

平成 22 年 5 月 25 日現在

研究種目：基盤研究 (B)
研究期間：2007～2009
課題番号：19360201
研究課題名 (和文) 鉄道ネットワークを対象とした高密度センシング技術の開発とその地震災害制御への適用
研究課題名 (英文) Development of high-density sensing techniques for railway networks and its application to earthquake disaster control
研究代表者 清野 純史 (KIYONO JUNJI) 京都大学・工学研究科・教授 研究者番号：00161597

## 研究成果の概要 (和文)：

鉄道ネットワークを対象として、センシング技術を利用した災害発生時の迅速な機器制御により、被害を最小限に留めるような理論的な枠組みの構築と技術開発を行った。小型マイコンに加速度センサとワイヤレス伝送技術を実装し、これをセンサネットワークとして利用するためのハードおよびソフトの環境整備を行い、プロトタイプを作成した。さらにセンシングデータの大容量送受信が可能であるか等の検証を行うとともに、損傷判断や被害検知手法の開発を行った。

## 研究成果の概要 (英文)：

The framework and sensing technique, by which the damage to railway systems is minimized, were developed. Prototype of network sensing device by using the microcomputer, in which accelerometer and wireless transmission unit were implemented, was manufactured. The possibility of mass data transmission and high-density sensing were verified. Damage or failure detection technique was studied.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	5,000,000	1,500,000	6,500,000
2008 年度	3,500,000	1,050,000	4,550,000
2009 年度	2,900,000	870,000	3,770,000
年度			
年度			
総計	11,400,000	3,420,000	14,820,000

## 研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学、構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：地震工学

## 1. 研究開始当初の背景

1995 年の兵庫県南部地震は、大都市圏を襲った戦後初の大規模直下型地震であり、阪神地区を中心として甚大な被害をもたらした未曾有の地震であった。鉄道においては、列車の脱線、高架橋の損壊、軌道変状、盛土の崩壊のみならず、停車場設備や電気設備、そ

して車両基地にいたるまで大きな被害を受けた。また、2004 年の新潟県中越地震では、乗客 151 人を乗せた上越新幹線下り列車が 200km/h を超えるスピードで走行中に妙見トンネルの出口付近で脱線して停止した。上越線などの在来線にも軌道や電車線をはじめ、あらゆる鉄道施設に大きな被害が生じた。ま

だ記憶に新しい2005年のJR福知山線の尼崎脱線事故では、乗客乗員107人が犠牲となっている。このような鉄道の災害や事故を未然に防ぐ、あるいは最小限にとどめるための最前線の技術はセンシングであるが、現在地震災害に対する危機制御として実用化しているものは、P-S波の到達時間の差を利用した警報システム「ユレダス」のみであり、また、通常の脱線対策にしてもATSやATC等による閉塞区間内の速度制御や脱線防止装置が主体であり、これを改良すべく安価で高密度配置の可能な新たなセンシング技術の開発に着手した。

構造物や個々の部材に対する既存の計測技術、あるいはある領域の代表値として用いられてきた計測値を災害検知や危機制御に応用した例は、古くは河川に沿って配置された雨量計・水位計による水害への対応や、風速計による長大橋や鉄道橋への対応から、ワイヤセンサや光ファイバひずみ計、GPSなどによる土石流や地すべりなどの地盤災害への対応に至るまで、国内外を問わず枚挙に暇が無い。またわが国では、災害情報収集・提供のための気象庁を始めとする関係諸機関の地震計・震度計のネットワークや国土地理院によるGPSネットワークが、世界に類を見ない程高密度に日本全土に張り巡らされている。しかし、これらのネットワークが数十mから数キロ、数十kmオーダー間隔でのセンシングであるのに対し、本研究では鉄道構造物の軌道やそれを支える高架橋を対象に、上述のセンサ配置とはオーダーの異なる高密度センサネットワークを想定した。この技術的背景には、ネットワークアーキテクチャやプロトコル、信号処理機能など多くの機能を有する近年の小型で安価なワイヤレスセンサの目覚ましい発展があり、これに目的にかなった形で改良を加えれば、地震時における鉄道ネットワークの危険事象の定量的予測とその制御が可能となるものと考えられる。

鉄道ネットワークに対する近年の地震災害を勘案すると、これによる人的・物的被害を未然に防ぐために今後講ずべき対策としては、以下のようなものが考えられる。

- 1) 列車を早く止める: センサーの改良や設置箇所を飛躍的に増大させるなど、直下型を始めとする様々な地震に対応する新たなシステムを創出する。
  - 2) 列車を早く止める: 制動の性能を飛躍的に向上させる。
  - 3) 軌道を揺れないようにする: 免震装置など新たなデバイスや機能を取り入れた構造にする。
  - 4) 脱線した場合でも人的被害が最小となるように、車内設備や鉄道構造物を整備する。
- 2)は現在でも最先端の技術を駆使している

ため、一朝一夕で事が成るとは考えにくい。3)は現在、建物など線状・面状の拡がりを持つていないものについては効果を発揮しているが、線路のような長大線状構造物はその上を列車が走るため、高架橋や軌道の変形、および2点間の位相差の問題を克服せねばならず、これもすぐに解決する問題ではない。4)は、現在までほとんど見逃されている点であり、側壁の強化や脱線防止のためのハード面の強化を今後推進するとともに、脱線・転覆時にも車内の乗客を守ることができるような車内設備の整備が必要となるが、すぐにも着手できる問題である。

迅速な研究開発と現場への実装が必要なものとは特に1)に関するものであり、本研究課題は特にこのような点に着目して、新たなセンサやシステムの開発、そしてその実装を行った。

さらに、開発するセンシング技術は地震災害の制御だけに特化するものではなく、日常的に生じる可能性のある事故の検知や、事故につながる構造物の劣化に対するヘルスマニタリングとしての利用も念頭に置いた。

## 2. 研究の目的

鉄道構造物には高架橋や盛土、軌道や電車線などの線状構造物から、駅舎や信号施設、跨線橋などの個別構造物まで多種多様な対象物が存在する。また、ネットワークの性質上、対象とする地理的領域も広域的になると同時に、地震災害を考える場合には構造物に入力する外力そのものの検知から構造物の応答などの出力の抽出まで幅広い計測・計算技術も必要となる。さらに、車両運行は不確定要素を含む各種ネットワークから成る複雑系の中で成り立っているため、鉄道構造物のセンシングの結果をフィードバックして適切な指示を車両に与え、人的被害に直結する車両事故や災害を未然に防ぐ必要がある。本研究では、鉄道ネットワークを対象として、センシング技術を利用した災害発生時の迅速な危機制御により、被害を最小限に留めるような理論的な枠組みの構築と技術開発を図ることを目的とした。

## 3. 研究の方法

ネットワークアーキテクチャやプロトコル、信号処理機能を実装した既存のワイヤレスセンサを加速度センサとして利用できるように改良し、これをセンサ・ネットワークとして利用するためのハードおよびソフトの開発を行った。また、開発されたセンサ・ネットワークにより収集されたセンシングデータの加工を通して、損傷判断や被害検知が可能であるか、それを基にした危機制御が可能であるかを数値シミュレーションで詳細に検証するために損傷同定手法の開発を

行った。さらに、様々なシステムが絡み合う鉄道システムが対象となるために、3次元有限要素法や3次元個別要素法を主体にし、このような複雑系に対する多様性に対応可能な統合シミュレータを開発した。

これを具体的実現するためには以下の項目を念頭において研究を遂行した。

(1) 既往技術のサーベイと開発重点項目の抽出

既存の地震動検知システム、警報システム、損傷検知システム、被害推定システムや防災支援システムを、その対象やシステムモデル、取り扱う情報、その情報収集方法、データベース、情報分析・解析プロセス、制御方法などの観点からサーベイし、本研究で開発するセンサ・ネットワークの特長を最大限に生かすためのデータの蓄積と調査を行った。

(2) 計測用小型ワイヤレスセンサの開発とネットワークの構築

ネットワークアーキテクチャやプロトコル、信号処理機能を実装した既存のワイヤレスセンサを加速度センサとして利用できるように改良し、これをセンサ・ネットワークとして利用するためのハードおよびソフトの環境を整備した。さらに、高密度センシングが可能であるか、センシングデータの大容量送受信が可能であるか等の検証を行った。

(3) 損傷判断や被害検知手法の開発

開発されたセンサ・ネットワークにより収集されたセンシングデータを用いて損傷判断や被害検知を行うためには、数値シミュレーションで詳細に検討する必要がある。そのために、高架橋や盛土の地震時挙動を高精度で再現できるシミュレータ、および逆解析としての損傷同定手法の開発が必要となる。また、

(4) 災害発生時の挙動とその制御を取り扱える統合シミュレータの開発

ここで開発したセンサ等を実際の鉄道高架橋などの現場や小型模型に実装した結果を再現できるシミュレータの開発を行なった。計測・制御対象は、構造物の震動から信号、車両の運行に至るまでの一連の計測・制御を考えているため、高精度かつ高解像度の数値計算を行わなければならない。様々なシステムが絡み合う鉄道システムが対象となるために、このような複雑系に対する多様性に対応可能な統合シミュレータを構築する必要がある。このため、3次元有限要素法や3次元個別要素法を主体にした大規模解析を行えるシミュレータの開発を行った。

#### 4. 研究成果

鉄道ネットワークに関する地震災害時のリアルタイム制御は、これまで地震時警報システム「ユレダス」が唯一のシステムであり、新幹線沿線の対象領域に数キロ～数十キロ

間隔で設置された地震計からの情報を基に、車両運行に危険な地震の揺れのレベルを判断、停止指令を出すものである。本研究で扱ったセンサは、軌道やそれを支える高架橋に高密度で配置し、ユレダスのような「地盤の揺れ」ではなく車両運行に直接関係する「構造物の応答」を検知して、それをリアルタイム制御に利用しようとするものであった。

そのため、ネットワークアーキテクチャやプロトコル、信号処理機能を実装した既存のワイヤレスセンサを利用し、比較的安価かつ容易に入手可能な容量型 MEMS 加速度センサを利用して小型地震計のプロトタイプを作成した。また、ライフラインの同時破壊被害モデルや、鉄道ネットワークを構成する鉄道高架橋の損傷を効率的に検出するための、局所損傷同定手法を提案するとともに、大規模数値計算を行えるシミュレータを開発した。また、地震時の振動モニタリングによって得られる橋脚の最大相対変位から、地震直後の迅速な被災度判定を実現する手法を開発した。

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 15 件)

- ① 小野祐輔・清野純史・小林望・新垣芳一・高橋天平: 小型センサーを用いた構造物の地震被害の即時判定法の提案, 土木学会地震工学論文集, 査読有り, Vol. 30, 705-709, 2010.
- ② 堀 宗朗・田中謙吾ら: 自然災害シミュレーションのためのGISから都市モデルへの汎用的データ変換, 土木学会論文集A, 査読有り, Vol. 66, No. 1, pp. 1-12, 2010.
- ③ Hori, M., K. Oguni and T. Ichimura: Integrated Simulation for Earthquake Hazard and Disaster Prediction, Refereed paper, Journal of Earthquake and Tsunami, 3, pp. 121-141, 2009.
- ④ 能島暢呂: 隣接ライフラインの地震時同時被害に関する確率論的評価モデル, 地域安全学会論文集, 査読有り, No. 11, pp. 183-192, 2009.
- ⑤ 西川隼人・宮島昌克: 計測震度と最大加速度による地震動の周期特性の評価, 土木学会論文集A, 査読有り, Vol. 65, No. 3, pp. 784-796, 2009.
- ⑥ 清野純史: 地震とライフライン被害, 活断層研究, 査読有り, 第28号, pp. 95-106, 2008.
- ⑦ 土橋 浩・堀 宗朗ら: 複雑な構造を持つ大型トンネルの地震応答に対する大規模三次元数値解析の必要性の検討, 土木学会論文集A, 査読有り, Vol. 64, No. 3, pp. 639-652, 2008.
- ⑧ 能島暢呂・神谷篤: 推定震度情報の不確定

性を考慮した確率論的な被害推定モデル，東濃地震科学研究所報告，査読なし，No. 22，pp. 237-254，2008.

- ⑨能島暢呂：脆弱性指数を用いたライフライン網の地震時脆弱性評価 ～上水道配水管網への適用～，地域安全学会論文集，査読有り，No. 10，pp. 137-146，2008.
- ⑩太田篤志・小野祐輔・清野純史：重合メッシュ法による杭-地盤系の有限要素解析，構造工学論文集，査読有り，Vol. 54A，pp. 971-978，2008.
- ⑪清野純史・永井克実・鈴置真央：地震時における列車事故とその人的被害について，第14回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集，査読有り，191-194，2007.
- ⑫Furukawa, A., H. Otsuka, J. Kiyono, H. Iemura: Vibration-Based Structural Damage Detection Using Ensemble Learning and Averaging, Refereed paper, International Journal of Earthquake Engineering and Engineering Seismology, No. 3, pp. 23-34, 2007.
- ⑬清野純史・土岐憲三・Charles Scawthorn・藤井俊介：高速道路走行中の自動車に対する地震対策について，査読有り，地域安全学会論文集，No. 9，2007.
- ⑭西川隼人・宮島昌克：石川県とその周辺地域における地震観測点の震度増幅度と地盤条件との対応，構造物の安全性および信頼性に関する論文集，査読有り，JCOSSAR 2007，pp. 753-758，2007.
- ⑮西川隼人・宮島昌克：石川県内の観測点における地盤増幅度の評価，日本地震工学論文集，査読有り，Vol. 7，No. 2（特集号），pp. 96-109，2007.

[学会発表] (計5件)

- ①Kiyono, J.: Modeling of Ground Profile in Padang by Using Microtremor Records, Proc. of the International Symposium & 2<sup>nd</sup> Regional Conference on Geo-disaster Mitigation in Asia, February 25, 2010, Bali, Indonesia.
- ②古川愛子ら：Pushover解析と振動モニタリングによるRC橋脚の地震被災度の即時判定手法について，コンクリート工学年次大会，2010年7月7日，大宮，埼玉.
- ③堀 宗朗・弓削田恭兵・市村強：ライフライン地震被害復旧過程を模擬するマルチエージェントの開発に関する基礎的研究，第1回地震リスクマネジメントと事業継続性シンポジウム，2009年11月10日，土木学会，東京.
- ④清野純史・鈴置真央：緊急地震速報に対する高速道路走行中の車両挙動，第27回日本

自然災害学会学術講演会，2008年9月25日，九州大学，福岡.

- ⑤古川愛子・大塚久哲：理論誤差を指標とした損傷同定のための最適計器配置・最適起振振動数の決定手法，地震工学研究発表会，2007年8月28日，九州大学，福岡.

[その他]

ホームページ等

<http://www.quake.kuciv.kyoto-u.ac.jp>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

清野 純史 (KIYONO JUNJI)  
京都大学・工学研究科・教授  
研究者番号：00161597

### (2) 研究分担者

宮島 昌克 (MIYAJIMA MASAKATSU)  
金沢大学・自然科学研究科・教授  
研究者番号：70143881

堀 宗朗 (HORI MUNE0)  
東京大学・地震研究所・教授  
研究者番号：00219205

能島 暢呂 (NOJIMA NOBUOTO)  
岐阜大学・工学部・教授  
研究者番号：20222200

五十嵐 晃 (IGARASHI AKIRA)  
京都大学・工学研究科・准教授  
研究者番号：80263101

小野 祐輔 (ONO YUSUKE)  
京都大学・工学研究科・助教  
研究者番号：00346082

豊岡 亮洋 (TOYOOKA AKIHIRO)  
鉄道総合技術研究所・副主任研究員  
研究者番号：80425917

古川 愛子 (FURUKAWA AIKO)  
京都大学・工学研究科・助教  
研究者番号：00380585

### (3) 連携研究者

なし