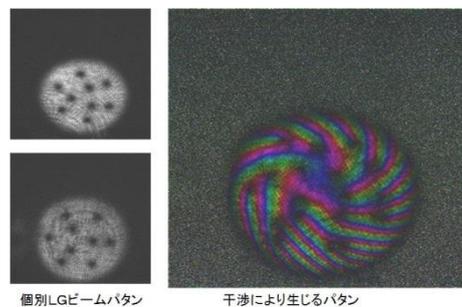


図 21 2 号機による 9 次+9 次干渉パターン

## (2)研究成果の今後期待される効果

構造物の性能診断の最も基本的で最も高い信頼度を有する情報は、連続的に測られた絶対的な静止変位である。このことは論を待たないであろう。しかし従来の計測技術ではそれが容易に実現可能なものではなかった。特に、社会インフラに数多く存在し重要な役割を果たしている線的な 1 次元連鎖構造(道路、線路、橋梁、トンネル、高層ビル、パイプライン等)においては、横方向の微小変形の精密監視手段はないに等しかった。本研究の意義はこれを提供可能にすることにある。すなわち、自由空間を伝搬する複数光ビームにより連結された多点のノードから構成される多点多自由度静的変位センシング技術を開発し、光ファイバ計測手段やネットワーク化された振動計測手段と連携して、従来技術と比較して、画期的に高精度でかつ高信頼性の構造物診断を実現する。

本研究の応用開発例として、建築用のレーザ鉛直基準線生成装置がある。従来の建築用レーザ基準線は、遠距離照射ではビーム径が拡大するために高層ビルでは使用不可能であったが、本装置は多重零点ビームの零点が遠距離でも拡大しないことを応用し、高層建築物の吹き抜けやエレベータなどの長大空間への適用を可能としたものである。例えば、エレベータの昇降路は建築物の上下を貫通する空間であるため、建物全体の歪みや変位が反映される可能性が高いと考えられる。これに着目し、1次元連鎖構造である高層ビルエレベータの変位計測を行うことで、建築物そのものの変位監視を行うなどの応用が考えられる。本研究により、個々の構造物の性能評価を客観的かつ迅速に行う基盤ができ、常時には災害・事故の効

率的予防, 災害・事故時にはリアルタイムな最適対応による損失の最小化が可能となる. このようなシステムに対する要望は, 交通や建築物や土砂災害等の安全のために非常に高く, 本研究成果は交通分野を中心に都市基盤全般に威力を発揮するものである. また, 過去の災害・事故では, 理論で想定された範囲外の事象が原因となっていることが多いが, リスクの継続監視によってそれらの事前検出と未然防止が可能となり, 安全・安心の向上に大きく寄与すると考えられる.

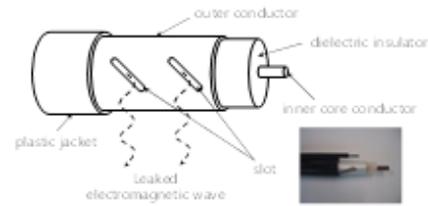


図 22 漏洩同軸ケーブル (LCX) の構造

#### 4. 4 光・電波応用システム (三菱電機, 東大・藤野) グループ

##### (1) 研究実施内容及び成果

近年, 度々甚大な水災害をもたらしている集中豪雨が増加傾向にあり, そのモニタリングの需要が高い. しかし, 既存の気象庁の気象観測システムである AMeDAS や気象レーダーは集中豪雨を的確に捕捉するだけの十分な時空間分解能を有していない.

そこで本研究では, VHF 帯域用の移動体通信用媒体として新幹線軌道沿線などに既に設置されている図 22 に示す漏洩同軸ケーブル (LCX; Leaky Coaxial Cable) に着目した. LCX は同軸ケーブルの外部導体に周期的にスロットが設けられたスロットアレイアンテナの一種である. LCX から漏れる微弱な電界の雨滴によるゆらぎを定量的に評価することで, 豪雨を LCX に沿って線状にかつリアルタイムにモニタリングする技術を確立することを研究目的とする.

平行に配置した送受信 LCX 対に周波数掃引を掛けて連続波信号を送受信し, 出力の遅延プロファイル(時間領域応答)から LCX に沿った各点での応答をリアルタイムに推定した. 送信 LCX に動作させる漏洩電磁界のモードには, LCX に付着した雨滴による LCX 極近傍のみの電界のゆらぎを捉えるために, 電磁エネルギーが evanescent (非伝搬) 状態となる「表面波モード」の利用を提案した.

まず表面波モードを動作させた状態で電磁遮蔽された低外来雑音レベルの試験場で人工降雨実験を行った. その結果, 図 23 に示すように受信信号強度の差分ゆらぎの大きさの 1 分間

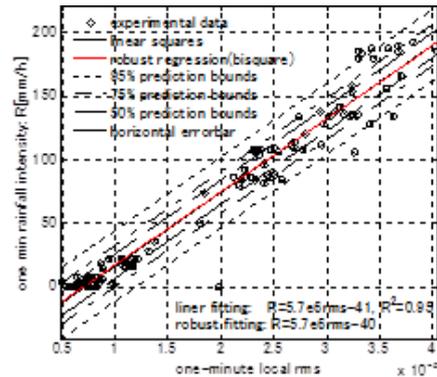


図 23 信号のゆらぎの 1 分間局所 rms と 1 分間人工降雨強度

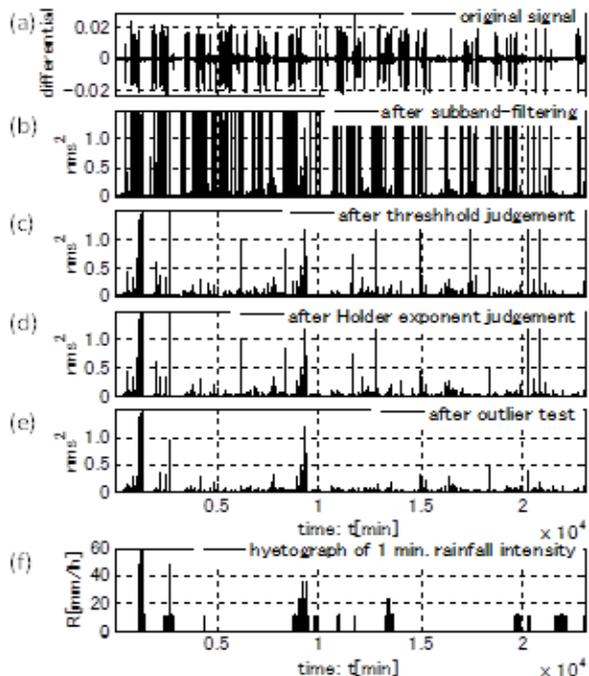


図 24 (a): 信号のゆらぎ (2009/6/15~6/30), (b): 離散ウェーブレット変換により高周波成分を除去した後の 1 分間局所 rms<sup>2</sup>, (c): (b) から大きな衝撃性雑音由来の rms<sup>2</sup> を除去した結果, (d): エッジ由来の rms<sup>2</sup> を除去した結果, (e): 小さな衝撃性雑音由来の rms<sup>2</sup> を除去した結果, (f): の 1 分間降雨強度

局所 rms と 1 分間降雨強度との間に  $R^2=0.95$  の高い線形相関があり、豪雨のモニタリングには表面波モードが有効であることを確認した。一方、屋外では非定常かつ高レベルの連続性雑音と衝撃性雑音とで構成される外来雑音が受信信号に重畳され、信号のゆらぎの大きさと降雨強度との間に相関が見られなかった。そこで、離散ウェーブレット変換を用いたサブバンドフィルタリングにより高周波成分を除去した結果、低周波領域に残った豪雨由来の不連続点の情報を抽出することに成功した。ただし、広帯域特性を有する衝撃性雑音や雑音レベルが急峻に変化する点(エッジ)などの不要不連続点も同時に抽出されたため、これらを排除するアルゴリズムを構築した。不要不連続点排除アルゴリズムは、「ゆらぎの大きさの閾値判定による大きな衝撃性雑音の検出」、「特異性強度(Lipschitz-Hölder 指数)によるエッジの検出」、「パーセンタイルを用いた外れ値判定による小さな衝撃性雑音の検出」の 3 段階で構成される。アルゴリズムを信号に適用した結果(図 24)、1 分間降雨強度約 30mm/h 以上の豪雨をリアルタイムに捕捉することに成功した。

本研究の成果によって、既設の移動体通信用アンテナの一種である LCX に表面波モードを動作させ、構築したアルゴリズムを適用することで、LCX に沿って高時空間分解能で豪雨をモニタリングする技術の基礎を確立できたといえる。

#### 4. 5 光ファイバ(茨城大学・呉)グループ

##### (1)研究実施内容及び成果

##### ①計測機の改良による分布型光ファイバセンシングの高精度化およびリアルタイム測定の実現

光ファイバ計測器の PPP-BOTDA について、従来はひずみ測定精度  $\pm 25 \mu \epsilon$  程度、測定時間 10 分程度 / 1 計測であったが、PPP-BOTDA における、[a]校正ファイバの設置による相対周波数安定度の改善、[b]温度補償抵抗の使用による温度変化に伴う振幅ゆらぎの改善、そして[c]SNR の改善、[d]プリポンプ光の形状およびそれと主ポンプ光間距離の最適化といった調整や改良をより深めて実施することにより、ひずみ測定精度および測定の安定化が図られ、測定精度は  $\pm 25 \mu \epsilon$  の範囲で安定化され、 $\pm 10 \mu \epsilon$  のレベルにも高められる可能性が見出された(図 25)。さらに、[a]SNR の改善、[b]高速偏波スクランブラーの採用、[c]高速周波数制御や高速 AD およびハード加算の採用、そして[d]処理アルゴリズムの改善によるひずみ測定のリアルタイム化、および超高速化が図られ、100Hz でもある程度安定した計測が実現されており(図 26)、

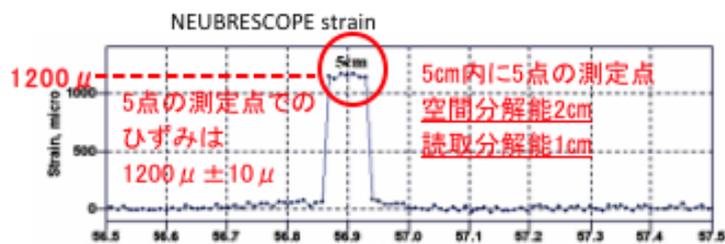


図 25 PPP-BOTDA の高精度化

分布型光ファイバセンシングによるリアルタイム計測および動的測定の実現可能性が示された。そして、リアルタイム計測および動的計測が可能な改良版 PPP-BOTDA の試作機が開発され、実橋梁の SHM に対する適用性の検討を開始した。

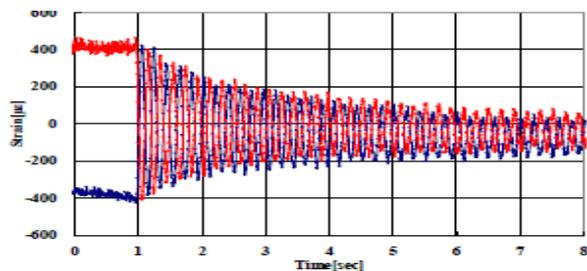


図 26 超高速化 PPP-BOTDA によるひずみ測定例 (100Hz)

② センサの構造形式の改良による分布型光ファイバセンシングの高精度化の実現

連続繊維複合材との複合化により被覆すべりを制御することにより、分布型光ファイバセンシングの高精度化(図 27)、実質的な空間分解能の改善、そして高感度化が図られた。また、実構造物への実装のために、連続繊維複合材との複合化およびプラスチックチューブの埋め込みによる保護、定点接着化により、高精度化光ファイバセンサの長期耐久性や耐候性の高度化構造の創出を行った。そして、製作工程の考案および試験製作を行い、RC 柱、RC 桁モデル実験及び実構造物に対する試験的な実装を行い、実構造物に対する適用性や汎用性が初歩的に示された。

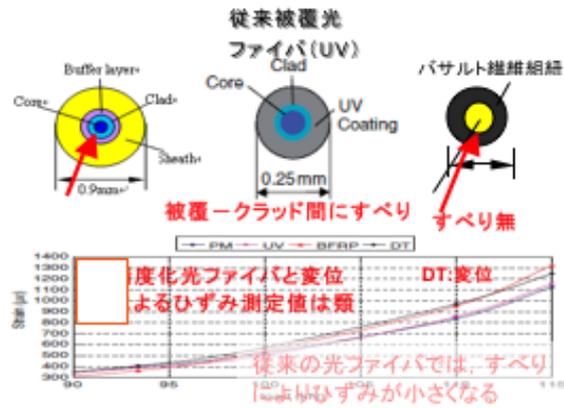


図 27 高精度光ファイバセンサを用いた場合のひずみ測定精度に関する実験結果

③ 分布センシングによる構造物の健全性評価システムの構築

RC 柱、RC 桁モデル実験および実構造物への実装実験で得られたデータにより、分布型のセンシングによる直接的な損傷検知方法、損傷が生じない箇所の歪を参照歪とした間接的な損傷検知方法、そして、分布ひずみ値を用いた逆解析による荷重同定や鉄筋断面積の減少量同定による構造物の健全性評価システムの有意性が初歩的に実証された。

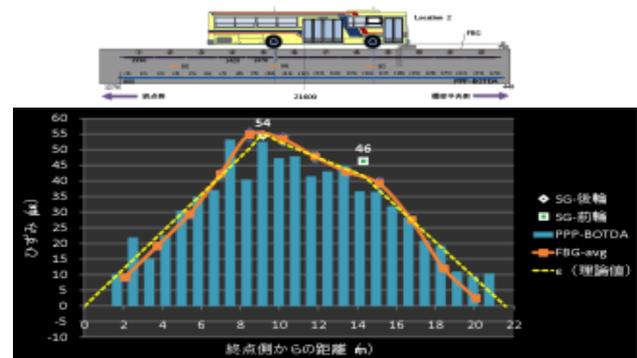


図 28 リアルタイムひずみ測定結果

④ 実橋梁への実装実験

茨城県内の RC 橋梁を選定して、高精度光ファイバの試験実装および高精度化、リアルタイム化、そして超高速化を行った PPP-BOTDA を用いて実施し、計測の安定性や汎用性を検討した(図 28, 図 29, 図 30)。また、光ファイバセンサの設置方法や、定期的な測定・データ取得手法、そして交通量や環境条件の計測を実施して、実装実験の基礎データを取得した。

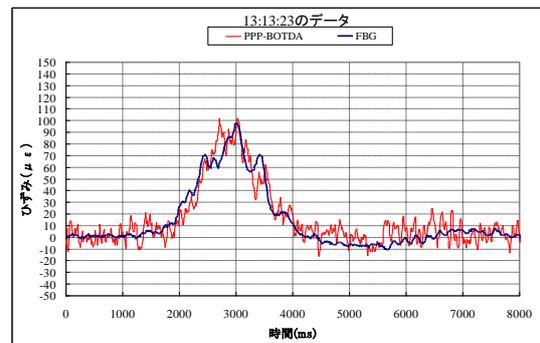


図 29 超高速(100Hz)ひずみ測定結果(FBG(500Hz)による測定との比較)

(2)研究成果の今後期待される効果

今後、茨城県内の橋梁構造物を対象とした実装実験を継続し、時系列的なデー

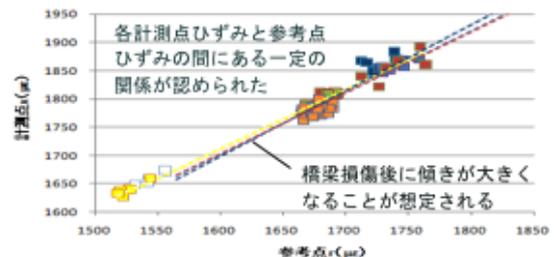


図 30 荷重や振動の影響を受けない損傷評価指標の初歩的な実証実験結果

タ取得を実施する。また、新たに既損傷あるいはこれから実質的な損傷の発生が予測される橋梁(長野県)を選定済みであり、実装実験をH23年度から開始する。これらにより、本開発技術の実用性を高め、高速鉄道橋梁などを対象とした実用化を促進させる。

## § 5 成果発表等

(1)原著論文発表 (国内(和文)誌 41 件、国際(欧文)誌 80 件)

- [A1] Nagayama, T. Sim, S-H., Miyamori, Y., & Spencer, B.F. Jr.: “Issues in structural health monitoring employing smart sensors”, *Smart Structures and Systems*, 3(3),pp. 299-320, 2007
- [A2] 阿部雅人, 藤野陽三: 「取替を考慮した無限期間ライフサイクルコストによる維持管理戦略の評価法」, *土木学会論文集 A*, Vol. 64, No. 4 pp.814-824, 2008
- [A3] Yusuke Mizuno, Evan Monroig, and Yozo Fujino: “Wavelet Decomposition-Based Approach for Fast Damage Detection of Civil Structures”, *Journal of Infrastructure Systems*, ASCE, pp.27-32, 2008.3
- [A4] 石井博典, 藤野陽三, 水野裕介, 貝戸清之: 営業車両の走行時の車両振動を用いた軌道モニタリングシステム(TIMS)の開発, *土木学会論文集 F*, Vol.64, No.1, pp.44-61, 2008
- [A5] 鈴木直彦, 平澤宏祐, 田中健一, 小林貴訓, 佐藤洋一, 藤野陽三; 人物動線データ群における逸脱行動人物検出及び行動パターン分類, *電子情報通信学会論文誌 D*, Vol. J91-D, No. 6, pp. 1550-1560, 2008
- [A6] Myung-Kwan Song, Yozo Fujino: Dynamic analysis of guideway structures by considering ultra high-speed Maglev train-guideway interaction, *Structural Engineering and Mechanics*, Vol. 29, No. 4, pp.355-380. 2008
- [A7] 阿部雅人, 藤野陽三: 「自然災害リスクの特性に関する統計的分析」, *土木学会論文集 A*, Vol.64, No.4, pp.750-764, 2008.11
- [A8] Cho, S., Yun, C.-B., Lynch, J. P., Zimmerman, A.T., Spencer, B. F., and Nagayama, T.: “Smart wireless sensor technology for structural health monitoring of civil structures”, *International Journal of Steel Structures*, 8(3), pp.267-275, 2008
- [A9] Dionysius M.Siringoringo, and Yozo Fujino: “System identification applied to long-span cable-supported bridges using seismic records”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, vol.37, pp.361-386, 2008
- [A10] Muhammad Tariq Amin Chaudhary, and Yozo Fujino: “System identification of bridges using recorded seismic data and its application in structural health monitoring”, *Structural Control and Health Monitoring*, vol.15, No.7, pp.1021-1035, 2008
- [A11] Dionysius M. Siringoringo, Yozo Fujino: “System identification of suspension bridge from ambient response measurement”, *Engineering Structures*, Vol.30 (2), pp.462-477, 2008
- [A12] Nagayama, T., Siringoringo, D. M., and Fujino, Y.: The importance of dense monitoring of long-span bridges for its performance re-evaluation. *Proc., 17th IABSE Congress, Chicago, USA, 2008*
- [A13] Nagayama, T., Spencer, Jr., B. F., and Fujino, Y.: Structural health monitoring using smart sensors, *Proc., 11th East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering & Construction, Taipei, Taiwan, 2008*
- [A14] Asakawa, H., Fujino, Y., Nagayama, T., and Ohsumi, M. : Development and application of road monitoring system using dynamic response of vehicles, *Proc., 11th East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering & Construction, Taipei, Taiwan, 2008*
- [A15] Dinh, M.-H., Nagayama, T., and Fujino, Y. : Structural parameter identification by use of additional known masses and its application to damage detection, *Proc., 11th East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering & Construction, Taipei, Taiwan, 2008*
- [A16] Ushita, M., Nagayama, T., and Fujino, Y. : A distributed autonomous active-sensing approach for structural health monitoring using smart sensors, *Proc., 11th East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering & Construction, Taipei, Taiwan, 2008*
- [A17] Su, D., Fujino, Y., Nagayama, T., and Miyashita, T. : Local dynamic characteristics of train

- induced vibration of high-speed railway bridge, Proc., 11th East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering & Construction, Taipei, Taiwan, 2008
- [A18] Nagayama, T., Spencer, Jr., B. F. Ushita, M., and Fujino, Y.: Structural health monitoring systems using smart sensors, Proc., 4th International Workshop on Advanced Smart Materials and Smart Structures Technologies, Waseda University, Tokyo, Japan, 2008
- [A19] Castaneda, N.E., Sun, F., Dyke, S.J., Lu, C., Hope, A. and Nagayama, T. : Experimental validation of a correlation-based damage detection technique using iMote2 wireless sensors, Proc., 5th International Workshop on Structural Control and Monitoring, Dalian, China, June 5-6, 2008
- [A20] Castaneda, N.E., Sun, F. Dyke, S.J. Lu, C. Hope, A. and Nagayama, T. : Implementation of a correlation-based decentralized damage detection method using wireless sensors, Proc., 4th International Conference on Advances in Structural Engineering and Mechanics (ASEM08), Jeju, Korea, May 26-28, 2008
- [A21] Spencer, Jr. B. F., Nagayama, T., and Rice, J. A.: Decentralized structural health monitoring using smart sensors, Proc., Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2008, SPIE 6932, pp693202, San Diego, CA, USA, 2008.
- [A22] 阿部雅人, 藤野陽三: 「不規則振動理論を援用した加速度記録からの地震時最大応答変位のリアルタイム推定」, 土木学会論文集 A, Vol.65, No.1, pp.136-150, 2009
- [A23] 阿部雅人, 藤野陽三: 「システム制御理論の視点からのストックマネジメントのマクロ分析」, 土木学会論文集 A, Vol. 65, No. 2 pp.474-486, 2009
- [A24] 藤野陽三: 都市インフラの災害事故リスクの低減とモニタリング(基調論文), 構造工学論文集, CD-ROM, 2009
- [A25] Dionysius M. Siringoringo, Yozo Fujino: “Noncontact Operational Modal Analysis of Structural Members by Laser Doppler Vibrometer”, Journal of Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering , vol.24, pp.249-265, 2009
- [A26] Yozo Fujino, Dionysius M. Siringoringo, Masato Abe: “The needs for advanced sensor technology for risk assessment of civil infrastructure”, Smart Structure and System, Vo.5, No.2, pp.173-191, 2009
- [A27] Nagayama, T., Ushita, M., Dinh, H. M., Fujino, Y., Spencer, Jr. B. F., Rice, J. A., Jang, S.-A. Mechitov, K. A., and Agha, G. A. : Structural health monitoring system development and full-scale bridge vibration measurement using smart sensors, Proc. 10th International Conference on Structural Safety and Reliability, Osaka, Japan, 2009
- [A28] Evan Monroig, Kazuyuki Aihara, Yozo Fujino: “Modeling dynamics from only output data”, The American Physical Society, Physical Review E 79, 056208,2009
- [A29] 長山智則, B.F. Spencer, Jr, 藤野陽三: 「スマートセンサを用いた多点構造振動計測のためのミドルウェア開発」, 土木学会論文集 A, Vol.65, No. 2, pp.523-535, 2009
- [A30] 阿部雅人, 藤野陽三: 「システム制御理論の視点からのストックマネジメントのマクロ分析」, 土木学会論文集 A, Vol. 65, No. 2 pp.474-486, 2009, doi: 10.2208/jsceja.65.474
- [A31] Yozo Fujino, Dionysius M. Siringoringo, Masato Abe: “The needs for advanced sensor technology for risk assessment of civil infrastructure”, Smart Structure and System, 2009
- [A32] Su, D., Fujino, Y., Nagayama, T., Hernandez, J., and Seki, M.: “Vibration of reinforced concrete viaducts under high-speed train passage: measurement and prediction including train-viaduct interaction”, Structure and Infrastructure Engineering: Maintenance, Management, Life-Cycle Design and Performance, 1744-8980, 2009, doi: 10.1080/15732470903068888
- [A33] Dionysius M. Siringoringo, Yozo Fujino: “Noncontact Operational Modal Analysis of Structural Members by Laser Doppler Vibrometer”, Journal of Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, vol.24, pp.249-265, 2009, doi: 10.1111/j.1467-8667.2008.00585.x
- [A34] Evan Monroig, Kazuyuki Aihara, Yozo Fujino: “Modeling dynamics from only output data”, The American Physical Society, Physical Review E 79, 056208,2009.5, doi: 10.1103/PhysRevE.79.056208
- [A35] 長山智則, B.F. Spencer, Jr, 藤野陽三: 「スマートセンサを用いた多点構造振動計測の

- ためのミドルウェア開発」, 土木学会論文集 A, Vol.65, No. 2, pp.523-535, 2009, doi:10.2208/jsceja.65.523
- [A36] Nagayama, T., Spencer, Jr., B. F., Mechitov, K. A., and Agha, G. A.: “Middleware services for structural health monitoring using smart sensors”, *Smart Structures and Systems*, 5(2), pp.119-137, 2009
- [A37] Nagayama, T., Spencer, Jr., B. F., Rice, J. A.: “Autonomous decentralized structural health monitoring using smart sensors”, *Structural Control and Health Monitoring*, 16, pp.842-859, 2009
- [A38] Jo, H., Sim, S., Nagayama, T., and Spencer, Jr. B.F. : Decentralized stochastic modal identification using high sensitivity wireless smart sensors, *Proc. of 5th World Conference on Structural Control and Monitoring*, Tokyo, Japan, 2010
- [A39] Nagayama, T., Ushita, M., and Fujino, Y. : Efficient multihop data transport protocol for structural health monitoring and its evaluation at a full-scale bridge, *Proc. of 5th World Conference on Structural Control and Monitoring*, Tokyo, Japan, 2010
- [A40] Park, J.W., Cho, S., Jung, H.-J., Yun, C.-B., Jang, S. A., Jo, H., Spencer, Jr., B. F., Nagayama, T., and Seo, J.-W. : Long-term structural health monitoring system of a cable-stayed bridge based on wireless smart sensor networks and energy harvesting techniques, *Proc. of 5th World Conference on Structural Control and Monitoring*, Tokyo, Japan, 2010
- [A41] Dinh, H.M., Nagayama, T., Fujino, Y., Sakurai, N., and Nakayama, H. : Boundary condition identification of a real-life bridge by use of additional known masses, *Proc. of 5th World Conference on Structural Control and Monitoring*, Tokyo, Japan, 2010
- [A42] Tandian, C.H., Fujino, Y., Nagayama, T., Siringoringo, D., and Su D. : Response variability among identical expressway bridges under moving vehicles, *Proc. of 5th World Conference on Structural Control and Monitoring*, Tokyo, Japan, 2010
- [A43] Su, D., Fujino, Y., Nagayama, T., and Yamazaki, S. : Identification of cable damping characteristics of a long-span cable-stayed bridge, *Proc. of 5th World Conference on Structural Control and Monitoring*, Tokyo, Japan, 2010
- [A44] Lin, T.H., Hung, S. L., Fujino, Y., and Nagayama, T. : Study of energy harvesting technology in structural health monitoring, *Proc. 5th World Conference on Structural Control and Monitoring*, Tokyo, Japan, 2010
- [A45] Nagayama, T., Jung, H.-J., Spencer, Jr., B. F., Jang, S.A., Mechitov, K. A., Cho, S., Ushita, M., Yun, C.-B., Agha, G. A., Fujino, Y. : International collaboration to develop a structural health monitoring system utilizing wireless smart sensor network and its development on a cable-stayed bridge, *Proc. of 5th World Conference on Structural Control and Monitoring*, Tokyo, Japan, 2010
- [A46] Nagayama, T., Ushita, M., and Fujino, Y. : High-throughput multihop wireless sensor network using multiple RF channels and its application to suspension bridge monitoring, *Proc. of 3rd Asia-Pacific Workshop on Structural Health Monitoring*, Tokyo, Japan, 2010
- [A47] D.M. Siringoringo, T. Nagayama, Y. Fujino, D.Su and C.Tandian,: Observed dynamic characteristics of an overpass bridge during destructive testing, *Proceeding of the 5th International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management, IABMAS 2010*, Philadelphia, USA, July 2010, CD-Rom
- [A48] 藤野陽三, 西川貴文, 長山智則: 「日常点検車を用いた道路高速モニタリングシステムの開発と実装化」, *高速道路と自動車*, Vol.53, No.5, pp.23-30, 2010
- [A49] Yozo Fujino, Dionysius M. Siringoringo, Masato Abe: “The needs for advanced sensor technology for risk assessment of civil infrastructure”, *Smart Structure and System*, 2010
- [A50] Jennifer A. Rice, Kirill Mechitov, Sung-Han Sim, Tomonori Nagayama, Shinae Jang, Robin Kim, Billie F. Spencer, Jr., Gul Agha and Yozo Fujino: Flexible smart sensor framework for autonomous structural health monitoring, *Smart Structures and Systems*, An Int'l Journal, Vol. 6, No. 5-6, pp.423-438. 2010
- [A51] Nagayama, T., Ushita, M., Fujino, Y., Ieiri, M. and Makihata, N.: The combined use of low-cost smart sensors and high accuracy sensors to apprehend structural dynamic behavior, *Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2010*, *Proc. of SPIE volume 7647*, San Diego, USA, 2010

- [A52] Tomonori Nagayama, Parya Moinzadeh, Kirill Mechitov, Mitsushi Ushita, Noritoshi Makihata, Masataka Ieiri, Gul Agha, Billie F. Spencer, Jr., Yozo Fujino and Ju-Won Seo: Reliable multi-hop communication for structural health monitoring, *Smart Structures and Systems, An Int'l Journal*, Vol. 6, No. 5-6, pp.481-504. 2010
- [A53] Cho. S., Jang, S.A., Jo, H., Mechitov, K.A. Rice, J.A., Jung, H.-J., Yun, C.-B., Spencer Jr., B.F., Nagayama, T., and Seo, J. : Structural health monitoring system of a cable-stayed bridge using a dense array of scalable smart sensor network, *Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2010, Proc. of SPIE volume 7647, San Diego, 2010*
- [A54] Fujino Y, Siringoringo DM.: Bridge Monitoring in Japan: The needs and strategies, *Structure and Infrastructure Engineering*, 2010, Vol. 7(7), pp:597-611
- [A55] 山本泰幹, 半野久光, 藤野陽三, 矢部正明; “横浜ベイブリッジの耐震補強設計における鋼上部構造を対象とした性能照査”, *土木学会論文集A*, Vol. 66, No. 1, pp.13-30, 2010
- [A56] 山本泰幹, 半野久光, 藤野陽三, 矢部正明; “横浜ベイブリッジの耐震補強設計に用いた非線形地震応答値の設計検証”, *土木学会論文集A*, Vol. 66, No. 1, pp.31-36, 2010
- [A57] 阿部雅人, 藤野陽三: 不規則外力に対する加速度記録からの最大応答変位推定, *土木学会論文集 A*, Vol.66, No.3, pp.477-490, 2010.8
- [A58] 阿部雅人, 藤野陽三: 移動体上の風センシングによる竜巻検知の試み, *土木学会論文集A*, Vol.66, No.4, pp.637-642, 2010
- [A59] 井上雅夫, 藤野陽三; “米国ミネソタ州での落橋事故の社会的影響”, *土木学会論文集 F*, Vol. 66, No. 1, pp.14-26, 2010
- [A60] 井上雅夫, 藤野陽三; “米国における道路橋設計照査制度に関する調査”, *土木学会論文集F*, Vol.66, No.1, pp.193-207, 2010
- [A61] 稲垣博信, 水野裕介, 藤野陽三, 河村圭; “地方自治体における橋梁の維持管理の状況と投資効果に対する調査検討”, *土木学会論文集F*, Vol.66, No.3, pp.351-359, 2010
- [A62] 貝戸清之, 松岡弘大, 渡辺勉, 曾我部正道, 藤野陽三; “走行列車荷重下における鉄道橋桁の動的応答の特性とその利用”, *土木学会論文集F*, Vol.66, No.3, pp.382-401, 2010
- [A63] 水野裕介, 片岡慶太, 松本好弘, 長山智則, 藤野陽三; “鉄道営業列車による移動体センシングの加速度応答を用いた位置同定と軌道変状の検出”, *土木学会論文集F*, Vol.66, No.3, pp.360-365, 2010
- [A64] 藤野陽三: インフラストラクチャのヘルスマニタリング—災害事故低減に向けて—(基調論文), *日本大学理工学研究所年次講演会論文集, CD-ROM*, 2010.11
- [A65] 藤野陽三: 高齢化していく道路インフラとの付き合い方(招待講演論文), *九州大学ネクスコ西日本技術フォーラム講演集*, 2010.7
- [A66] 藤野陽三: 橋梁の維持管理マネジメント(基調論文); 腐食データシートシンポジウム論文集; 物質・材料研究機構; 2010.6
- [A67] 藤野陽三: 構造工学における今後の研究の方向(基調論文), *名城大学 ARCSEC ワークショップ論文集, CD-ROM*, 2010.5
- [A68] Jean-Charles Wyss, Di Su, Yozo Fujino: Prediction of vehicle-induced local responses and application to a skewed girder bridge, *Engineering Structures*, vol.33, Issue.4, pp.1088-1097, 2011
- [A69] Yozo Fujino and D.M.Siringoringo: Bridge Monitoring in Japan: the Needs and Strategies, *Structure and Infrastructure Engineering*, Vol.7, No7-8, pp.597-611, 2011
- [A70] Xia, Y., Wu, Q. X., Xu, Y. L., Fujino, Y. and Zhou, X. Q.: Verification of a Cable Element for Auto-Parametric Vibration of Stay Cables Subject to Harmonic Excitation and Random Excitation, *Advances in Structural Engineering*, Vol.14, No.3, pp.589-595, 2011
- [A71] H.M.Dinh, T.Nagayama and Y.Fujino: Structural parameter identification by use of additional known masses and its experimental application, *Journal of Structural Control and Health Monitoring*, 2011 (Early View)
- [A72] Achim Bleicher, Mike Schlaich, Yozo Fujino and Thomas Schauer: Model-based design

- and experimental validation of active vibration control for a stress ribbon bridge using pneumatic muscle actuators, *Engineering Structures*, Vol.33, pp.2237-2247, 2011
- [A73] 藤野陽三, 川井豊: 「土木鋼構造分野における構造工学の変遷と今後の課題」, 構造工学論文集 Vol.57A, pp1-15, 2011.3
- [A74] Siringoringo DM, Fujino Y, Nagayama T.: Dynamic Characteristics of an Overpass Bridge during a Full-Scale Destructive Test, *Journal of Engineering Mechanics ASCE*, 2011(Accepted)
- [A75] Siringoringo DM, Fujino Y.: An Experimental Study on Bridge Frequency Identification from Vibration Response of Instrumented Vehicle, *Advances in Structural Engineering*, 2011(Accepted)
- [A76] Siringoringo DM, Fujino Y.: Observed Along-wind Vibration of a Suspension Bridge Tower and Girder, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2011(Accepted)
- [A77] 藤野陽三: 「土木構造物の寿命」, 日本建築学会, 総合論文誌, No.3, pp.19-22, 2011.1
- [A78] 蘇迪, 藤野陽三, Jean-Charles WYSS: 「汎用有限要素コードを利用した車両-橋梁連成系の動的応答予測と鋼I桁斜橋への適用」, 土木学会論文集, 2011 (in press)
- [A79] 蘇迪, 藤野陽三, 長山智則, 関雅樹: 「高速鉄道の走行時における高架橋の振動実測と解析」, 土木学会論文集, 2011 (Accepted)
- [A80] Nagayama, T., Ushita, M., and Fujino, Y., Suspension bridge vibration measurement using multihop wireless sensor networks, *Proc. of 12th East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction*, Hong Kong, China, 2011.
- [A81] Di Su, Jitboon Laomenit, Yozo Fujino : Traffic-induced response prediction of highway bridges, *Proceedings of Twelfth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction*, Hong Kong, 2011.
- [A82] D.M. Siringoringo, Y. Fujino, and H. Wenzel. : Vibration Characteristics of an Overpass Bridge during Full-Scale Destructive Testing, *Proceeding of the 12th East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction (EASEC-12)*, Hong Kong Special Administrative Region, China, 24-26 January 2011, CD-Rom
- [A83] D.M. Siringoringo, Y. Fujino, . : Observed Alongwind Vibration of a Suspension Bridge Tower and Girder, *Proceeding of the 12th East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction (EASEC-12)*, Hong Kong Special Administrative Region, China, 24-26 January 2011, CD-Rom
- [A84] D.M. Siringoringo, Y. Fujino, : Alongwind Vibration of a Suspension Bridge Tower and Girder: Full-Scale Measurement, Accepted for the 8th International Conference on Structural Dynamics, Leuven, Belgium 4-6 July 2011
- [A85] D.M. Siringoringo, and Y. Fujino: Estimating Bridge Fundamental Frequency from Vibration Response of Instrumented Passing Vehicle: Analytical and Experimental Study, *Advances in Structural Engineering*, 2011 (in press)
- [A86] 阿部雅人, 藤野陽三: 「加速度記録からの地震時最大応答変位推定の非弾性応答への拡張」, 土木学会論文集 A, 2011 (Accepted)
- [B1] Y. Mizuno, Y. Fujino (University of Tokyo): “Data Archiving and Processing Method using Wavelet Decomposition for Structural Health Monitoring”, *The 2007 International Workshop on Computing in Civil Engineering*, ASCE, pp.673-680, 2007
- [C1] 安藤繁, 魏大比, Paul Masurel: 「複素正弦波変調撮像によるオプティカルフロー検出理論および時間相関イメージセンサによる実現」, *情報処理学会 CVIM 論文誌*, vol.49, no.6 (CVIM20), pp.13-21, 2008
- [C2] 安藤繁, 本谷秀堅: 「ユビキタス指向センサと統合情報処理」, *人工知能学会誌*, vol.23, no.5, pp.604-610, 2008
- [C3] 安藤繁: 「微分ガウシアン演算子と画像の特徴抽出処理」, *ふえらむ(日本鉄鋼協会会報)*, vol.13, no.6, pp.360-367, 2008
- [C4] 来海暁, 安藤繁: 「時間相関イメージセンサー-高度な実時間パターン計測を実現する画像センサー」, *計測と制御*, vol.47, no.1, pp.10-17, 2008
- [C5] 来海暁, 安藤繁: 「時間相関イメージセンサと実時間ロックイン撮像技術」, *光アライアン*

- ス, vol.19, no.2, pp.1-6, 2008
- [C6] 安藤繁, 来海暁: 「時間相関イメージングとその応用」, 電気学会センサ・マイクロマシン部門誌, vol.129, no.5, pp.129-137, 2009
- [C7] A. Kimachi and S. Ando: “Real-time phase-stamp range finder using correlation image sensor”, IEEE Sensor Journal (accepted)
- [C8] 小山翔一, 栗原徹, 安藤繁, 「波動場の小領域観測による瞬時波源定位の理論と実験的検証」, 電気学会論文誌, vol.129-E, no.10, pp.350-356, 2009, doi: 10.1541/ieejsmas.129.350
- [C9] S. Ando and T. Nara: “An exact direct method of sinusoidal parameter estimation derived from finite Fourier integral of differential equation”, IEEE Trans. Signal Processing, vol.57, no.9, pp.3317-3329, 2009, doi: 10.1109/TSP.2009.2021501
- [C10] 佐藤世智, 栗原徹, 安藤繁, 「白色光干渉と時間相関イメージセンサを用いる微小構造体の振動振幅位相分布の実時間観測システム」, 電気学会論文誌, vol.130-E, no.1, 2010, doi:10.1541/ieejsmas.130.17
- [C11] 佐藤世智, 栗原徹, 安藤繁, “荷重積分法に基づく白色光干渉信号の直接中心決定アルゴリズム”, 計測自動制御学会論文集, vol.46, no.9, pp.539-546, 2010.
- [C12] Takaaki Nara and Shigeru Ando, “Direct localization of poles of meromorphic function from measurements on incomplete boundary,” Inverse Problems, vol.26, ID:015011, 2010. doi: 10.1088/0266-5611/26/1/015011
- [D1] Mizutani, T., Fuke, Y., Fujino, Y., Nagayama, T., and Mizuno, Y. : An experimental study on precipitation measurement using leaky coaxial cables, Proc., 11th East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering & Construction, Taipei, Taiwan, 2008
- [D2] 猪又憲治: 「漏洩同軸ケーブルを用いた物体観測における 2 次元位置推定と推定精度に関する研究」, 博士学位論文, 新潟大学大学院自然科学研究科情報工学専攻, 2009.3
- [D3] Mizutani, T., Fujino, Y., Inomata, K., Tsujita, W. Nagayama, T., Nishikawa, T., Shikai, M., and Sumi, K. : Leaky coaxial cable usage for monitoring real-time heavy rain, Proc. of 5th World Conference on Structural Control and Monitoring, Tokyo, Japan, 2010
- [E1] Z.S. Wu, B. Xu, T. Takahashi, and T. Harada: “Concrete Crack Monitoring with BOTDR Fiber Optic Sensing Technique”, Structure & Infrastructure Engineering, 2008 (In press, Available online)
- [E2] G. Chen, B. Xu, D.J. Pommerenke, and Z.S. Wu: “Distributed Strain Measurement of a Large-scale Reinforced Concrete Beam-column Assembly under Cyclic Loading”, Smart Structures and Systems, 2008 (In press)
- [E3] 西口憲一, 岸田欣増, 李哲賢, 吳智深: 「ブリルアン分布計測におけるパルス・プリポンプ法の高精度化」, 信学技報, 電子情報通信学会, Vol. 107, No. 513, OFT2007-68, pp. 33-38, 2008
- [E4] 李哲賢, 津田勉, 澤貴弘, 牧田篤, 高野宏和, 岸田欣増, 吳智深, 武田展雄, 水口周: 「PPP-BOTDA を用いた高分解能(10cm)かつ高速(10Hz)分布計測の実現」, 信学技報, 電子情報通信学会, Vol. 108, No. 245, OFT2008-42, pp. 39-44, 2008年10月
- [E5] H. Zhang and Z.S. Wu: “Performance evaluation of BOTDR-based distributed fiber optic sensors for crack monitoring”, Vol.7, No.2, pp.143-156, 2008.6
- [E6] Z.S. Wu, B. Xu, T. Takahashi, T. Harada: “Concrete Crack Monitoring with BOTDR Fiber Optic Sensing Technique”, Structure & Infrastructure Engineering, Vol.4, Iss.4, pp.311-323, 2008.8
- [E7] G. Chen, B. Xu, D.J. Pommerenke, Z.S. Wu: “Distributed Strain Measurement of a Large-scale Reinforced Concrete Beam-column Assembly under Cyclic Loading”, Smart Structures and Systems, (2008 In press)
- [E8] H. Zhang, Z.S. Wu: “Performance evaluation of PPP-BOTDA based distributed optic fiber sensors”, Structure and Infrastructure Engineering, (2008 In press)
- [E9] Adewuyi, A.P., Wu, Z.S., Serker, N.H.M.K.: “Assessment of vibration based damage identification methods using displacement and distributed strain measurements”, Journal of Structural Health Monitoring, published online, 2009, doi: 10.1177/1475921709340964

- [E10] Serker, N.H.M. Kamrujjaman and Wu, Z.S., “Structural health monitoring using distributed macro-strain response”, Journal of Applied Science, 2009, Volume: 9, Issue: 7, pp. 1276-1284, doi: 10.3923/jas.2009.1276.1284
- [E11] S. Li and Z. Wu, “Sensitivity enhancement of long-gage FBG sensors for Macro-strain measurements”, Structural Health Monitoring, an International Journal, Vol. 8, No. 6, pp.415-423, 2009, doi: 10.1177/1475921709349264
- [E12] A. P. Adewuyi and Z.S. Wu, “Vibration-based structural health monitoring technique using statistical features from strain measurements”, Journal of Engineering and Applied Sciences, vol. 4, no. 3, pp.38-47, 2009, doi: unknown
- [E13] S. Li, Z.S. Wu, “Parametric estimation for RC flexural members based on distributed long-gage fiber optic sensors”, Journal of Structural Engineering, Vol. 136, No. 2, February 2010, pp. 144-151, ASCE, doi: 10.1061/(ASCE) 0733-9445(2010) 136:2 (144)
- [E14] Zhishen Wu, Hao Zhang, Caiqian Yang, Development and performance evaluation of no-slippage optical fiber as Brillouin scattering based distributed sensors, Structural Health Monitoring, Volume 9 Issue 5, pp.413-431, 2010, DOI: 10.1177/1475921710361328
- [E15] Suzhen Li, Zhishen Wu, Lili Zhou, Health monitoring of flexural steel structures based on distributed fibre optic sensors, Structure and Infrastructure Engineering, 2010, Volume 6, Issue 3 , pages 303-315, 2010, DOI: 10.1080/15732470701492066
- [E16] S. Li, Z.S. Wu, Parametric estimation for RC flexural structures based on distributed long-gage fiber optic sensors, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 136, No. 2, pp. 144-151, 2010, DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2010)136:2(144)
- [E17] N.H.M. Kamrujjaman Serker, Zhishen Wu, Suzhen Li, A non-physics based approach for vibration-based structural health monitoring under changing environmental conditions, Structure Health Monitoring, Vol. 9, No.2, pp.145-158, 2010, DOI: 10.1177/1475921709352149
- [E18] S. Shen, Z.S. Wu, C.Q. Yang, An improved conjugated beam method for structural deformation monitoring based on distributed optical fiber strain sensing technique and a new optical fiber with improved strain sensitivity, Structural Health Monitoring, Vol. 9(4), pp.361-379, 2010, DOI: 10.1177/1475921710361326
- [E19] Yongsheng Tang, Zhishen Wu, Caiqian Yang, Gang Wu and Sheng Shen, A new type of smart basalt fiber-reinforced polymer bars as both reinforcements and sensors for civil engineering application, Smart Materials and Structures, Volume 19, Number 11, 2010

(2) その他の著作物(総説、書籍など)

- [A1] 藤野陽三, 野口貴文: アーバンストックの持続再生, 技報堂, pp.1-322, 2007
- [A2] 藤野陽三,阿部雅人: 橋梁マネジメントにおけるアメリカでの新たな挑戦, 土木学会誌, Vol. 92, No. 6, pp.70-73, 2007.6
- [A3] 藤野陽三,阿部雅人: 米国ミネソタ州での落橋事故, 土木学会誌, Vol. 92, No. 10, pp.1-4, 2007.10
- [A4] 長山智則,藤野陽三: 高速道路の高頻度路面モニタリングシステム(VIMS), 検査技術, 13(1), pp.41-47, 2008.1
- [A5] 藤野陽三: インフラストラクチャの事故を防ぐために, 学術の動向, 第 13 巻, 3 号, pp.50-51,2008
- [A6] 藤野陽三: [寄稿文]社会基盤の保全に向けて, ベース設計資料 土木編, No.136, pp.16-22, 2008
- [A7] 長山智則,藤野陽三: 路面モニタリングシステムの開発 車両応答を利用した簡易路面モニタリングシステムの開発, 舗装, 43(6), pp.3-5,2008.6.
- [A8] 藤野陽三: 橋梁(鋼橋)の維持管理, JSSC 日本鋼構造協会, No69, pp.1-7, 2008.7
- [A9] 藤野陽三: 橋梁の事故防止と基準不適合問題, 橋梁と基礎特集号, pp.9-, No.13, 2008.8
- [A10] 藤野陽三,佐々木栄一,鈴木康夫,長山智則,平山博,永谷秀樹,トークイン・日本の鋼橋を考える,橋梁と基礎,42(9),pp.28-35,2008.9.
- [A11] 藤野陽三: 「見える」メンテナンス, JR EAST Technical Review, JR 東日本鉄道株式会社

- 社, No.25, pp.1-4, 2008
- [A12] Boller, C., Chang, F-K. and Fujino, Y, Encyclopedia of Structural Health Monitoring (構造ヘルスマニタリング百科事典), Wiley, pp.1-2732, ISBN978-0-470-05822-0, 2009
- [A13] 藤野陽三: [報告]カナダ・ケベック州跨道橋崩壊事故の調査報告, 橋梁と基礎, pp.59-62, 2009. 1
- [A14] 藤野陽三: 橋の安全と対策, 予防時報, vol.236, pp16-21, 2009
- [A15] 藤野陽三: 構造物検査特集基幹論文「インフラの事故を防ぐためにー構造物検査の課題と期待ー」, 日本鉄道施設協会誌, Vol.47, 2009. 2
- [A16] Yozo Fujino, Takafumi Noguchi; Stock Management for Sustainable Urban Regeneration, Springer, pp.1-299, 2009
- [A17] 藤野陽三(代表): 橋梁マネジメント(原著 ヤネフ)(訳本), 技報堂, pp.1-722, 2009
- [A18] 藤野陽三: 「特別講座 Part1: インフラストラクチャのヘルスマニタリング」, JACIC 情報, 日本建設情報総合センター, Vol. 25, No.1, pp.5-14, 2010.3
- [A19] 藤野陽三, Daniele Inaudi: 「特別講座 Part1: 欧州の橋梁モニタリングの現状について」, JACIC 情報, 日本建設情報総合センター, Vol. 25, No.1, pp.15-20, 2010.3
- [A20] 藤野陽三: 社会・都市基盤の事故災害リスクの低減とモニタリング, 技術と経済, No.519, pp.16-25, 2010. 5
- [A21] 藤野陽三: 構造物の「見える化」, JR EAST, 第 17 巻, 7号, pp.4-7, 2010. 7
- [A22] 藤野, 赤塚, 山村, 堀田: 国際インフラプロジェクトの形成, 鹿島出版会, 250 ページ, 2011. 1
- [A23] Fujino, Y. Kimura, K. and Tanaka, H.: Wind resistant Design of Bridges in Japan, Springer, pp.1-300, 2012.3 (出版予定, 現在最終校正中)
- [C1] 来海暁, 安藤繁: 時間相関イメージセンサー高度な実時間パターン計測を実現する画像センサー, 「CMOS イメージセンサの最新動向」, 9 章, シーエムシー出版, 2007.
- [C2] 来海暁, 安藤繁: 時間相関イメージセンサと実時間ロックイン撮像技術, 光アライアンス, vol.19, no.2, pp.1-6, 2008.
- [E1] 呉智深, 岩下健太郎: 光ファイバを用いた構造ヘルスマニタリング, 建設の施工企画, 日本建設機械化協会, pp.15-20, 2009.5

(3)国際学会発表及び主要な国内学会発表

① 招待講演 (国内会議 21 件、国際会議 45 件)

- [A1] 藤野陽三: 「都市空間の災害事故リスク低減と学融合の意義ーセンシングからの展開ー」(基調講演), 東京大学電気系 21 世紀 COE シンポジウム「豊かな社会を築くセキュアライフ・エレクトロニクス」, 2007.1
- [A2] 藤野陽三: 「市空間の災害事故リスクの低減とセンシング」(基調講演), 土木学会関東支部 2007.3
- [A3] 藤野陽三: 「都市基盤の災害事故リスクの低減とセンシング」(基調講演), 建設コンサルタント協会インフラストラクチャー研究会, 2007.7
- [A4] Y. Fujino: “Needs of advanced sensors technologies from viewpoints of prevention of disasters and accidents in civil infrastructure”, (基調講演) U.S.-Japan Workshop on Advanced Integrated Sensor Technologies for Safe and Secure Societies and Better Quality of Life, Tokyo, Japan, 2007. 7
- [A5] Y. Fujino: “Role of monitoring toward safety of urban infrastructure”, The International Symposium on Advances in Urban Safety, Nanjing, China, 2007. 10 (基調講演)
- [A6] 藤野陽三: 「社会基盤の保全に向けてー維持管理のあり方ー」(基調講演), (独法)土木研究所講演会, 2007.10
- [A7] Y. Fujino: “Monitoring toward safety of urban infrastructure” (基調講演), International Conference on Health Monitoring of Structure, Material and Environment, Nanjing, China, 2007.10
- [A8] 藤野陽三: 「社会基盤の災害事故防止に向けたメンテナンスとセンシング技術の応

- 用」(基調講演), (財)鉄道総合技術研究所講演会, 2007.11
- [A9] Y. Fujino: “Vibration-based Health Monitoring of Bridges and Transportation Infrastructure” (基調講演), Second International Conference on Structural Condition Assessment, Monitoring and Improvement, Changsha, China, 2007. 11
- [A10] Yozo FUJINO: “VIBRATION-BASED HEALTH MONITORING OF BRIDGES AND TRANSPORTATION INFRASTRUCTURE” (基調講演), SCAMI-2, Changsha, CHINA, 2007.11
- [A11] Yozo Fujino, Su D.: “Bridge under High-speed train passage and monitoring using vibration techniques” (基調講演), International Conference on High-speed Railway Bridges Technology 天津 2008, 2008.4
- [A12] 藤野陽三: 「橋梁の事故防止と保全ーその難しさとチャレンジャー」(基調講演) (財)首都高速道路技術センター技術講演会 2008.5
- [A13] Yozo FUJINO: “Recent issues on Bridge Accidents and Some Lessons” (基調講演), 3rd Korea-Japan Joint Workshop on Steel Bridges, Pohang, Korea, 2008.5
- [A14] Yozo FUJINO: “Development of practical monitoring systems to mitigate disasters and accidents of civil infrastructure” (基調講演), 3rd International SMART conference, CIMTECH, 2008. 6
- [A15] Yozo FUJINO: “Implementation of Structural Control and Monitoring to Civil Infrastructure” (基調講演), 5th International Workshop on Structural Control and Monitoring, 2008.6
- [A16] 藤野陽三: 「社会基盤の保全に向けてー維持管理のあり方ー」(基調講演), 防錆防食協会技術発表大会, 2008.7
- [A17] Yozo FUJINO: “Structural Health Monitoring of Bridges in Japan - its need and direction -” (基調講演), 4th CICE, Zurich, Switzerland, 2008.7
- [A18] Yozo FUJINO: “Bridge monitoring - the needs and strategies -” (基調講演), 4th IABMAS, Seoul, Korea, 2008.7
- [A19] Yozo FUJINO: “Structural Health Monitoring of Bridges in Japan - its need and direction -” (基調講演), 4th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering, Switzerland, 2008.7
- [A20] Yozo FUJINO: “Bridge monitoring- the needs and strategies -” (基調講演), 4th IABMAS, Seoul, 2008.7
- [A21] Yozo FUJINO: “Japanese Research on Health Monitoring to Sustainable Infrastructure” (基調講演), International Workshop on Performance-based Infrastructure and Asset Management, Turkey, 2008.7
- [A22] 藤野陽三: 「橋梁の事故防止と保全ーその難しさとチャレンジャー」(基調講演), JST”道守”養成ユニット 技術講演会, 2008.10
- [A23] 藤野陽三: 「道路インフラの保全と事故防止について」(基調講演), (財)高速道路技術センター記念講演会, 2008.11
- [A24] Y. FUJINO and D.M. SIRINGORINGO: “STRUCTURAL HEALTH MONITORING FOR RISK ASSESSMENT OF BRIDGES: CONCEPT AND IMPLEMENTATIONS” (基調講演), EASEC-11, Taipei, Taiwan, 2008. 11
- [A25] 藤野陽三: 「橋梁の事故防止と保全ーその難しさとチャレンジャー」(基調講演), 電力土木協会講演会, 2009.2
- [A26] 藤野陽三: 「都市基盤インフラの災害事故リスクの低減とモニタリング」(基調講演), 日本学術会議 構造工学シンポジウム, 2009.4
- [A27] 藤野陽三: 「社会基盤インフラのモニタリングと災害事故防止」, 光防災研究会(調講演), 2009.5
- [A28] 藤野陽三: 「都市基盤インフラの災害事故リスクの低減とモニタリング」ー測れば楽しいから測れば為になるーセンシングからモニタリングへ(招待講演), (財)科学と技術の会講演会, 2009.6
- [A29] Yozo FUJINO: “Characterization of risk, hazard and vulnerability in natural disasters”

- (基調講演), JST-NSFC Joint Workshop, Sapporo, 2009.6
- [A30] Yozo FUJINO: “Control, Simulation and Monitoring of Bridge Vibrations”(招待講演), HKIE/IstructE Joint Structural Division Annual Seminar, 2009.6
- [A31] 藤野陽三: 交通施設のモニタリングに対する基本的考え方, ANCRiSST 国際会議, ボストン, 2009.8
- [A32] Yozo FUJINO: “Control, Simulation and Monitoring of Bridge Vibrations”(基調講演), IABSE80 周年記念シンポジウム, Bangkok, 2009.9
- [A33] 藤野陽三: 鉄道橋ならびに道路橋の供用荷重下での挙動に関するいくつかのレッスン, 日韓鋼橋第五回ワークショップ(基調講演), 2009.10
- [A34] 藤野陽三: 日本的高速鉄道に関する振動とモニタリングに関する研究紹介, ヨーロッパ鉄道橋モニタリングに関するワークショップ(基調講演), 2009.12
- [A35] 藤野陽三: 橋梁インフラストラクチャのマネジメント(基調講演), STSG 研究会, 2010.4.
- [A36] 藤野陽三: 「311 東日本大震災とインフラモニタリング」(特別講演), ベルリン工科大学, 2011.4
- [A37] 藤野陽三: 「311 東日本大震災とインフラモニタリング」(特別講演), ドイツ連邦材料構造国立研究所, 2011.4
- [A38] 藤野陽三: 「災害防止とモニタリングー311 東日本大震災に関連してー」(招待講演), 大連理工大学, 2011.4
- [A39] 藤野陽三: 「災害防止とモニタリングー311 東日本大震災に関連してー」(招待講演), ハルピン工科大学, 2011.4
- [A40] 藤野陽三: 「構造工学の発展と今後の展開」(基調講演), 土木学会構造工学シンポジウム, 京都大学, 2011.4
- [A41] 藤野陽三: 「インフラストラクチャモニタリング 基礎と応用」(連続講義), 2011 年度光華国際級学術土木大師講座招待講演(Kwang Hua Master Lecture) 同済大学(上海), 2011.5
- [A42] 藤野陽三: 「インフラストラクチャモニタリング 基礎と応用」(連続講義), 2011 年度光華国際級学術土木大師講座招待講演(Kwang Hua Master Lecture), 台湾国立大学, 2011.5
- [A43] 藤野陽三: 「311 東日本大震災と想定外に備えるモニタリング」(特別講演), コロンビア大学(New York), 2011.5
- [A44] 藤野陽三: 「311 東日本大震災と想定外に備えるモニタリング」(特別講演), 全米科学財団(NSF), 2011.6
- [A45] 藤野陽三: 「311 東日本大震災と想定外に備えるモニタリング」(特別講演), アメリカ合衆国連邦道路局 Fairbanks 研究所(Washington), 2011.6
- [A46] 藤野陽三: 「311 東日本大震災と想定外に備えるモニタリング」(特別講演), イリノイ大学アーバンシャンペーン校(Illinois), 2011.6
- [A47] 藤野陽三: 「311 東日本大震災と想定外に備えるモニタリング」(招待講演), ヨーロッパ動力学会議(Eurodyn)(Belgium), 2011.7
- [A48] 藤野陽三: 「311 東日本大震災と想定外に備えるモニタリング」(招待講演), スマート構造(SMART)国際会議(Germany), 2011.7
- [A49] 藤野陽三: 「モニタリングと災害防止」(招待講演), ANCRiSST 会議(大連), 2011.7
- [A50] 藤野陽三: 「風振動とそのモニタリング」(招待講演), APSS2011 サマースクール(上海), 2011.8
- [A51] 長山智則: 「スマートセンサ」(招待講義), APSS2011 サマースクール(上海), 2011.8
- [A52] 藤野陽三: 「311 震災とモニタリング研究」(招待講演), インド工科大学ヘイデラバード校特別講義(India), 2011.8
- [A53] 藤野陽三: 「橋梁の地震防災とモニタリング」(招待講演), 世界橋梁工学フォーラム(台湾), 2011.9
- [A54] 藤野陽三: 「311 地震とインフラの被害ーモニタリングの効果ー」(招待講演), 世界構造

- 工学会議(IABSE) (London), 2011.9
- [A55] 藤野陽三:「橋梁モニタリングの動向と展望」(招待講演), オセアニア道路会議 (Sydney), 2011.11
- [A56] 藤野陽三:「都市空間の持続再生 ー学としての展開ー」(招待講演), 日中 JSPS-CNF 都市環境会議(海南島), 2011.11
- [A57] 藤野陽三:「311 震災と防災モニタリング」(基調講演), Transportation Research Board 会議(Washington), 2012.1
- [C1] 安藤繁:「最近の計測技術の動向: 構造物保全および内部欠陥検査を中心に」, 日本塑性加工学会講演会, 東京, Aug. 2007.
- [C2] S. Ando, “Sensors and Sensing Technology for Ubiquitous Environment: 3-D Shape, Optical Flow, and Sound Source Localization”, International Conference Networked Sensing Systems, Pittsburgh, USA, 2009
- [C3] 安藤繁:「時間相関イメージセンサによる高速画像センシング」, 精密工学会シンポジウム「メカノフォトニクスの新展開」, Mar. 2009.
- [C4] 安藤繁:「時間相関イメージセンサの光学計測への適用: ヘテロダイン干渉・モアレの実時間振幅位相復元を中心に」, 日本オプトメカトロニクス協会, Feb. 2009.
- [C5] 安藤繁:「時間相関イメージセンサ:画像計測の基本素子である理由, その幅広い応用と将来性」, 浜松画像応用計測研究会, 浜松, Jan. 2009.
- [C6] 安藤繁:「計測技術の最近の展開・原動力とその具体例」, 日本鉄鋼協会西山記念技術講座, 東京, Nov. 2007.
- [C7] 安藤繁, “時間相関イメージング:新しいデバイスおよび理論展開と応用,” 第 57 回応用物理学関係連合講演会, 光波センシングを切り拓くイメージング技術の進展, pp.242, 2010. 3. 19
- [E1] Z.S. Wu, Improvement of Typical Damage Identification Techniques Using Dynamic Strain Distribution from Long-Gage FBG Sensors, International Symposium on Innovation & Sustainability of Structures in Civil Engineering 2009 (ISISS2009), Guangzhou, China, 2009.11 (基調講演)
- [E2] 呉智深, 光ファイバセンシングによる構造ヘルスマニタリング最新動向, 第 44 回 光波センシング技術研究会, LST44-7, 2009.12(招待講演)

② 口頭発表 (国内会議 47 件、国際会議 69 件)

- [A1] Y. Fujino, Y. Mizuno (University of Tokyo): “A New Research Project on Development of a Practical Monitoring System of Urban Infrastructure toward Mitigation of Disaster and Accidents,” World Forum on Smart Materials and Smart Structures Technology, Chongqing, 2007.5
- [A2] M.Abe and Y.Fujino: “Distributed inversion algorithm for sensor networks”, World Forum on Smart Materials and Smart Structures Technology, SMSST'07, 2007
- [A3] Y.Fujino and M.Abe: “Characterization of risk, hazard and vulnerability in natural disasters”, Proceedings 10th International Conference on Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering, 2007.
- [A4] 水野裕介, 藤野陽三, 本山紘希(東京大学):「構造物の広域リスク評価に資するセンシング基盤への基礎的研究」, 土木学会第 62 回年次学術講演会, 1-358, pp.711-712, 2007.9
- [A5] 本山紘希, 水野裕介, 藤野陽三, 長山智則(東京大学):「構造物のモニタリングシステムの開発とそのリスク評価への応用」, 土木学会第 62 回年次学術講演会, 1-403, pp.801-802, 2007.9.
- [A6] 長山智則, 藤野陽三, Spencer, Jr. B. F.: 「スマートセンサを用いた構造ヘルスマニタリング」, 土木学会第 62 回年次学術講演会, 1-599, pp.1193-1194, 2007.9
- [A7] Nagayama, T., Spencer, Jr., B. F., and Fujino, Y.: “Synchronized sensing toward structural health monitoring using smart sensors”, Proc., World Forum on Smart Materials and Smart Structures Technology (SMSST'07), Chongqing & Nanjing, China,

2007

- [A8] Nagayama, T., Spencer, Jr., B. F., and Rice, J. A.: “Structural health monitoring utilizing Intel’s Imote2 wireless sensor platform”, Proc., Sensor and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2007, SPIE 6529, pp652943, San Diego, CA, USA, 2007
- [A9] Spencer, Jr. B. F., Nagayama, T., and Rice, J.A.: “Structural health monitoring using smart sensors”, Proc., World Forum on Smart Materials and Smart Structures Technology (SMSST’07), Chongqing & Nanjing, China, 2007
- [A10] Yusuke Mizuno (Yamaguchi University) and Yozo Fujino (University of Tokyo): “Downsizing Seismic Sensing System and its Implementation”, 4th International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management, Seoul, 2008.7.
- [A11] 水野裕介(山口大学), 藤野陽三(東京大学), 「汎用型振動計測ノードによる構造物の地震応答計測」, 土木学会第 63 回年次学術講演会, 1-452, 2008.9
- [A12] 河村明義, 西川貴文, 藤野陽三: 「舗装・伸縮装置のリアルタイム簡易点検システム (VIMS) への画像解析を用いた診断手法の導入の一試行」, 土木学会第 63 回年次学術講演会, V-131, 2008.9.
- [A13] Nagayama, T., Siringoringo, D. M., and Fujino, Y.: “The importance of dense monitoring of long-span bridges for its performance re-evaluation”, Proc., 17th IABSE Congress, Chicago, USA, 2008
- [A14] Nagayama, T., Spencer, Jr., B. F., and Fujino, Y.: “Structural health monitoring using smart sensors”, Proc., 11th East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering & Construction, Taipei, Taiwan, 2008
- [A15] Asakawa, H., Fujino, Y., Nagayama, T., and Ohsumi, M.: “Development and application of road monitoring system using dynamic response of vehicles.” Proc., 11th East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering & Construction, Taipei, Taiwan, 2008
- [A16] Dinh, M.-H., Nagayama, T., and Fujino, Y.: “Structural parameter identification by use of additional known masses and its application to damage detection.” Proc., 11th East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering & Construction, Taipei, Taiwan, 2008
- [A17] Ushita, M., Nagayama, T., and Fujino, Y.: “A distributed autonomous active-sensing approach for structural health monitoring using smart sensors.” Proc., 11th East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering & Construction, Taipei, Taiwan, 2008
- [A18] Su, D., Fujino, Y., Nagayama, T., and Miyashita, T.: “Local dynamic characteristics of train induced vibration of high-speed railway bridge.” Proc., 11th East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering & Construction, Taipei, Taiwan, 2008
- [A19] Nagayama, T., Spencer, Jr., B. F. Ushita, M., and Fujino, Y.: “Structural health monitoring systems using smart sensors”, Proc., 4th International Workshop on Advanced Smart Materials and Smart Structures Technologies, Waseda University, Tokyo, Japan, 2008
- [A20] Castaneda, N.E., Sun, F., Dyke, S.J., Lu, C., Hope, A. and Nagayama. T.: “Experimental validation of a correlation-based damage detection technique using iMote2 wireless sensors”, Proc., 5th International Workshop on Structural Control and Monitoring, Dalian, China, June 5-6, 2008
- [A21] Castaneda, N.E., Sun, F. Dyke, S.J. Lu, C. Hope, A. and Nagayama, T.: “Implementation of a correlation-based decentralized damage detection method using wireless sensors”, Proc., 4th International Conference on Advances in Structural Engineering and Mechanics (ASEM08), Jeju, Korea, May 26-28, 2008
- [A22] Spencer, Jr. B. F., Nagayama, T., and Rice, J. A.: “Decentralized structural health monitoring using smart sensors”, Proc., Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2008, SPIE 6932, pp693202, San Diego, CA, USA, 2008
- [A23] Su, D., Fujino, Y., Nagayama, T., and Miyashita, T.: “Local dynamic characteristics of train-induced vibration of high-speed railway bridge”, Proceedings of The Eleventh East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction, Taipei, Taiwan, 2008
- [A24] Su, D., Fujino, Y., Nagayama, T., and Miyashita, T.: “Local train-induced vibration in

- high-speed train steel bridge”, 33rd International Association for Bridge and Structural Engineering Symposium, Bangkok, Thailand, 2009
- [A25] Fujino, Y., Su, D., and Wyss, J.-C.: “Prediction of traffic-induced vibration characteristics in a skew bridge”, 4th International Conference on Structural Health Monitoring on Intelligent Infrastructure (SHMII-4), Zurich, Switzerland, 2009
- [A26] Fujino, Y., Siringoringo, D. M., Nagayama, T., and Su, D.: “Control, simulation and monitoring of bridge vibration – Japan’s recent development and practice”, HKIE/IstructE Joint Structural Division Annual Seminar, Hong Kong, 2009
- [A27] Nagayama, T., Ushita, M., Dinh, H. M., Fujino, Y., Spencer, Jr. B. F., Rice, J. A., Jang, S.-A. Mechitov, K. A., and Agha, G. A. “Structural health monitoring system development and full-scale bridge vibration measurement using smart sensors”, Proc. 10th International Conference on Structural Safety and Reliability, Osaka, Japan, 2009
- [A28] 朝川皓之, 藤野陽三, 長山智則, 西川貴文: 「Vehicle Intelligent Monitoring Systemの海外展開へ向けたキャリブレーション手法の確立」, 土木学会第64回年次学術講演会, V-053, 2009.9.
- [A29] 井上友, 西川貴文, 藤野陽三: 「画像解析を用いた路面伸縮装置の位置同定アルゴリズムの構築」, 土木学会第64回年次学術講演会, VI-344, 2009.9
- [A30] Jo, H., Rice, J.A. Spencer Jr., B.F., and Nagayama, T. : Development of a high-sensitivity accelerometer board for structural health monitoring, Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2010, San Diego, 2010
- [A31] Nagayama, T., Ushita, M., Fujino, Y., Ieiri, M. and Makihata, N.: The combined use of low-cost smart sensors and high accuracy sensors to apprehend structural dynamic behavior, Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2010, San Diego, 2010.
- [A32] Cho, S., Jang, S.A., Jo, H., Mechitov, K.A. Rice, J.A., Jung, H.-J., Yun, C.-B., Spencer Jr., B.F., Nagayama, T., and Seo, J. : Structural health monitoring system of a cable-stayed bridge using a dense array of scalable smart sensor network, Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2010, San Diego, 2010
- [A33] Jo, H., Sim, S., Nagayama, T., and Spencer, Jr. B.F. : Decentralized stochastic modal identification using high sensitivity wireless smart sensors, The 5th World Conference on Structural Control and Monitoring, Tokyo, 2010
- [A34] Nagayama, T., Ushita, M., and Fujino, Y. : Efficient multihop data transport protocol for structural health monitoring and its evaluation at a full-scale bridge, The 5th World Conference on Structural Control and Monitoring, Tokyo, 2010
- [A35] Park, J.W., Cho, S., Jung, H.-J., Yun, C.-B., Jang, S. A., Jo, H., Spencer, Jr., B. F., Nagayama, T., and Seo, J.-W. : Long-term structural health monitoring system of a cable-stayed bridge based on wireless smart sensor networks and energy harvesting techniques, The 5th World Conference on Structural Control and Monitoring, Tokyo, 2010
- [A36] Dinh, H.M., Nagayama, T., Fujino, Y., Sakurai, N., and Nakayama, H. : Boundary condition identification of a real-life bridge by use of additional known masses, The 5th World Conference on Structural Control and Monitoring, Tokyo, 2010
- [A37] Tandian, C.H., Fujino, Y., Nagayama, T., Siringoringo, D., and Su D. : Response variability among identical expressway bridges under moving vehicles, The 5th World Conference on Structural Control and Monitoring, Tokyo, 2010
- [A38] 高橋英臣, 紺野克昭, 西川貴文, 藤野陽三: 「芝浦工業大学豊洲校舎における地震観測と構造物の回転応答」, 土木学会第65回年次学術講演会, 2010.9
- [A39] Takafumi Nishikawa, Hiroyuki Asakawa, Toshio Kimata, Toshinori Toda, Kotaro Nishigata: Real-time Monitoring System Using Dynamic Response of Vehicles and Its Application for Road Investigation in Kyrgyzstan, The 11th International Conference on Asphalt Pavements, Nagoya, Japan, 2010
- [A40] Nagayama, T., Ushita, M., and Fujino, Y., Suspension bridge vibration measurement using multihop wireless sensor networks, The 12th East Asia-Pacific Conference on

- Structural Engineering and Construction, Hong Kong, China, 2011.
- [A41] Di Su, Jitboon Laomenit, Yozo Fujino: Traffic-induced response prediction of highway bridges, The 12th East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction, Hong Kong, 2011
- [A42] D.M. Siringoringo, Y. Fujino, and H. Wenzel. : Vibration Characteristics of an Overpass Bridge during Full-Scale Destructive Testing, The 12th East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction, Hong Kong Special Administrative Region, China, 24-26 January, 2011
- [A43] D.M. Siringoringo, Y. Fujino,. : Observed Alongwind Vibration of a Suspension Bridge Tower and Girder, The 12th East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction, Hong Kong Special Administrative Region, China, 24-26 January, 2011
- [A44] D.M. Siringoringo, Y. Fujino, : Alongwind Vibration of a Suspension Bridge Tower and Girder: Full-Scale Measurement, The 8th International Conference on Structural Dynamics, Leuven, Belgium 4-6 July 2011
- [A45] Su, D., Fujino, Y., Nagayama, T., and Yamazaki, S. : Identification of cable damping characteristics of a long-span cable-stayed bridge, The 5th World Conference on Structural Control and Monitoring, Tokyo, 2010
- [A46] Lin, T.H., Hung, S. L., Fujino, Y., and Nagayama, T. : Study of energy harvesting technology in structural health monitoring, The 5th World Conference on Structural Control and Monitoring, Tokyo, 2010
- [A47] Nagayama, T., Jung, H.-J., Spencer, Jr., B. F., Jang, S.A., Mechitov, K. A., Cho, S., Ushita, M., Yun, C.-B., Agha, G. A., Fujino, Y. : International collaboration to develop a structural health monitoring system utilizing wireless smart sensor network and its development on a cable-stayed bridge, The 5th World Conference on Structural Control and Monitoring, Tokyo, 2010
- [A48] Nagayama, T., Ushita, M., and Fujino, Y. : High-throughput multihop wireless sensor network using multiple RF channels and its application to suspension bridge monitoring, The 3rd Asia-Pacific Workshop on Structural Health Monitoring, Tokyo, 2010
- [A49] D.M. Siringoringo, T. Nagayama, Y. Fujino, D.Su and C.Tandian,: Observed dynamic characteristics of an overpass bridge during destructive testing, Proceeding of the 5th International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management, IABMAS 2010, Philadelphia, 2010.7
- [B1] 中山雅哉(東京大学): 「インターネットの広域災害対策への活用 --安否確認システムとセンサユニットによる都市基盤リスク管理--」, 地域防災情報シンポジウム, 岩手, 2007.4
- [B2] Y. Mizuno, E. Monroig, Y. Fujino (University of Tokyo): “Data Archiving and Processing Method using Wavelet Decomposition for Structural Health Monitoring”, World Forum on Smart Materials and Smart Structures Technology, Chongqing, 2007.5.
- [B3] 水野裕介(東京大学): 「センシングによる都市空間のリスク評価」, 第 5 回建設・環境マネジメント講演会-構造物および人間の健康診断とパターン認識技術-, pp.75-93, 山口大学, 2007
- [B4] Yusuke Mizuno (Yamaguchi University), Yozo Fujino, Tomonori Nagayama, Takafumi Nishikawa (University of Tokyo): “Networked Sensing Platform for Civil Structures and its Prototype”, IABSE Conference, Helsinki, Finland, 2008.6.
- [C1] 佐藤世智, 栗原徹, 安藤繁: 「多重極ビームの振幅・位相映像化による多自由度変位計測」, 第 24 回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム, pp.73-76, 東京, 2007
- [C2] 佐藤世智, 藤本生松, 栗原徹, 安藤繁: 「多重極光ビームを用いる遠隔6軸変位計測 (第1報) -多重極ビームの生成と実時間映像検出-」, 第 24 回センシングフォーラム講演予稿集, pp.31-36, 仙台, 2007
- [C3] 佐藤世智, 藤本生松, 栗原徹, 安藤繁: 「多重極光ビームを用いる遠隔6軸変位計測 (第2報) -多重極ビームの数理的表現と検出理論-」, 第24回センシングフォーラム講演予稿集, pp.49-53, 仙台, 2007

- [C4] 佐藤世智, 藤本生松, 栗原徹, 安藤繁: 「多重零点光ビームによる遠隔 6 軸変位計測」, Optics & Photonics Japan 2007, 大阪, 2007.11
- [C5] 安藤繁, 佐藤世智, 栗原徹, 藤本生松: 「時間相関イメージセンサによる多重零点光ビームの実時間追跡と振幅位相分布計測」, Optics & Photonics Japan 2007, 大阪, 2007.11
- [C6] 藤本生松, 佐藤世智, 栗原徹, 安藤繁: 「多重零点光ビームの零点配置と伝搬変形の基礎理論」, Optics & Photonics Japan 2007, 大阪, 2007.11
- [C7] S Sato, I Fujimoto, T Kurihara, S Ando, “Optical Vortex and Correlation Image Sensor for Networked Deformation Sensing of Infrastructures”, 5th International Conference on Networked Sensing System (INSS2008), pp.39-42, Kanazawa, 2008
- [C8] 安藤繁, 奈良: 「線形システム同定・スペクトル推定の厳密直接代数解法」, 応用数理学会 2008 年年会, 2008.
- [C9] 安藤繁, 栗原徹: 「荷重積分法に基づく周波数変調信号の短時間厳密パラメータ推定」, センシングフォーラム, 2008.
- [C10] 安藤繁, 栗原徹, 奈良: 「線形システム同定・スペクトル推定の厳密有限フーリエ変換法」, 第 51 回自動制御連合講演会, 2008.
- [C11] S. Ando, N. Ono: “Spatio-temporal phase-encoding profilometry using correlation image sensor”, Proc. 2008 IEEE Int. Symp. Industrial Electronics (ISIE08), pp.786-791, Cambridge, 2008.
- [C12] S. Sato, T. Kurihara, S. Ando: “Real-time vibration amplitude and phase imaging with heterodyne interferometry and correlation image sensor”, SPIE Optics and Photonics 2008, San Diego, 2008.
- [C13] S. Sato, T. Kurihara, S. Ando: ”Anti-vibration optical interferometry for on-line surface profiling of micro-structures,” Proc. 25th Sensor Symposium, pp.700-703, 2008.
- [C14] S Sato, I Fujimoto, T Kurihara, S Ando: “Remote six-axis deformation sensing with optical vortex beams”, SPIE Photonics West 2008, San Jose, 2008.
- [C15] S. Ando, S. Sato, and T. Kurihara: “Real-time tracking experiment of higher-order Laguerre-Gaussian beam for remote six-axis deformation sensing”, Proc. Int. Conf. Networked Sensing Systems (INSS 2009), pp.106-109, 2009.
- [C16] 安藤繁, 佐藤世智, 栗原徹: 「多重零点ビームの実時間振幅位相撮像とパラメータ抽出」, 応用物理学関係春期連合講演会, 1a-K-8, 筑波, 2009
- [C17] 佐藤世智, 北野, 安藤繁: 「微小構造体の実時間二次元振動計測・周波数推定」, 応用物理学関係春期連合講演会, 1a-K-9, 筑波, 2009
- [C18] 安藤繁, 奈良: 「線形システム同定・スペクトル推定の有限観測時間厳密直接解法と応用」, 計測自動制御学会制御部門大会, 広島, FB1-2, 2009
- [C19] 佐藤世智, 安藤繁: 「時間相関イメージセンサによる実時間干渉振幅位相復元」, 日本光学会年次学術講演会 (OPJ2008), つくば, 2008
- [C20] S. Ando, T. Kurihara, and D. Wei, “Exact algebraic method of optical flow detection via modulated integral imaging -- Theoretical formulation and real-time implementation using correlation image sensor --”, Proc. Int. Conf. Computer Vision Theory and Applications (VISAPP 2009), pp.480-487, Lisbon, 2009.
- [C21] 知久馬, 栗原, 安藤, “多重零点光ビームを用いる反射表面の曲率計測の原理と基礎実験,” 第 27 回センシングフォーラム資料, 2B2-1, 2010.
- [C22] 斉, 栗原, 安藤, “多重零点ビームを用いる遠隔 6 軸変形計測,” 第 27 回センシングフォーラム資料, 2B2-2, 2010.
- [C23] 斉, 栗原, 安藤, “多重零点光ビームを用いる遠隔 6 軸変形計測: 小型実証システムの設計,” 電気学会計測研究会資料, IM10-041, pp.17-22, 2010.
- [C24] 安藤, 斉, 栗原, “多重零点光ビームを用いる遠隔 6 軸変形計測: 受信端でのヘテロダイン周波数推定に基づく非同期 2 次元振幅位相復調,” 電気学会計測研究会資料, IM10-042, pp.23-30, 2010.
- [C25] 安藤, 佐藤, 栗原, “短時間厳密周波数推定に基づく非同期ヘテロダイン干渉映像

- 法," 第 57 回応用物理関係連合講演会, 20a-J-3, 2010.
- [C26] 安藤, 持田, 栗原, ``短時間厳密周波数推定法:時間相関イメージセンサによる 2 次元並列実現," 平成 22 年電気学会全国大会, pp.229-230, 2010.
- [C27] 知久馬成美, 栗原 徹, 安藤 繁, ``多重零点光ビームを用いる反射表面の形状計測のための予備理論", 平成 23 年電気学会全国大会, 第 3 分冊, pp. 102--103, 2011.
- [C28] 斉宇嵐, 栗原徹, 安藤繁, ``多重零点光ビームを用いる遠隔6軸変形計測: 共役のラグールガウスビームの干渉," 第 58 回応用物理学関係連合講演会, 24p-KT-1, 2011.
- [C29] 知久馬成美, 栗原徹, 安藤繁, ``多重零点光ビームを用いる反射表面の主軸の推定" 第 58 回応用物理学関係連合講演会, 24a-KU-18, 2011.
- [C30] S. Ando and T. Kurihara, ``Direct estimation of wave source location from weighted integral measurements on finite boundary," Proc. SICE Annual Conference, pp.2752-2757, 2010.
- [C31] S. Han, T. Sawada, T. Iwahori, S. Kawahito, and S. Ando, ``Three-phase time-correlation image sensor using pinned photodiode active pixels, IS&T/SPIE Electronic Imaging 2010, 7536-28, San Jose, 2010.
- [C32] Yulan Qi, Toru Kurihara, and Shigeru Ando, "Open air experiment of long-range full-axis deformation sensing using multi-zeros Laguerre-Gaussian beam," INSS2011, Penghu, Taiwan, 2011.
- [C33] Yulan Qi, Toru Kurihara, and Shigeru Ando, "Remote full-axis deformation sensing using multi-zeros optical beam: Interference of two multi-zeros beam," ICSOS2011, pp. 228 – 231, Santa Monica, 2011.
- [C34] 斉 宇嵐, 栗原徹, 安藤繁, "多重零点光ビームを用いる遠隔6軸変形計測の戸外実験," 第 36 回光学シンポジウム, 東京, pp.57-60, 2011
- [C35] 斉 宇嵐, 栗原徹, 安藤繁, 佐野恵美子, 仲嶋一, "6 軸変位計測のための多重零点光ビームのフィッティングによるパラメータの推定," 電気学会計測研究会, pp23-27, 広島, 2011
- [C36] 佐野恵美子, 中島利郎, 仲嶋一, 樋口峰夫, 栗原徹, 安藤繁, "遠距離照射可能なレーザ鉛直基準線発生装置の開発", 電気学会計測研究会資料, pp.19—22, 広島, 2011
- [D1]長谷川信幸(東京大学), 猪又憲治, 平位隆史(三菱電機), 藤野陽三, 長山智則(東京大学):「鉄道既設の漏洩同軸ケーブルによる雨量計測に関する基礎的研究」, 土木学会第 62 回年次学術講演会, 4-355, pp.709-710, 2007.9.
- [D2]Tsukasa Mizutani, Yu Fuke, Yozo Fujino, Tomonori Nagayama (University of Tokyo), and Yusuke Mizuno (Yamaguchi University): "An experimental study on precipitation measurement using leaky coaxial cables", The 11th East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering & Construction, Taipei, Taiwan, 2008.11
- [D3]Mizutani, T., Fuke, Y., Fujino, Y., Nagayama, T., and Mizuno, Y.: "An experimental study on precipitation measurement using leaky coaxial cables." Proc., 11th East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering & Construction, Taipei, Taiwan, 2008
- [D4]水谷司, 藤野陽三, 長山智則, 猪又憲治, 仲嶋一:「表面波モードに着目した漏洩同軸ケーブルによる降雨量検知のための電磁波理論の展開」, 土木学会第 64 回年次学術講演会, II-174, 2009.9
- [D5]猪又憲治, 辻田亘, 水谷司, 鹿井正博, 鷺見和彦, 藤野陽三:「LCX の表面波崩れを利用した周囲環境の計測」, 通学技報, 電子通信情報学会, SANE2009-141, pp.13-18, 2009
- [D6]T. Mizutani, Y. Fujino, K. Inomata, W. Tsujita, T. Nagayama, T. Nishikawa, M. Shikai, K. Sumi, "LEAKY COAXIAL CABLE USAGE FOR MONITORING REAL-TIME HEAVY RAIN," E-3 201, Fifth World Conference on Structural Control and Monitoring, 12-14 July 2010.
- [D7]水谷司, 藤野陽三, 猪又賢治, 辻田亘, 長山智則, 西川貴文, 鹿井正博, 鷺見和彦:「漏洩同軸ケーブルを用いたリアルタイム豪雨検知のための人工降雨実験」, 土木学会第 65 回年次学術講演会, II-280, 2010.9.

- [E1] N.H.M. Kamrujjaman Serker, Z.S. Wu: “A Non-Baseline Damage Identification Method Based on The Static Strain Response”, Proceedings of International Conference on Mechanical Engineering 2007 (ICME 2007), Dhaka, Bangladesh, 2007.12
- [E2] H. Zhang, Z.S. Wu: “A standard test method for evaluating crack monitoring performance of distributed fiber optic sensors”, Proc. of the 3rd international Conference on Structural health monitoring of intelligent infrastructure, 141, Vancouver, Canada, 2007.11
- [E3] H. Zhang, Z.S. Wu; “Development of no-slip optic fibers as Brillouin scattering based distributed sensors”, Proceedings of the International Conference of Health Monitoring of Structure, Material and Environment (HMSME 2007), Nanjing, China, pp540-547, 2007.10
- [E4] N.H.M. Kamrujjaman Serker, Z.S. Wu: “Temperature Sensitivity of the Vibration based Damage Identification Methods”, Proceedings of International Conference on Health Monitoring of Structures, Material and Environment. Nanjing China, 621-625, 2007.10
- [E5] 吳智深, 金子祐介: 「ワイヤレスネットワークセンシング技術による構造物ヘルスマonitoringの提案」, 第 10 回「運動と振動の制御」シンポジウム講演論文集, 論文番号 1221, 2007.8
- [E6] 吳智深, 岩下健太郎, 張浩 (茨城大学): 「ブリルアン散乱分布センシング技術によるコンクリート構造物のヘルスマonitoringシステムの構築」, コンクリート構造物のヘルスマonitoring技術に関するシンポジウム (コンクリート技術シリーズ No.76), II-85～94, 2007.4
- [E7] 橋本明宏, 吳智深: 「分布型光ファイバセンシングにおけるひずみ測定精度に及ぼす各種要因に関する研究」, 第 63 回土木学会年次学術講演会, V-192, 2008.9
- [E8] Wu, Z.S. and Adewuyi: “A.P. Comparative Assessment of Vibration-Based Damage Identification Algorithms Based on Different Measurement Techniques”, Proceedings of 4th International Workshop on Advanced Smart Materials and Smart Structures Technology, Tokyo, Japan, 24-25 June, 2008
- [E9] Wu, Z.S. and Adewuyi: “A.P. Vibration-based structural health monitoring technique using statistical features for data stability assessment and damage localization”, Proceedings of the 16th SPIE International Conference on Sensors and Smart Structures Technologies for Civil Mechanical and Aerospace Systems, Vol. 7292, Signal Processing II, San Diego, CA, 8-12 March, 2009
- [E10] Adewuyi, A.P. and Wu, Z.S.: “Structural damage localization using modal macro strain-based flexibility methods with long-gage FBG sensors”, Proceedings of the 4th International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure, Zurich, Switzerland, 22-24 July, 2009.
- [E11] 岩下健太郎, 吳智深, 橋本明宏, 張浩: 「光ファイバによるコンクリートのひび割れ幅測定に関する実験的研究」, 第 11 回「運動と振動の制御」シンポジウム講演論文集, 論文番号 C01, 2009.9
- [E12] 橋本明宏, 吳智深, 岩下健太郎, 瓜生昂次郎: 「光ファイバを用いた鋼ケーブル材の損傷モニタリングに関する実験的研究」, 第 11 回「運動と振動の制御」シンポジウム講演論文集, 論文番号 C02, 2009.9
- [E13] 橋本明宏, 吳智深, 岩下健太郎, 瓜生昂次郎: 「光ファイバセンシングによるケーブル材の静的分布モニタリング手法の開発」, 第 64 回土木学会年次学術講演会, V-149, 2009.9
- [E14] Adewuyi, A.P. and Wu, Z.S.: “Performance of modal macrostrain-flexibility methods for damage localization using long-gage FBG sensors”, Proceedings of the 7th International Workshop on Structural Health Monitoring, Stanford, California, USA, 9-11 Sept. 2009.
- [E15] Adewuyi, A.P. and Wu, Z.S.: “A statistical relative measurement index for damage locating and robustness-to-noise assessment”, Proceedings of the 10th International Conference on structural Safety and Reliability (ICOSSAR), Osaka, Japan, 13-17 Sept. 2009.
- [E16] 藍原龍太, 吳智深: 「スマート連続繊維棒材およびその応用法の開発に関する研究」, 第 65 回土木学会年次学術講演会, VI-070, 2010.

- [E17] 西丸公太, 呉智深: 「ロングゲージ FBG センサの高感度化に関する研究」, 第 65 回土木学会年次学術講演会, VI-072, 2010.
- [E18] C. H. Li, A. Guzik, K. Kishida, The high-performance BOTDA based systems for distributed strain sensing, The 3rd International Forum on Opto-electronic Sensor-based Monitoring in Geo-engineering, Suzhou, China, Sept. 29-30, 2010
- [E19] Y.S. Tang, Z.S. Wu, C.Q. Yang, G. Wu, C.F. Wan, A Novel SHM Method for Flexural Structures with Distributed Long-gage Fiber Optic Sensors, Proceeding of 3rd Asia Pacific Workshop on Structural Health Monitoring 2010, Tokyo, Japan, 2010. (CD-ROM).
- [E20] S. Shen, Z.S. Wu, C.Q. Yang, C.F. Wan, S.W. Song, G. Wu, A Temperature Compensation Method for the Distributed Sensitive Fibre Optic Sensor, Proceeding of 3rd Asia Pacific Workshop on Structural Health Monitoring 2010, Tokyo, Japan, 2010. (CD-ROM).

③ ポスター発表 (国内会議 4 件、国際会議 1 件)

- [C1] S Sato, I Fujimoto, T Kurihara, S Ando: “Remote Full-axis Deformation Sensing with Optical Vortex Beam for Health Monitoring of Infrastructures”, 3rd International Conference on Sensing Technology (ICST2008), pp.452-456, Tainan, 2008
- [C2] 栗原徹, 佐藤世智, 安藤繁, “多重零点光ビームを用いた6軸変位計測のための複素関数論的特徴抽出に関する一考察,”第24回信号処理シンポジウム予稿集, pp.142—147, 鹿児島, 2009.
- [E1] 呉智深, 岩下健太郎 (茨城大学): 「界面すべり制御による高性能光ファイバセンシング用ケーブル」, 産学連携フェア (さいたまスーパーアリーナ), 2008年2月14日～15日
- [E2] 呉智深, 岩下健太郎 (茨城大学): 「界面すべり制御による高性能光ファイバセンシング用ケーブルの開発」, ひたちテクノフェア, 東京, 2007.11
- [E3] 呉智深, 岩下健太郎, 橋本明宏 (茨城大学): 「界面すべり制御による高性能光ファイバセンシング用ケーブル」, ひたちテクノフェア, 東京, 2008.12

(4) 知財出願

① 国内出願 (4件)

- [D1] 降雨検知装置, 三菱電機・辻田亘, 三菱電機・仲嶋一, 三菱電機・鷺見和彦, 三菱電機・平位隆史, 三菱電機・猪又憲治, 東京大学・藤野陽三, 東京大学・長山智則, 東京大学・水谷司, 三菱電機株式会社, 国立大学法人東京大学, 2009年7月29日, 2009-176011
- [E1] 分布型光ファイバセンサ, 岸田欣増, 李哲賢, 西口憲一, ニューブレクス株式会社, 2007年5月18日, 2007-133074
- [E2] 腐食監視装置, 呉智深, 山内良昭, 岸田欣増, 茨城大学, ニューブレクス株式会社, 2007年2月7日, 2007-027890
- [E3] 風力監視装置, 呉智深, 山内良昭, 岸田欣増, 茨城大学, ニューブレクス株式会社, 2007年2月7日, 2007-027891

② 海外出願 (0件)

(5) 受賞・報道等

① 受賞・受章

- [A1] 藤野陽三, 阿部雅人, 長山智則: 米国土木学会 Raymond C. Reese Research Prize (2007)
- [A2] 藤野陽三, 石原孟, 山口敦: 土木学会論文賞 (2007)
- [A3] 藤野陽三他: 第3回 SHMII 国際会議最優秀論文賞, Vancouver (2007)

- [A4]藤野陽三：紫綬褒章(2007年春)
- [A5]宮下剛, 石井博典, 藤野陽三, 庄司朋宏, 関雅樹:土木学会田中賞(論文部門, 2009)
- [A6]藤野陽三他:第4回 SHMII 国際会議最優秀論文賞, Zurich(2009)
- [A7]水谷司:土木学会年次講演会優秀講演者賞(2009)
- [A8]長山智則:土木学会論文奨励賞(2010)
- [A9]水谷司:土木学会年次講演会優秀講演者賞(2010)
- [A10]水谷司:GCOE Young Researcher Award(2010)
- [A11]藤野陽三:米国土木学会 R. H. Scanlan Medal(2011)
- [A12]藤野陽三:光華同済国際級学術大師講師(2011)
- [C1]安藤繁, 小野順貴:IEEE Int. Symp.Industrial Electronics (ISIE 2008) Best Paper Award(2008)
- [C2]栗原徹:計測自動制御学会センシングフォーラム学術技術奨励賞(2009)
- [D1]三菱電機:2006年十大新製品賞;日刊工業新聞社(2006)
- [E1]呉智深:2009 SHM Person of the Year Award, J. of SHM, IWSHM, EWSHM(2009)

② マスコミ(新聞・TV等)報道

- [A1]藤野陽三:「東大は発信する:恒常的に線路検査をする装置を開発」, 東京大学新聞(2006年8月1日)
- [A2]藤野陽三:「社会資本」の老朽化, 夕刊読売新聞(2007年1月27日)
- [A3]藤野陽三:「リアルタイムで道路点検」(道路高速診断システム), 東京大学新聞(2007年3月21日)
- [A4]藤野陽三:「研究を社会のために 都市基盤の安全を守る」, 東大新報, 第1006号(2007年5月25日)
- [A5]藤野陽三:「論点 米崩落事故の教訓」, 読売新聞(2008年3月27日)
- [E1]茨城大学・構造計画研究所:「FBG 分布センシングで実橋試験」, 橋梁新聞, 第1035号, pp.9(2009年8月1日)

③ その他

- [A1]藤野陽三:世界構造制御モニタリング学会々長(2008-2012)
- [A2]藤野陽三: SHMII(構造ヘルスマニタリングとスマートインフラストラクチャ学会) 副会長・初代フェロー(2008-)
- [A3]藤野陽三: ANCRiSST(Asia-Pacific Network of Centers for Research in Smart Structures Technology)アジア太平洋スマート構造研究連合会会長(2011-)

(6)成果展開事例

①実用化に向けての展開

- ・ 実建物・橋梁に設置したモニタリングシステム

1)芝浦工業大学に設置した高密度振動センサ・ネットワークによるモニタリングシステム

2009年から設置にむけて検討を開始した芝浦工大での振動センサ・ネットワークは2010年末にほぼそのシステムが完成した。75成分の加速度, 12成分の変位を計測するもので, 一つの建物に設置した振動計測システムとしてはもっとも高密度と言え, また LAN を介して振動計を制御し, データを収集する, その上, 平均して 30 $\mu$ 秒程度以下の同期を達成する, 最先端な振動ネットワーク・システムである。幸運にも, 2011年3月の東北太平洋地震の前震, 本震, 余震を記録し, 建築耐震工学上極めて有用なデータセットを得ることができた。このシステムは, 地震応答を通じて, また常時微動から建物の健全性をモニタリングをすることができるだけでなく, 地震時の応答からリアルタイムに建物内のディスプレイシステムに揺れのレベルや安全度の余裕を示すシステムも併せて有している。このようなシステムは内外に例のないユニークなシステムである。今後, ソフトを改善充実することで, その利活用のレベルを上げることが可能で

あり、継続的な努力のよりを建物の次世代センサ・ネットワークのモデルケースになるものと言える。

## 2) 橋梁の分布型光ファイバによるモニタリング

測定装置 (PPP-BOTDA) について、プリポンプ光の形状およびそれと主ポンプ光間距離の最適化等により、測定精度を目標の  $\pm 25 \mu \epsilon$  で安定化、 $\pm 10 \mu \epsilon$  に飛躍的に高められる可能性を見出した。また、処理アルゴリズムの改善等により超高速化が図られ、目標の 3-5Hz を大きく上回り、100Hz でもある程度安定した計測が実現できた。一方、センサについては、連続繊維複合材との複合化や含浸・接着剤の最適化により被覆すべりを制御することにより、分布型光ファイバセンシングの高精度化、実質的な空間分解能の改善、そして高感度化が図られ、センサの長期耐久性・耐候性を格段に高めた。さらに、高度化された分布型光ファイバセンシング技術による静的および動的計測に基づく都市インフラ構造物の損傷検知や健全性評価手法の開発に成功している。これらの成果に関して内外に公表するとともに、既に2つの特許を取得している。以上により開発した測定装置とセンサおよび解析手法を実構造物 (川根大橋、妙高大橋) に実装し、構築された構造モニタリング・システムの有意性と実用性が一次的ではあるが、実証された。

## ② 社会還元的な展開活動

- 代表の自身のこれまでの研究活動に CREST 研究で得られた知見を加え、「Structural Health Monitoring Encyclopedia」という百科事典を 2009 年に Wiley 社から刊行した
- 上記のとおり、建物振動センシング・システムで得られたデータおよびその分析結果を WEB で公開している。
- 併せて、一般 (市民) へ向けたセンシング情報の提供について、情報 (データもしくは分析結果) の翻訳・提供方法の検討を重ね、一部では WEB 公開として実装している。

## § 6 研究期間中の主なワークショップ、シンポジウム、アウトリーチ等の活動

年月日	名称	場所	参加人数	概要
2007 年 4 月 19 日	コンクリート構造物のヘルスマモニタリング技術に関するシンポジウム	(社) 土木学会	120	コンクリート構造物の構造ヘルスマモニタリング (SHM) 設計法に関する先端研究発表他
2007 年 7 月 21 日-23 日	U.S.-Japan Workshop on Advanced Integrated Sensor Technologies for Safe and Secure Societies and Better Quality of Life	Aomi Frontier Building (青海フロンティアビル)	50	Keynote lectures on following research fields; bio-sensing and actuation, safe and secure societies, better quality of life, and research presentation by students from both countries.
2009 年 7 月 17 日	CREST 研究交流集会「複素場・ベクトル場の理論と解析手法・実現手法・応用計測手法」	東京大学工学部 6 号館 大会議室	9	関連する研究テーマにとりくむ国内外の先鋭的な研究者が集い、それぞれの研究内容について発表・討議する
2010 年 7 月 12 日-15 日	第五回世界構造制御モニタリング国際会議開催 (開催責任者: 藤野)	京王プラザホテル (新宿)	-	構造モニタリング分野における国際会議
2010 年 7 月 15 日-8 月 4 日	APSS2010 スマート構造に関するサマースクール	東京大学工学部 1 号館	-	世界各国の学生を対象として、主に構造ヘルスマモニタリングや

日	(開催責任者:藤野)	他		制御などについての学習機会と相互交流の場を設けるサマースクール
---	------------	---	--	---------------------------------

## § 7 結び

### ◇研究チームのこと

私どものチームは都市基盤施設のリスク監視技術を大きく進展させるという目的に向けて集まった混合チームである。藤野は、これまで橋梁を中心としたインフラストラクチャのモニタリングの研究を一貫して行ってきており、インフラの全貌がわかる立場で研究チームの代表をつとめた。メンバーの呉教授（茨城大）はコンクリートの光ファイバセンシング、安藤教授（東大）は日本を代表する計測技術の専門家として光をベースに様々な計測手法を開発してきておられるが、これまでインフラストラクチャとの縁は極めて薄かった。三菱電機先端総合技術研究所の研究メンバーグループも安藤教授と似たポジションにある。中山教授（東大）は情報処理の専門家である。このように、ニーズ側とシーズ側の双方をとりこんだチームであり、専門の幅がこのように大きいグループを取りまとめることは、エキサイティングではあるが、難しい面がなかったわけではない。このような寄り合い所帯であるが故の良さも多分にあった。自分の専門を超えて他の専門の動向を知る機会が増え研究の幅が今回の CREST 研究を通じて広がったことをメンバー全員が痛感している。センシング技術が益々必要とされるインフラストラクチャの分野に必要な技術、スペック等を知っていただき、インフラには不慣れであった安藤教授、三菱グループにはそれに対応したセンシング技術の開発に取り組んでいただいたと思う。

安藤教授の光ビームによる 6 自由度変位計測の技術は、変位が計測できるということが極めて魅力的ではあったが、困難な課題にも直面し、正直なところ予定していたところまでは実現しなかったところがある。極めて画期的で、将来性も高い技術であり、今後何らかのサポートを得て研究することで都市基盤の分野での様々な応用が期待できる。

本研究の中で特段大きな位置を占めたわけではないが、広域環境モニタリングということで同軸漏洩ケーブル (LCX) の降雨モニタリング研究を行った。この問題は電磁波を扱うもので三菱電機のグループが主たる研究メンバーではあるが、当時東京大学修士課程であった水谷司君がこの問題に興味を示し、自ら電磁気の講義を履修し東京工業大学の安藤教授 (IEEE のアンテナ学会会長) とめぐりあい、アンテナ工学に関する指導を得て、この LCX による降雨モニタリングの研究にチャレンジした。東大工学部での屋外計測、京都大学防災研究所宇治川ラボラトリーにおける国内実験、理論解析、高度なデータ処理波形解析を実施しこの 9 月に半年間短縮して博士論文を書き上げた。水谷君は土木工学が専門であるがアンテナ技術で博士論文を書いたわけで今後土木工学の分野でセンシング・モニタリングだけでなくインフラの監視において顕著な業績を上げられると思われるが、このような人材を輩出できたのは CREST 事業のおかげであり、私の 30 年間の教員経験の中でも初めての経験である。

本研究のポイントの一つは都市基盤を構成する要素の代表格にある建物を対象に、センシングネットワークの実装化があった。当初は東京大学の校舎を用いて行うことを考えていた。地震研究所や情報基盤センターにセンサを設置して計測を始め、それなりの成果を上げたが、特段特徴のある建物でもないこともあり、その後の展開について悩んでいるところがあった。板生研究総括を通じて、江東区豊洲に新たに建設される民間建物を実装の場として紹介されたが、いろいろな事情で残念ながら実現には至らなかった。しかし、その機会に周辺の建物をサーチし、芝浦工業大学豊洲キャンパスの最新の免震校舎ビルが候補に挙がり、地震計測を専門としている紺野芝浦工大教授を通じて大学に相談したところ、

地震計測ならびに利活用の場として使わせていただくことに賛同いただいた。LAN を介した地震計測は時刻同期の問題がありなかなか解決し得なかったが、ネットワーク上で時刻情報をやりとりするプロトコルを用いることで解決できた。建物の中を LAN で結ぶ地震計測ネットワークを構築できたことは CREST 研究の大きな成果と言えるだろう。ネットワークがほぼ平成 22 年度に完成し、様々な検証計測をおこなってきたところに 3 月 11 日の東北太平洋沖地震 (M9) が発生し、極めて貴重な記録を取得できたことは本当に幸運であった。その前兆の余震も記録がとれており、複雑な形状を有する建物で多数の地震記録が得られたのは世界で初めてであると思われ、地震時の免震ビルの挙動を解析するうえで貴重なデータセットになっている。すでに解析を開始しているが、いくつか興味のある知見が得られている。極めて適時に監視システムを設置できたが、これも CERST 事業のおかげと思われる。なお、このシステムは、校舎内にいる方への地震の揺れ情報のリアルタイム提供 (イメージ図の例を図 31 および図 32 に示す) など、今後も新たなサービスを加えていく予定であり、建物の安全監視だけでなく、建物利用者自身がモニタリングの存在を認識し、その恩恵を受けるようなシステムを構築する計画である。5 年後、10 年後、時間とともに価値の増すシステムに成長することであろう。

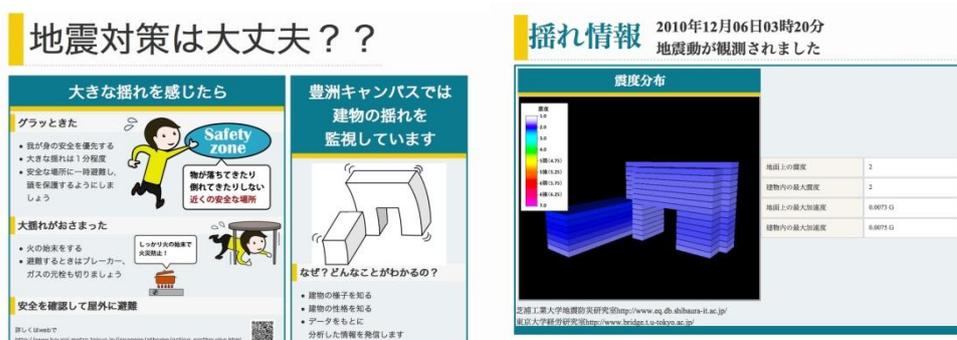


図 31 学内ディスプレイへの情報提供の内容の例



図 32 学内ディスプレイでの情報提供のイメージ

CREST の研究に採択されてから、5 年近くが経過するわけであるが、この間におけるインフラストラクチャの分野でセンシング・モニタリングに対する関心は非常に高まり、隔世の感がある。これは世界的な流れでもある。2007 年のミネソタのトラス橋の落橋事故などインフラの事故が内外で続いて生じたことが大きく影響したと思われる。センシングの技術も日進月歩であり、研究的にも新しいテーマの宝庫となっている。2011 年東北太平洋地震では新幹線が早期地震計測システムのお陰で速度ダウンに成功し、脱線を免れるというモニタリングもメリットも広く社会に伝わった。個人的には、海外の研究者 2 名と Structural Health Monitoring Encyclopedia という百科事典を 2009 年、

Wiley 社から刊行したが, CREST プロジェクトでこの分野の研究に専心できたからであり, 感謝している. 23 年度をもって, 本研究は終了するわけであるが, 実装した橋梁や建物を使っての技術の改良を継続し, この分野が社会に定着することへの貢献を研究代表者として継続することを約束したいと思う.