

アセットマネジメントへの適用を見据えた路車間無線通信モニタリング

Road-to-Vehicle Wireless Communication Monitoring Aiming at Application for Asset Management

貝戸清之*・松岡弘大**・坂井康人***・川上順子****・荒川貴之*****・金川昌弘*****・小林潔司*****
Kiyoyuki KAITO, Kodai MATSUOKA, Yasuhito SAKAI, Junko KAWAKAMI, Takayuki ARAKAWA, Masahiro KANAGAWA,
and Kiyoshi KOBAYASHI

*正会員 博士(工学) 大阪大学特任講師 大学院工学研究科グローバル若手研究者フロンティア研究拠点
(〒565-0871 吹田市山田丘 2-1)

** 学生会員 工修 大阪大学大学院 工学研究科地球総合工学専攻 (〒565-0871 吹田市山田丘 2-1)

***正会員 博士(工学) 阪神高速道路株式会社 建設事業本部 (〒590-0075 堺市堺区南花田口町 2-3-20)

****正会員 工修 阪神高速道路株式会社 保全交通部 (〒541-0056 大阪市中央区久太郎町 4-1-3)

*****正会員 財団法人阪神高速道路管理技術センター 企画部 (〒541-0054 大阪市中央区南本町 4-5-7)

*****正会員 工修 京都大学大学院 工学研究科都市社会工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

*****フェロー会員 工博 京都大学教授 経営管理大学院 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

One method for the second-generation asset management research is to utilize monitoring data instead of or as well as visual inspection data. Especially, it is indispensable to develop a system for continuously and efficiently collecting dispersive monitoring data accumulated at each site. In this study, the proto type of the road-to-vehicle wireless communication system using the SS wireless LAN communication was produced, to gather on-site monitoring data with moving objects, such as inspection vehicles. In detail, the strain data measured at viaducts of expressways is received by a vehicle running at a normal speed, and the relation between the receivable data capacity and vehicle speed is discussed empirically.

Key Words: road-to-vehicle wireless communication, monitoring, asset management

1. はじめに

現在のアセットマネジメントは、目視点検データを中心とした方法論 (Visual Inspection Data Based Asset Management) によって構築されている¹⁾。ここでは、マルコフ連鎖モデルによる劣化予測^{2),3)}や、マルコフ決定モデルを援用したライフサイクル費用最小化に基づく最適補修戦略の決定^{1),4)}など、各要素技術の有機的な体系化がなされており、アセットマネジメントの実用化に大きく貢献している。しかしながら、一方で、①常時監視による損傷・劣化の早期検知、②力学的性能の定量的評価に基づく安全・安心の確保といった実務的要請の極めて高いニーズに対しては、目視点検の限界が指摘されている。目視点検データに基づくアセットマネジメントを第一世代と呼ぶならば、第二世代ではこれらの課題に対する解決策の一つとして、モニタリングデータに基づくアセットマネジメント (Monitoring Data

Based Asset Management, あるいは Performance Based Asset Management) の開発を視野に入れる必要がある。

モニタリングに着目した第二世代のアセットマネジメントにおいては、2.で述べるようにモニタリングデータの継続的・効率的な収集方法が大きな課題となる。この課題に対して、本研究では無線通信モニタリングシステムに焦点を当てる。具体的には、橋梁のような土木施設を対象として、土木施設に設置した計測点からモニタリングデータを無線で送信し、そのモニタリングデータを巡回中の点検車両で回収するというシステムの開発を手掛ける。このように、計測データを蓄積している現場基地局 (固定局) から走行する点検車両 (移動局) への無線データ通信を採用したモニタリングをこれ以降、路車間無線通信モニタリングと呼ぶ。この路車間無線通信モニタリングに関するシステム開発においては、車両の走行速度と回収可能なデータ量、さらに送受

信に伴うノイズ混入量やデータ欠損について検討を実施する必要がある。とりわけ、実橋においては、高欄や周辺環境など無線電波に影響を与える因子が多く存在すること、また、当該路線の混雑状態や大型車の混入率など、模擬実験等では再現が困難な影響因子が多いことに加え、これらが路車間無線通信の性能に及ぼす影響は小さくないと考えられる。

以上の問題意識のもと、本研究ではモニタリングデータの継続的・効率的回収手法として路車間無線通信モニタリングの開発と、その適用性について、実橋梁において実証的検討を行う。具体的には、路車間無線通信モニタリングシステムのプロトタイプを試作し、予備試験を実施したのち、実際の高速道路の高架橋において、ひずみモニタリングデータの時系列波形、およびその分析結果である頻度分布を走行中の車両へ無線送信するようなフィールド試験を実施する。以下、2.で本研究の基本的立場を述べる。3.でプロトタイプの概要と予備試験について説明する。4.で高速道路の高架橋を対象としたフィールド試験を実施する。5.で実用化を見据えた著者らの見解（課題と展望）を整理する。

2. 本研究の基本的立場

2.1 アセットマネジメントにおけるモニタリングの役割

目視点検データには、①点検の実施頻度が低いこと、②点検の実施時点のみにおいて部分的な情報しか獲得できないこと、③判断が主観的であることに起因して、不確実性や観測誤差が介在する。しかしながら、管理対象となる土木施設全数の適切な維持管理を目的としたアセットマネジメントにおいては、全数から画一的に健全度情報を獲得することが極めて重要であり、現状では目視点検が唯一の手段である。また、すでに、複数の管理者では膨大な目視点検データが蓄積され、目視点検データに基づくアセットマネジメントが稼働している。したがって、例えば目視点検に代わる点検方法が開発されたとしても、その実務への導入は段階的にならざるを得ないと考えられる。各種センサーを用いたモニタリング技術は、古くから目視の代替技術として、学術面のみならず、実用面からも検討がなされている。センサーから定量的データを常時計測することが可能なモニタリング技術は、先述した目視点検の欠点を克服し、アセットマネジメントの根幹となる基礎データの質的・量的な向上を図ることができるものと期待されている。

現状のアセットマネジメントにおいてモニタリングに期待される役割は、1) 常時監視による損傷・劣化進行の早期検知、2) 力学的機能の定量的評価

に基づく安全・安心の確保である。これらのうち、2) は、1) よりもさらに深度化された計測技術や性能評価技術を要することから、本研究では1) に焦点を当てることとする。このとき、まず、どの構造物、部材をモニタリング対象とするのか、計測したデータをいかに効率的に集計するか、が当面の課題となる。前者の計測対象の絞り込みに関しては、目視点検データを用いた統計的劣化予測手法の最新成果を利用することができる。小濱らは劣化速度を表すハザード率に構造物個々の異質性を考慮した混合ハザードモデルを開発し、各構造物の混合ハザード率を相対評価することで、要監視構造物の抽出が可能であることを実証的に示している³⁾。一方で、後者に関して、分散的に配置されたモニタリングシステムからデータをいかに効率的に集計するかは重要な課題である。分散化されたデータを技術者や点検員が現地まで収集に行くのでは、その場で目視点検を実施した方がよい。あるいは、光ファイバー等の通信網を張り巡らせることで情報集計は可能となるが、新規に敷設する際には膨大な費用を要するために、敷設が可能な管理者は自ずと限定される（地方自治体等ではアセットマネジメントの高度化が困難となってしまふ）。また、事故・災害時にケーブルが破断したときにはネットワーク全体が機能しなくなるという欠点を有しており、すでに通信網が整備されている場合においても、分散化を前提とした路車間無線通信モニタリングと併用することで事故・災害時でもより堅牢なデータ通信システムを実現できると考えられる。したがって、これらの課題を具体的に解決することが、次世代アセットマネジメントの具現化につながるとともに、通常のアセットマネジメントのみならず、事故・災害時対応に係わる意志決定の迅速化も達成することが可能になると期待できる。

なお、本研究では、これ以降、土木施設から効率良くモニタリング情報を集計する手段として、無線通信を利用したモニタリングに着目する。しかし、現状の技術では現場基地局（固定局）側で処理・保存できる情報量はそれほど大きくない。したがって、固定局から送信されるデータは、土木施設の物理性能といった、膨大なデータから高度な計算によって算出される情報（アウトプット）を提供することは困難である。実際に、本研究で着目する路車間無線通信モニタリングでは、システムをスマート化させることよりも、むしろモニタリングデータの日々の継続的・効率的な回収方法に重点を置いている。すなわち、計測データそのものはある物理量の期待値や最大値といった1回の計測では何の工学的意味を持たない簡易な情報ではあるが、それらを蓄積し、過去のデータと相対評価を行うことで損傷・劣化を

早期検知するためのスキーム作りを目指す。したがって、モニタリングデータの回収方法に加えて、長期間に亘る時系列データの変化を統計的に検定するための手法の開発も重要な課題であると著者らは考えている。ただし、この点に関しては本研究の範囲を大きく超えるため、別の機会に改めて発表することとする。

2.2 構造物健全度モニタリング

土木分野においては、土木施設の定量的な検査を目的として構造物健全度モニタリング (Structural Health Monitoring) が着目され、センシング手法、および無線通信技術に関する研究が継続的に実施されている^{6),7)}。とりわけ、近年では無線ネットワークと MEMS (Micro-Electro-Mechanical-System) 技術の向上により、センサー間、およびセンサーと基地局間でのネットワーク化に関する検討が進展している。土木施設のような大型構造物に対して有線センサーを用いた場合、ケーブル配線などに時間と労力が割かれるために、計測点数を制限せざるを得ない状況がしばしば発生する。無線センサーネットワーク技術により、このような課題が解決され、より安価で質の高い (計測点数の多い) モニタリングが可能となっている^{8),9)}。また、センサーネットワーク技術と同時に、センサー自体に計算機能を持たせるスマートセンサー化が進んでおり、各センサーノードで自立分散型のデータ処理がなされ、その結果を無線通信させることで、通信容量の大幅な低減を図っている。これらの研究は、2000 年に Hill¹⁰⁾ が単一ホップでの通信について検討した事例を皮切りに、同年の Woo¹¹⁾ らの通信経路に関する研究により多数ノードへの拡張が可能となった。その後、Kim ら¹²⁾ によるこれらの通信の信頼性の向上、Maroti ら¹³⁾ による同期計測手法の開発などが行われ、近年においては、64 ノードの無線センサーを用いたゴールデンゲート橋の振動計測を実施するなど、実構造物への適用も盛んに行われている¹⁴⁾。また、開発の規格化を図るべく、長山ら¹⁵⁾ によるミドルウェアの開発や、センサーネットワークを利用した位置決めなど^{16),17)}、無線センサーモニタリングとして多方面への発展を遂げている。

一方で、これらの計測により、得られたモニタリングデータの回収手法に関しては、十分な検討がなされているとは言い難い。特に、土木施設に関しては、路線として管理がなされており、最終的には同一路線内に存在する複数橋梁を同時にモニタリングする必要があると考えられる。これに関する主な研究として、光ファイバーによる通信網を使用してモニタリングデータの収集システムを構築した三木ら¹⁸⁾の事例が存在する程度となっている。

2.3 路車間無線通信

都市高速道路において、安心・安全を確保するためのモニタリング対象としては、橋梁本体はもちろんのこと、電灯などの道路付帯施設など多岐にわたる。モニタリングの実用化に際しては、路線上に分散的に位置するこれらの多用な施設からモニタリングデータを継続的かつ効率的に回収する必要がある。これらの分散配置された各現場基地局からのデータ回収経路を有線ネットワークで構築すると、ネットワーク構造が直列システムを形成することになる。直列システムは、事故・災害等の突発的な事象が発生したときに 1 箇所でもケーブルが破断すると、ネットワーク全体が機能しなくなるという欠点がある。もちろん、必要に応じて並列システムを組み入れることは可能であるが、複雑な回収経路を整備するには必然的に膨大な費用が発生する。このような現状に対して、無線通信技術の飛躍的な発展を勘案すると、分散的モニタリングへの展開を見据えた安価で効率的なデータ回収手法の構築、あるいは併用が可能であると考えられる。特に高速道路に着目した場合、落下物や路面状況の監視などを行う日常点検車両が日々路線内を巡回している¹⁹⁾。本研究では、このような点検車両の利用を視野に入れ、継続的、効率的にデータを回収するシステムについて検討を加える。

橋梁側に設置したモニタリングシステムの基地局と、点検車両のような移動局との間の無線通信に関しては、ITS (Intelligent Transport System) 技術として電子・情報通信などの分野で検討がなされてきた²⁰⁾。ITS における路車間無線通信としては、ETC が代表的な例としてあげられる。しかしながら、ETC に用いられている DSRC (Dedicated Short Range Communication) は、情報交換の信頼性、セキュリティなどの点では優れているものの、データ通信量を確保するためには、走行速度の低減が必要となる²¹⁾。本研究では、これまでの日常点検の効率性を損なうことなく、モニタリングデータを回収するシステムの構築を目指しているために、より大容量のデータ通信が可能となる SS (Speed Spectrum) 無線 LAN 通信^{22),23)}を用いた路車間無線通信システムのプロトタイプの開発を試みる。SS 無線通信に基づく路車間無線通信に関する実証的研究としては、石川ら²⁴⁾、蕨野ら²⁵⁾が道路無線システムを提案し、実証実験により実用化のための課題を整理している。また、和田ら²⁶⁾は実高速道路上でのリアルタイム画像/音声通信実験を実施している。

2.4 本研究の工学的意義

対象とする無線通信システムの主な問題点として、2.4GHz 帯を用いることに起因する電波干渉の

表-1 通信アンテナの概要

項目	内容
出力パルス	100ms
周波数	2405~2480MHz (76ch)
変調方式	スペクトル直接拡散 (DSSS) 方式
送受信アンテナ	無指向性アンテナ
伝送速度	11Mbps (最大)
送信電力	10mW/MHz 以下
電源	USB バスパワー
外形	120(W)×60(D)×24(H)mm

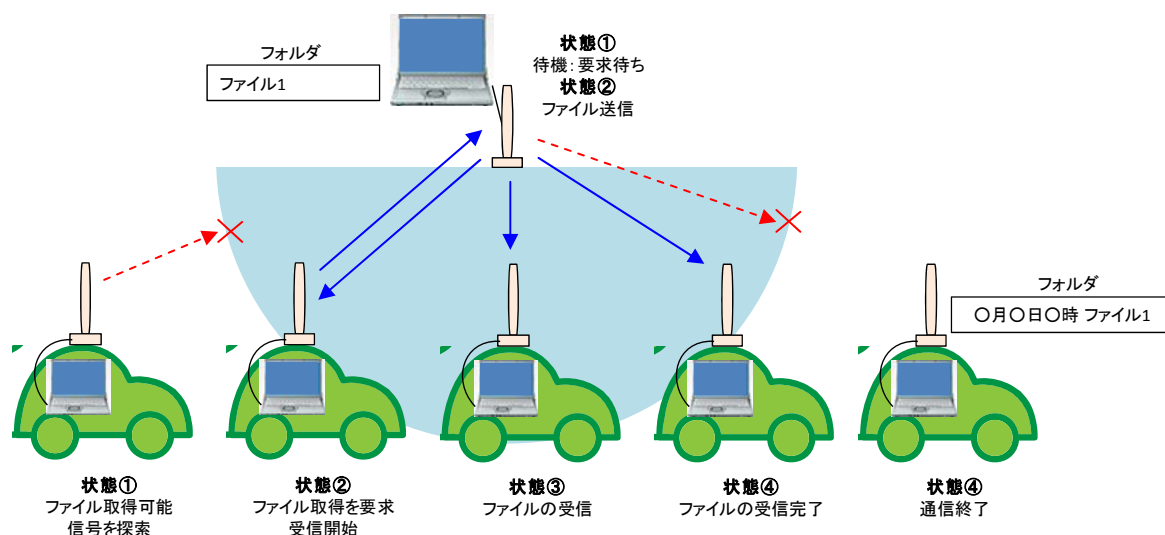


図-1 データ回収システムの概要

影響をあげることができる²⁷⁾。電波の干渉状況については、実フィールドにおいて確認する必要がある。また、路車間無線通信においては、車両の走行速度により通信時間が変動するために、通信可能なデータ容量が変化する。さらに、実用化に際しては、営業中の高速道路におけるモニタリング計測との連動を想定しているために、データ送信アンテナ設置位置の制約、基地局と移動局の間を大型車等が混入することによる通信の一時遮断などが考えられる。

これらの要因が走行中に取得可能なデータ容量の変動に及ぼす影響を明らかにするために、本研究では、高速道路における鋼床版のひずみモニタリング計測と連動し、実橋において、現場で計測・蓄積したモニタリングデータの回収性能に関する実証試験を実施する。さらに、上記の試験結果を踏まえて、モニタリングした時系列波形、あるいは時系列波形に基づき算出した分析結果が走行車両で回収可能であることを確認する。

3. 路車間無線通信システムのプロトタイプ

3.1 プロトタイプの試作

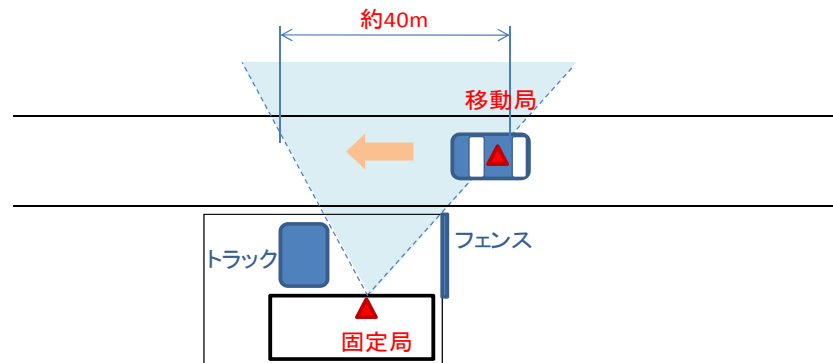
モニタリング機能、無線通信機器および制御ソフトウェアは、全て同一センサー内に組込むことが可能である。しかしながら、本研究で開発する路車間無線通信システムのプロトタイプにおいては、フィールドでの設定変更、また複数の実験により実用可能性を検討するために、操作可能な計測ソフトウェア、通信制御ソフトウェア、通信アンテナを別々に開発し、さらに設定および通信データなどの諸条件を、状況に応じてノート PC 上で変更をできるようにした。SS 無線通信におけるハードウェアには、極力汎用品を採用し、ソフトウェアについては本研究用に開発を行った。SS 無線における通信システムの主要な性能およびアンテナ機器の概要を表-1 に示す。制御ソフトウェアについては、走行速度と実証実験用にいくつかの通信アプリケーション設定を行っている(図-1)。まず、通信前の時点(橋梁側固定局と車両側移動局が通信圏外の場合)においては、固定局は移動局からの命令を待っている状態であり、移動局は、常にファイルを取得可能な通信相手(固定局)を探索している状態となっている(図-1の状態①)。つぎに、通信開始時(固定局と移動局が通信圏内となった場合)に、移動局は固定



(a) 固定局 (室内)



(b) 移動局 (車内)



(c) 路車間無線通信時の周辺環境

図-2 予備試験の概要

局に対して、ファイル送信の命令を出す（ファイルの取得を要求する；状態②）。これにより、固定局では対象ファイルを単位パケット（90bytes）に分割し、送信を開始する。通信中（固定局と移動局が通信圏内）においては、固定局から送信されたファイルを移動局で受信し続ける（状態③）。ファイルの受信が完了した場合は、車両側においてファイルを復元し、タイムスタンプを押した後、予め設定したフォルダに保存する（状態④、⑤）。一方で、通信終了時（固定局と移動局が通信圏外となった場合）に、ファイルの受信が完了していない場合には、受信したパケット分のみを復元し保存する。以上の設定により、予め全データの転送を完了できない程度の容量のファイルを用いて路車間無線通信試験を行うことで、車両の走行速度と通信データ量の関係について検討することが可能となる。

3.2 プロトタイプの性能検証

本研究で開発した路車間無線通信システムの性能を確認するための予備試験を実施した。試験概要を図-2示す。予備試験の項目として、車両を停車させた場合（固定局－固定局通信）と、走行させた場合（固定局－移動局通信）について実施した。固定局－固定局間の通信試験においては、2種類の容量（482 bytes, 112,000 bytes）のファイルを用いた。482 bytes のファイルに関しては、計測した時系列波

形などを分析した結果（例えば、振動計測であれば固有振動数、ひずみ計測であれば頻度分布など）を想定しており、112,000 bytes のファイルについては、分析前の計測した時系列波形そのもの（1データ当たりの2byteのデータ1ch分を100Hzで10分程度計測した時系列波形を想定）を想定している。走行車両との路車間無線通信における車両の走行速度は30km/hおよび60km/hの2種類とした。送信側と受信側のアンテナの位置に関しては、固定局のアンテナを実験を行った建物内（図-2(a)）に設置し、移動局は建物に隣接する駐車場を介した道路を走行する車両内部（図-2(b)）に設置した。通信環境については、図-2(c)に示すように、右側に駐車場のフェンスが、左側にはトラックが停車していたために、車両が走行する道路上での通信距離は、約40m程度であると推測される。

試験結果を表-2に示す。車両を停車した場合におけるデータ通信試験においては、PC内部での処理時間を含めても、482 bytesのデータであれば1秒以内（10回の試行で平均0.82秒）で通信可能であった。一方、112,000 bytesのデータ通信試験では、5分程度（10回の試行で平均282.62秒）要することが判明した。また、同表には平均通信速度も併せて表示しているが、ファイルサイズが大きくなることで通信速度が低下することがわかる。これらは、パケット分割などの通信処理の影響があるものと考

表-2 予備試験の結果

試験項目	ファイル容量 bytes	走行速度 km/h	試行回数 回	平均転送時間 sec	平均転送速度 bytes/sec	可否判定
固定局間通信	482	0	10	0.82	587.8	-
固定局間通信	112000	0	10	282.62	396.3	-
路車間無線通信	482	30km/h	3	0.92	523.9	可能
路車間無線通信	482	60km/h	3	0.99	486.9	可能

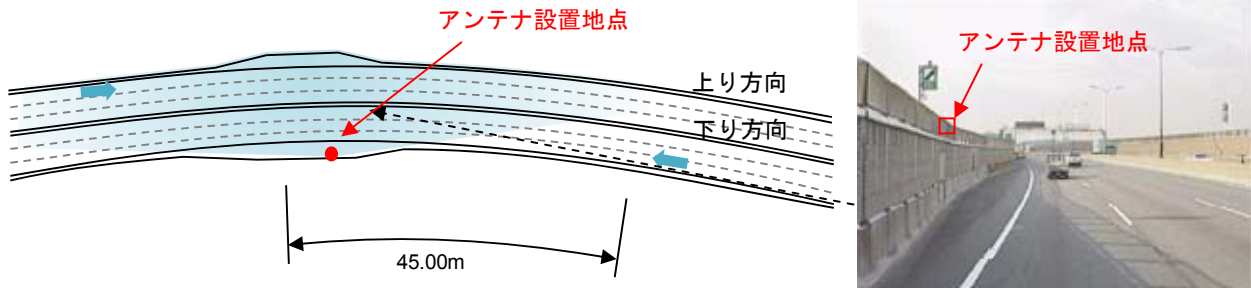


図-3 橋梁側アンテナ設置地点の概要

えられる。

つぎに、走行車両を使用した路車間無線通信試験においては、いずれの車両速度（30km/h、60km/h）であっても通信範囲内でファイルの受渡しを完了することが可能であった。本研究における路車間無線通信システムのプロトタイプでは、通信の認証を省略しているために、走行車両が通信範囲に入ると同時にデータ転送が開始される状態であった。予備実験の通信環境においては、電波を反射する高欄等がない上、電波干渉についても非常に少ないことを確認している。以上を踏まえて、予備試験にて確認した性能が高速道路上において、どの程度変化するのか、次章 4. のフィールド試験にて検証する。

4. 実橋梁における路車間無線通信試験

4.1 試験概要

高速道路にて、モニタリング計測した時系列波形（具体的にはひずみデータ）、およびその分析結果（頻度分布）を路車間無線通信にて回収する試験を実施した。対象橋梁および橋梁側（固定局）のアンテナ設置地点の概要を図-3 に示す。通信アンテナの設置は、路車間無線通信の適用可能性を考慮し、道路線形、遮音壁、非常駐車帯の有無など、無線通信環境が厳しい地点を選定した。具体的には、橋梁側（固定局）のアンテナ設置地点は、見通しの利きにくい曲線部の内側の非常駐車帯としている。また、当該地点にはアルミニウム製の遮音壁（路面高さが3m程度）が両側に設置しており、送信電波を反射することが予測される。

アンテナ設置地点を含む当該路線は、港に隣接しているために、大型車交通量が非常に多く、鋼床版の疲労き裂の発生が危惧されている。これに伴い、試験対象とした橋梁では、実働荷重下における鋼床版の負荷状況を把握する目的で、実際の交通荷重作用下における鋼床版のひずみ値をモニタリング計測している。本研究における試験の目的は、実フィールドにおける路車間無線通信性能の把握と有効性検証であることから、ひずみゲージの設置箇所など、モニタリング計測の内容そのものに関する記述は割愛し、分析-通信システムの概要を述べる中で、必要に応じて適宜説明するに留める。

計測するひずみ値は、ひずみゲージから動ひずみ計を介して一旦データロガーに収録される。通常はデータロガーに蓄積されたデータを現地にて回収している。本研究ではこのひずみデータを具体的なモニタリングデータと考えて、データロガーからさらにひずみ値を出力し、AD変換ボード、ローパスフィルターを介して、サンプリング周波数100HzにてひずみデータをノートPCに収録した（この場合においても、出力したデータはデータロガーにも保存している。また、以上から理解できるように、データロガーまでの計測システムはそれぞれ単独でひずみの計測という目的を達成している。なお、本研究では路車間無線モニタリングに焦点を当てるために、データロガーまでの計測システムの詳細については割愛することとする。）。ひずみデータの取得に関する一連の作業はノートPC上の計測ソフトウェアにて管理される。さらに、収録されたひずみの時系列波形はレインフロー法により頻度分布へ



図-4 橋梁側アンテナ設置状況

と変換される。ここでは、現場で蓄積したデータを走行車両内の PC で回収する本システムの有効性の確認を目的とするために、平日の午前 11 時から 12 時までの 1 時間程度のひずみ値を計測し、頻度分布を算出した後、路車間無線通信試験を実施した。なお、ひずみ値のモニタリング計測自体は別途長期間（72 時間）実施されている。このようにノート PC（固定局）にファイルとして収録されたモニタリングデータは、通信制御ソフトウェアで読み込まれ、車両側（移動局）からの転送命令待ちの状態となる。本試験では、容量の異なる複数のファイルを通信用に用いるために、転送するファイルは通信制御ソフトウェア上で選択可能な状態になっている。橋梁側（固定局）のデータ送信アンテナに関しては、ノート PC と 5m の USB ケーブルを用いて接続した。さらに送信アンテナを遮音壁から 10cm 程度の距離を離し、針金とフックを用いて遮音壁に設置した。なお、10cm 程度の距離は金属版が接触することによる電波障害を避けるために設けた。また、送信アンテナは路面から 1m 程度の高さに設置した。設置状況を図-4 に示す。この状態で、車両側（移動局）が通信範囲内に進入することにより、橋梁側（固定局）から無線通信により車両側へファイルの送信が行われる。これらの一連の計測、および通信システムの概要を図-5 に示す。なお、本研究で使用した送信アンテナは無指向性であるが、指向性アンテナを使用することで通信距離を延伸することも可能である。

4.2 車両の走行速度と通信データの容量

高速道路上で通常走行状態にある車両によるモニタリングデータの回収実験に先立ち、まずは路車間無線通信により、走行する車両と実橋梁側でどの程度のデータ容量を通信可能であるかを検討する必要がある。また、走行する車両の速度や、車線による取得可能な通信データ容量の変化を把握しておくことで、実用化に向けた回収データの選定など

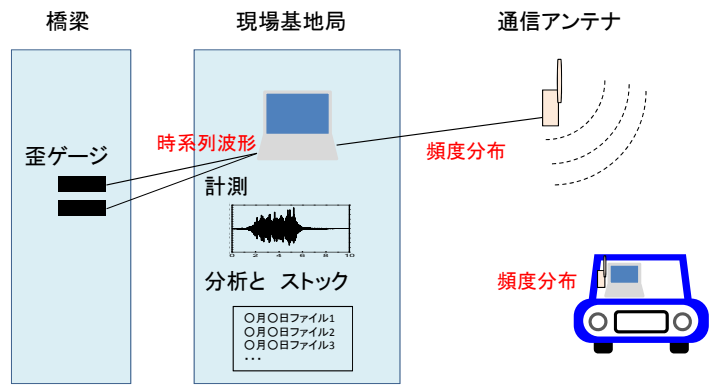


図-5 計測および通信システムの概要

が可能となる。このような目的から、本節では車両（移動局）の走行速度や車線を変化させ、無線通信試験を実施する。通信試験に用いるデータは、諸条件の相違とデータ容量の関係を把握する目的から、通信が完了しない程度のデータ容量を用いる必要がある。ここではノート PC 内に収録したひずみの時系列波形（114,000 bytes）を用いることとした。

走行試験に先立って、車を停車させた状態（固定局－固定局）で、ひずみの時系列波形の無線通信試験を実施した。用いたファイルの容量は、予備試験とほぼ同様の 114,000bytes で、要した通信時間（PC 内での処理速度を含む）は、3 回の平均で 432.7 秒と 7 分程度であり、各ケースによるばらつきも小さかった。予備試験の結果と比較すると、1.5 倍程度の時間を要しており、1) USB ケーブルが 5m と相対的に長かった、2) 高欄での干渉などの周辺環境が影響している可能性があったと考えられるが、通信自体は可能であることを確認した。

以上を踏まえて、橋梁側（固定局）と走行車両側（移動局）における路車間無線通信試験を実施した。用いたファイルは停車時と同様のひずみの時系列波形（114,000 bytes）とし、速度は 40km/h を下限として、規制速度の 80km/h まで逐次変化させ実施した。通信試験回数は当該路線の交通状況から、上り、下り方向ともに 17 回ずつ、全 34 回であった（下り車線が固定局側）。なお、低速走行には阪神高速道路株式会社の巡回車両を用いており、時間的な制約や安全面に配慮し、40、50、60km/h の試験は下り方向で各 1 回ずつの実施とした。実験結果の一例を図-6 に示す。図中の緑色の実線が固定局から送信した時系列波形（10 秒間を表示）である。青色の点線は、34 回の試験を通して、移動局で受信した時系列波形のうち、受信データ量が最大のものを示している。一方で赤色の点線は最小のものである。最大と最小のいずれの受信データにおいても送信データ（緑実線）との誤差を視認できないことから、受信データ量に関わらず、送信データを正確に受信

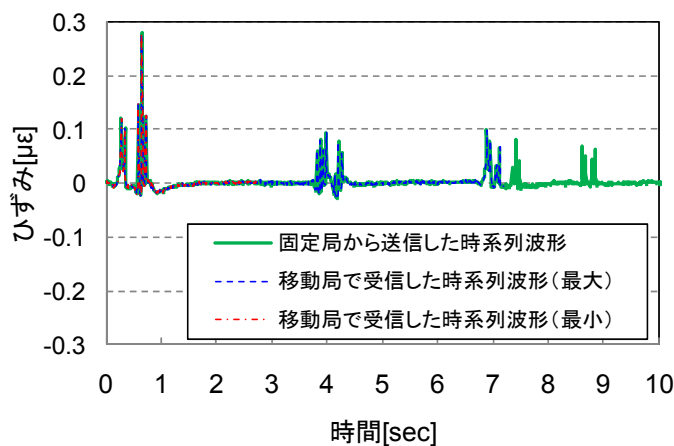


図-6 路車間無線通信により取得したデータの例



図-7 路車間無線通信中の走行車両内

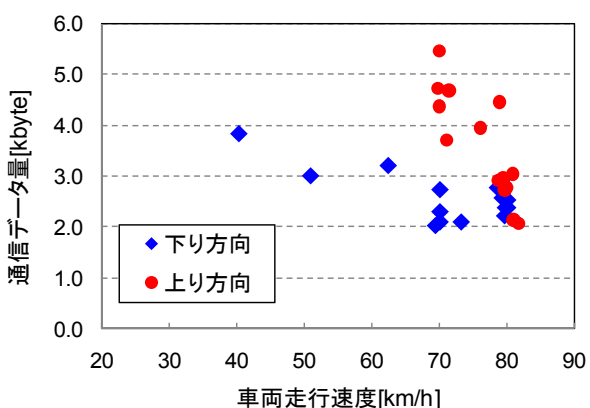


図-8 車両走行速度と取得データ量の関係

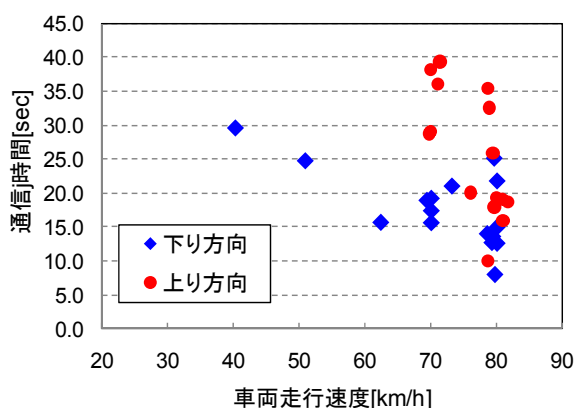


図-9 走行車両と通信時間の関係

できていることがわかる。念のため、送信データと受信データとの残差を計算したが、全 34 回の全ての実験ケースで 0 であった。さらに、データ通信が良好な場合には、100Hz サンプリングのひずみデータを 7 秒程度、不良な場合であっても 2.5 秒程度受信することが可能である。また、試験中の走行車内の状況を図-7 に示す。今回の試験においては通信状況や車両速度を視認する必要があったために、運転手に加え、別途 2 名が乗車して実験を行ったが、データ回収のみを目的とする場合には車内での操作は不要であり、路車間無線通信のために人員を配置する必要はない。

次に、走行車両速度と取得データ容量の関係を図-8 に示す。上り、下り方向のいずれへ走行した場合であっても、速度と取得データ容量の間に逆相関の関係を見て取ることができる。走行車両が固定局側を通過する下り方向の場合、最もデータを取得できたのは 40km/h で走行した場合であり、4.0kbytes 程度であった。一方、固定局側とは反対の車線である上り方向へ走行した場合、最大取得データ量は 5.5kbytes と下り車線走行時より 1.4 倍程度大きくなっていることがわかる。送信アンテナからの電波は

放射状に広がるために(図-3 中の青塗り部)、通信可能な距離の関係からすれば、より外側を通過する上り方向の走行車線を走行した方が、長く通信範囲内に位置することとなる。これにより、より多くのデータ容量を取得することが可能であったと考えられる。図-9 には走行車両の速度と通信時間の関係を示している。通信時間に関しては、通信開始から通信終了までをストップウォッチで計測しており、信頼性が高いとは言えないが、上り方向へ走行した場合の方が長い通信時間を確保できる傾向にあることがわかる。しかしながら、走行車両の速度が 80km/h 程度におけるいくつかのケースにおいては、取得データ量、および通信時間が下り方向と同程度であった。上り方向へ走行した場合、走行位置と橋梁側のアンテナとの間に 5 車線分の間隔があり、図-10 に示すように、大型車との並走、およびすれ違い等により通信が一時遮断されることがあった。これにより、転送に失敗した単位パケットの再送信が多くなり、取得データ容量、および通信時間が減少し、結果として下り方向と同程度のデータ量しか取得できなかったと考えられる。下り方向への走行試験においては、間に車が入ることはなく、このよう

表-3 走行車両を用いた頻度分布の路車間無線通信結果

進行方向	車線	ファイル容量 byte	目標走行速度 km/h	平均転送時間 sec	平均転送速度 byte/sec	可否判定
上り	走行車線	322	80	2.1	153.3	○
下り	走行車線	322	80	3.4	94.7	○



図-10 大型車との並走, すれ違い

なことはなかった。いずれにしても、2kbytes 程度のデータであれば、進行方向や車線に関わらず、路車間無線通信により取得可能であることが判明した。本節では、通信データとして便宜的に 100Hz でサンプリングされたひずみの時系列波形を用いたが、実用化に際しては時系列波形を回収することは現実的ではなく、計測した時系列波形の分析結果を回収することが考えられる。このような展望に基づいて、次節 4.3 では、ひずみの時系列波形を分析した結果として、頻度分布を通信ファイルとして用いた場合について示す。

4.3 高速走行車両による分析結果の回収

4.1 にて述べた分析-通信システムにより、収録したひずみの時系列波形の分析結果である頻度分布を路車間無線通信により、走行車両で回収する試験を実施した。頻度分布は、時系列波形における応力振幅の最大値から最小値までを 100 ランクに分類したのを用い、各ランクの度数のみを路車間無線通信により送信した。用いた頻度分布のデータ容量は 322bytes であった。データ容量と前節 4.2 の結果から、本システムによる回収は容易に可能であると予測されたために、試行回数は上り、下り方向で各 2 回程度とし、当該路線での規制速度 80km/h を目安に走行した。走行速度については、1 ケースのみ交通状況により 70km/h と多少低速となっている。

試験結果を表-3 に示す。前節同様、転送時間、および転送速度については、ストップウォッチでの計測を基にしており、目安程度とされたい。上り、下り方向のいずれの車線を走行した場合であっても、

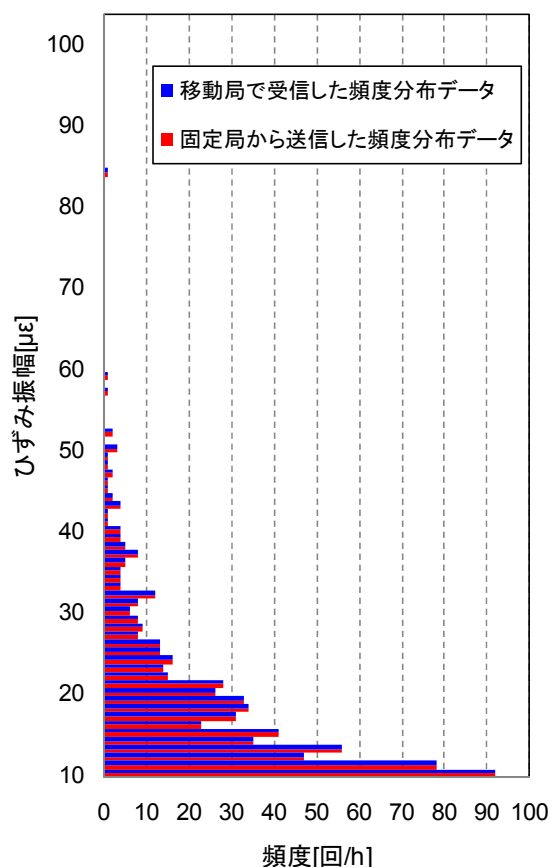


図-11 走行車両により回収した頻度分布

データを完全に回収することが可能であった。図-11には、固定局から送信した頻度分布データ（同図中の青色）と、移動局で受信した頻度分布データ（同図中の赤色）を併せて示している。送信データと受信データの値（頻度）は完全に一致しており、前節と同様に、路車間無線通信によるノイズの混入、データの欠損がないことがわかる。本試験では、1 時間のひずみ値の時系列波形を用いているが、計測時間が長期間になったとしても、頻度分布のデータ容量自体に大きな変化はないために、本研究で用いた路車間無線通信システムにより、モニタリング試験の分析結果を高速走行（80km/h）する車両で、回収可能であることがわかる。また、通信可能なデータ量には十分に空きがあるために、橋梁 ID や他の計測結果を同時に回収するなどの実用面で多方面への展開が考えられる。

5. 実用化への示唆

5.1 ハードウェア

フィールド試験の結果から、本システムを用いることで、モニタリング計測の分析結果を走行車両で回収できることを示したが、実用化に際しては、ハードウェア、ソフトウェアの両面でいくつかの課題が存在することも事実である。以下では、実用化における課題と展望について、5.1 でハードウェア、5.2 でソフトウェアに分けて整理する。

ハードウェアにおいては、まず計測、分析、通信を同一のセンサー内で実施する機器の開発があげられる。本試験では試験中の操作性に配慮して、ノートPCを用いたが、計測対象と取得したいデータが決定していれば、センサー、記憶メモリー、計測結果の分析ソフト、通信制御ソフトを同一のパッケージ内に収納し、スマート化することが可能である。このようなスマート化に関しては、プロトタイプを試作やフィールド試験の実施が積極的になされている¹⁵⁾。また、今回のように、計測地点が橋梁床版の下面であった場合、スマート化したセンサーから橋上の通信アンテナまでの距離が20m以上になるとともに、高所作業となるため、配線作業による負荷も小さくない。そこで、桁端部などに無線通信の中継地点を設けることで、ケーブルを用いることなく、計測から走行車両による回収システムを構築することが可能となる。無線通信の中継についても、リレー通信の要領で中継地点を設け、経由させることで、容易に実現可能であると考えられる。

このような実務的課題の他に、本システムで実現可能なオプション機能についても言及しておく。本研究で作成したプロトタイプにおいては、通信距離が半径200m程度（干渉なし、見通し良の場合）の無指向性の送信アンテナを用いたが、さらに広域な通信範囲を有する指向性の送信アンテナも存在する。本試験のような曲線部における効果は小さいと考えられるが、見通しの良い直線部では500m以上の距離でも通信が可能となる。これにより、次節で述べるソフトウェア面で、より多彩な回収戦略を構築することが可能であると考えられる。さらに、通信可能なデータを増やす別の手法として、文献27)で検討されているようなハンドオーバー通信を用いることも可能である。ハンドオーバー通信は、橋梁側に複数設置された送信アンテナのうち、走行車両の位置に合わせて、順次使用するアンテナを切り替える通信手法であり、Hot Spotの技術を応用することで実現可能である²⁸⁾。また、本システムでは高速道路での使用を想定しているために、ケーブルによる電源供給を前提としている。しかしながら、地震などの非常時においては、断線などの影響により

電源供給が困難になる可能性が十分想定される。災害後の安全性の確認や、地震波形の計測などについても実施可能にすることが望ましいために、事故・災害時での稼働を視野に入れた非常時用バッテリーを内蔵することが必要であると考えられる。これについても、汎用的に用いられる小型バッテリーを取付け、電源供給が遮断した場合のみ起動させることで解決可能であると考えられる。最後に、耐久性については、耐風雨用の外装を別途検討する必要があるとともに、長期間の試験により今後検討していく必要がある。

5.2 ソフトウェア

ソフトウェアにおける本システムの主な課題として、回収可能なデータ容量に応じたマネジメント戦略、橋梁とモニタリング機器のそれぞれについての異常検出アルゴリズム、目視点検によるベンチマーク評価と連動したモニタリング導入区間の設定などがあげられる。

回収可能なデータ量は走行車両の速度と逆相関の関係性を有するために、回収効率と獲得可能なモニタリングデータ量の間にはトレードオフの関係が存在する。この関係を前提としたデータ回収戦略を検討する必要がある。一例として以下の2段階のモニタリングデータ回収戦略が考えられる。通常時に走行車両から回収するデータは、各橋梁の識別ID、計測生波形を解析した結果、あるいは異常判定結果のみとする。正常であればそのまま巡回するが、異常であった場合、近くに停車してより詳細な計測生波形、もしくはそれに準じるデータを、固定局から送信させる。このような戦略については、スマートセンサーに内蔵するCPU設計時点で想定しておく必要がある。これに対して、本研究で実施した路車間無線通信試験の結果は一つの目安になると考えられる。

また、橋梁の劣化などを長期にわたって計測する際には異常検出アルゴリズムを開発する必要がある。計測データは客観的かつ常時計測であることから、気温、日光量、交通量など、各種要因の影響を受け変動する。これらの変動の中から橋梁の性能に関する変動のみを抽出し、モニターする必要があるとともに、その変動が許容範囲内であるかどうかを判定する必要がある。このような問題に対しては、時系列解析が有効な手法としてあげられる²⁹⁾。時系列モデルにはARモデルなどを基本とした各種の応用モデルが存在するために、適切なモデルを選定もしくは開発するとともに、モデルパラメータの推計手法および経時変化の予測手法の構築・開発が必要であると考えられる。例えば、本研究で対象としたようなひずみの頻度分布の場合には、計測を通した

頻度分布の変動が頻度分布の構造変化に起因するものか否かを判断するためのアルゴリズムの開発があげられる。

最後に実用化への可否を検討するためには、維持管理へのモニタリングシステム導入の有意性を評価するための方法論を整備しなければならない。すなわち、モニタリングシステムを導入することに対するインセンティブをいかにして確保するか、という問題である。近年、アセットマネジメント技術が急速に発展しており、H-BMS³⁰⁾に代表される大規模アセットマネジメントシステムなどが、実際に運用されるに至っている。これらの目視点検結果をベースとしたベンチマーク評価により、異質性が高い（劣化の進展が速い）橋梁を対象とすることで、これらの橋梁の維持管理上のリスクをモニタリングシステムによりヘッジすることで、例えば通常の見視点検の間隔を延伸するか否かの戦略を検討することができる。この際に、モニタリングシステムの導入・管理費用と、点検間隔を延伸することにより削減される費用の多寡を比較することで、維持管理にモニタリングシステム導入することの意義を経済性の観点から明らかにすることが可能である。

6. おわりに

本研究では、第二世代のアセットマネジメント研究を視野に入れ、モニタリングシステムのアセットマネジメントへの適用可能性について、データ回収の継続性と効率性という観点で検討を行った。具体的には、モニタリングによる常時監視を実現させるために、路車間無線通信を用いた効率的なデータ回収手法の開発を行った。また、高速道路において、モニタリング計測と連動した路車間無線通信試験を実施することで、走行車両により取得可能なデータ容量を明らかにするとともに、頻度分布のような分析結果であれば80km/hの高速走行中であっても十分に回収可能であることを明らかにした。さらに実用化における課題と展望を、ハードウェアおよびソフトウェアの観点から整理した。今後は、これらの課題について継続的に検討していくとともに、計測、通信を含めた継続的モニタリングシステムとして、段階的にパッケージ化していくことが必要であると考えられる。また、本研究で対象としたようなある一つの構造物を対象に長期間継続的にモニタリング実施するケースと並行して、照明柱など量的に多数存在する道路付帯施設を対象として空間的なデータ回収の効率性と異常検出アルゴリズムに関する検討を行うことも重要である。

謝辞：フィールド試験の実施に際して、阪神高速道

路株式会社、阪神高速技術株式会社、(財)阪神高速道路管理技術センターには多大なご協力を賜った。ここに記して感謝の意を表す。また、本研究の一部は文部科学省「若手研究者の自立的な研究環境整備促進」事業によって大阪大学グローバル若手研究者フロンティア研究拠点にて実施された。

参考文献

- 1) 小林潔司：分権的ライフサイクル費用評価と集計的効率性，土木学会論文集，No.793/IV-68，pp.59-71，2005.
- 2) 津田尚胤，貝戸清之，青木一也，小林潔司：橋梁劣化予測のためのマルコフ推移確率の推定，土木学会論文集，No.801/I-73，pp.69-82，2005.
- 3) 小濱健吾，岡田貢一，貝戸清之，小林潔司：劣化ハザード率評価とベンチマーキング，土木学会論文集A，Vol.64，No.4，pp.857-874，2008.
- 4) 貝戸清之，保田敬一，小林潔司，大和田慶：平均費用法に基づいた橋梁部材の最適補修戦略，土木学会論文集，No.801/I-73，pp.83-96，2005.
- 5) 中林正司，西岡敬治，小林潔司：阪神高速道路の維持管理の現状と課題，土木学会論文集F，Vol.63，No.4，pp.494-505，2007.
- 6) 呉智深，許斌，原田陸郎：都市インフラに関する構造ヘルスマニタリングの現状と展望—展望論文—，応用力学論文集，Vol.6，pp.1043-1054，2003.
- 7) Liu, L. and Yuan, G.: Development of wireless smart sensor for structural health monitoring in aerospace applications, *Smart Structures and Materials, Proceeding of the SPIE*, Volume 5765, pp.176-186, 2005.
- 8) Sohn, H. and Farrar, C. R.: Damage diagnosis using time series analysis of vibration signals, *Smart Materials and Structures*, Institute of Physics, pp.446-451, 10:4, 2001.
- 9) Straser, E. G. and Kiremidjian, A.: A Modular Wireless Damage Monitoring System for Structures, *The John A. Blume Earthquake Engineering Center, Report 114*, Department of Civil and Environmental Engineering, Stanford University, Stanford, CA. pp. 18-20, 1998.
- 10) Hill, J., Szewczyk, R., Woo, A., Hollar, S., Culler, D. E. and Pister, K. S. J.: System architecture directions for networked sensors, *Proc., 9th Int. Conf. on Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems (ASPLoS 2000)*, Cambridge, Mass., pp.93-104, 2000.
- 11) Woo, A., Tong, T. and Culler, D.: Taming the underlying challenges of reliable multi-hop routing

- in sensor networks, *Proc, SenSys 2003*, Los Angeles, 2003.
- 12) Kim, S., Fonseca, R., Kumar Dutta, P., Tavakoli, A., Culler, D. E., Levis, P., Shenker, S., and Stoica, I. :Flush: A reliable bulk transport protocol for multihop wireless network, *Technical Rep.* University of California, Berkeley, Calif. No.UCB/EECS-2006-169, 2006.
 - 13) Maroti, M., Kusy, B., Simon, G. and Ledeczi, A.: The flooding time synchronization protocol, *Proc ACM 2nd Int. Conf. in Embedded Networked Sensor Systems*, Baltimore, pp.39-49, 2004.
 - 14) Los Alamos National Laboratory: *A Review of Structural Health Monitoring Literature: 1996-2001*, LA-13976-MS, 2004.
 - 15) 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物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.
 - 16) 本多弘明, 小国健二, 井上純哉, 堀宗郎: 無線センサーネットワークの位置決めと時刻同期手法の開発~機動的な多点計測の実現に向けて~, 構造工学論文集, Vol. 53A, pp.794-804, 2007.
 - 17) 小国健二, 佐伯昌之, 井上純哉, 菅野高弘, 堀宗郎: 社会基盤センシングのための階層的センサーネットワークの位置同定手法の開発, 土木学会論文集 A, Vol. 64, No. 1, pp. 82-100, 2008.
 - 18) 三木千壽, 鈴木啓悟, 加納隆史, 佐々木栄一, 石田稔, 高森博之: 鋼床版の疲労への SFRC 舗装による予防補強とその健全度モニタリング, 土木学会論文集 A, Vol.62, No.4, pp.950-963, 2006.
 - 19) 貝戸清之, 小林潔司, 加藤俊昌, 生田紀子: 道路施設の十回頻度と障害物発生リスク, 土木学会論文集 F, Vol.63, No.1, pp.16-34, 2007.
 - 20) 例えば, 畠中秀人, 鹿野島秀行, 坂井康一, 重田吉二, 岡本雅之, 今村知人: スマートウェーサービスの地域への展開, 第7回 ITS シンポジウム, pp. 313-316, 2008.
 - 21) 柳内洋一, 太刀川喜久雄, 中村純一, 坂本俊幸: ETC を支える無線通信方式 DSRC, 映像情報メディア学会誌, Vol. 63, pp. 179-184, 2009.
 - 22) 古川智也, 田野哲, 的場直人, 森広芳照: ヘテロダイナミックマルチモード受信における同期補足性の改善, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.105, pp95-100, 2006.
 - 23) 川村洋介, 山口敦由, 亀田卓, 中瀬博之, 坪内和夫: パケット SS-CDMA モデム: キャリア周波数偏差補償回路の実装 (信号処理, スペクトル拡散, 及び一般), 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. 105, pp.57-62, 2005.
 - 24) 石川博康, 福家直樹, 蕨野貴之, 杉山敬三, 篠永英之, 若井昌彦: 2.4GHz 帯 SS 無線 LAN を用いた道路無線システムの提案, 情報処理学会研究報告, Vol. 47, pp.17-24, 2001.
 - 25) 蕨野貴之, 福家直樹, 他: 高速道路上における 2.4GHz 帯 SS 無線 LAN を用いた通信実験, 情報処理学会研究報告, Vol. 47, pp.25-32, 2001.
 - 26) 和田浩, 岩田武夫, 鈴木英弘: 高速道路上における SS 無線通信実験, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. 102, pp. 1-6, 2002.
 - 27) 川田丈浩, 松川達哉, 野尻秀樹: 無線 LAN におけるアプリケーション品質評価法の一検討, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.103, pp.77-82, 2003.
 - 28) 小林正樹, 海老原成, 加藤聡彦, 伊藤秀一: ハンドオフと伝達誤りを伴う無線 LAN ネットワークにおける TCP 通信高速化方式の性能評価, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.104, pp.157-160, 2005.
 - 29) 小林潔司, M. N.B. Jaafar, 尾形誠一郎, 塚井誠人: 越境へイブ災害のための危険予測情報, 土木学会論文集 D, Vol.63, No.4, pp.478-497, 2007.
 - 30) 坂井康人, 慈道充, 貝戸清之, 小林潔司: 都市高速道路のアセットマネジメントリスク評価と財務分析, 建設マネジメント論文集, 土木学会, Vol.16, pp.71-82, 2009.

(2010年3月9日受付)