

インフラストラクチャのヘルスマonitoring

Health Monitoring of Infrastructure

藤野陽三¹⁾

Yozo FUJINO

Abstract: Health monitoring of infrastructure such as bridges and railways is reviewed. First, the needs and seeds of health monitoring are discussed. Two types of monitoring, i.e., embedded type and moving types are explained and their advantages and disadvantages are described and the future direction of infrastructure monitoring is discussed.

1. はじめに

社会的共通資本¹⁾の重要な要素であるインフラストラクチャ(以後、インフラと略す)は、みんなのための、みんなで保有する、すなわち、みんなが隔てなく使える、社会の基本的な支えとなるパブリックなものです。それだけに、インフラを常に使いやすく、安全な状態にしておくことが、安定な安心な社会の構築・維持にどれだけ貢献するかは計り知れないものがあります。私は、この30年、インフラ、特に橋の計画、設計、施工、製作、維持管理、マネジメントなどの研究・開発、内外でのアドバイザーを行ってきており、橋の「世話人」を自称しています。

インフラのかなりの部分はいわゆる土木構造物ですが、建築物も、駅舎や病院、図書館、役所庁舎など公的なものも多いですし、ビルや住宅のような私的なものであって社会への影響は少なからずあり、広い意味ではインフラに含まれるかと思えます。

ここでのテーマは、インフラのヘルスマonitoringとしました。「構造ヘルスマonitoring」、英語で対応するStructural Health Monitoring (SHM) という分野は土木、航空、船舶、機械、自動車、原子力、建物、電子、計測などさまざまな分野の人が集まる、横断的な分野としてこの10年で大きく成長し、確立してします。私も編集者の一人となりましたが、Encyclopedia of SHM (構造ヘルスマonitoring百科事典) という本²⁾も刊行され、国際学会もこの名称でいくつも組織されています。欧米でもアジアでも関心の非常に高いテーマです。

しかし、日本語で「構造」と書いてしまうと、土木系のインフラでは「橋梁」と狭く捉えられてという危惧があります。インフラは橋梁以外の構造物ももちろん含みますが、それだけでなく、土や水や空気などの自然、それに加えて人も扱うわけで、そういうのも含

めたモニタリングが今後の方向と思っています。というわけで、「構造」の代わりに「インフラ」ということにしました。「ヘルス」という言葉にも少し抵抗があるのですが、ほかに適当な英語がなく、そのままにすることにしました。意味としては「状態」モニタリングというような意味とご理解ください。

時代の変化と技術の進歩の中で、センサーを利用したヘルスマonitoring、状態モニタリングと呼ばれる分野がインフラの分野でも大きく脚光を浴びてきました。我々の建設工学の分野において、これまでは新規建設に重点が置かれ、そのため、新しい構造物の設計が重視されてきました。しかし、これからは、今あるインフラ構造物を知ることが補修などのアクションに大きく影響を与えるわけで、益々重要になるわけです。私の専門上、どうしても橋などの「構造」物に偏ってしまうところがありますが、この分野の背景、現状、展望などを述べてみたいと思います。^{[1][3]}

2. ニーズとシーズ

インフラのヘルスマonitoringに対する関心が高まってきている背景にはいろいろあると思います。一言で言うならば、社会の基本的な支えと期待されているインフラに対する漠然とした不安といえるのではないのでしょうか？

一番目に挙げられるのが社会資本ストックの増加と今後予想される、その高齢化であろうかと思えます(図1, 2)。明治以来、鉄道、道路、エネルギー・環境施設などのインフラに多くの投資が行われてきました。その総額は数百兆円に達するといわれています。特に、1960年代の高度成長期から2000年にかけての三十年余りの間における社会資本投資は大きなものでした。インフラは長く使うもので、長寿命が期待されておりますが、所詮、人工物ですから、極めてゆっくりでは

ありますが劣化していきます。時期がきたら、作り変えるというもひとつの選択肢ですが、それがいろいろな意味で難しいことは想像がつくことと思います。それだけに、劣化の激しいインフラを的確に見出し、適切な時期に適切に対応することが極めて重要なことであることは明らかなことです^{3,4)}。目視検査という方法がありますが、診る人次第のところが多分にあり、また、目で見えないところも多いというのが現実です。

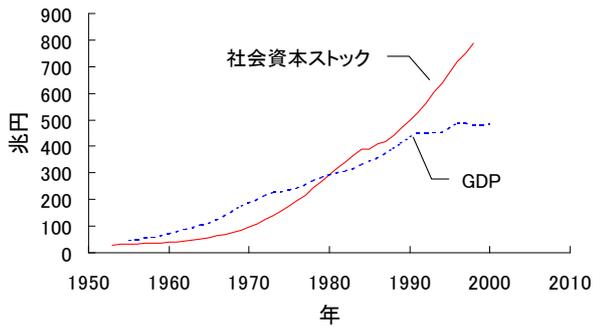


図1 増え続けるインフラストック

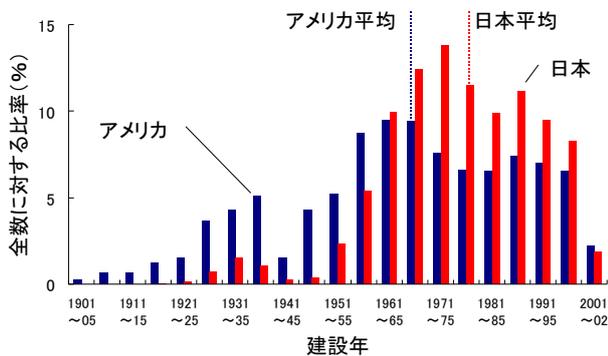


図2 日本とアメリカの橋梁の建設年分布（国土交通省資料より作成）

2 番目に挙げられるのが、インフラにかかわる「災害」だと思います。我国は、自然条件が厳しく、地震、強風、集中豪雨の発生頻度が高いという特徴があります。地形も急峻で、地震や降雨による地崩れの危険性のあるところは数え切れないぐらいあります。日本は世界でも有数の災害大国なのです⁵⁾ (図3)。1995年兵庫県南部地震のような内陸型の極めて厳しい地震がどの場所でも起こりうる状況にあるということもわかってきました。事実、気象庁が中心になって、アメダスによる気象観測、K-netによる地震計測が高密度に行われるようになってきましたが、地盤を含めインフラそのもののモニタリングしている例は多くありません。

私のような構造屋は歴史的に、地震や風などの極限的外力に対して、どのように設計するかが研究の大半を占めてきました。そのためには、橋などのインフラが外力にどのように振舞うかを的確にしておく、すなわち、地震や強風に対する応答をモニタリングする必要があります。それにより、より合理的な構造物が可能になるからです。地震などが起きたあとの対応も、モニタリングからどのくらいの応答であったのがわかれば、かなり合理的なものになります。

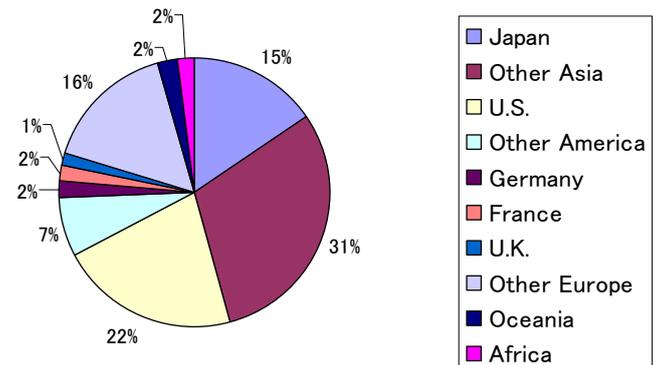


図3 自然災害被害額の地域別割合（1970年から2004年の合計：約1.1兆米ドル）

3 番目として、インフラにかかわる事故⁶⁾があります。メディアでも大きく取り上げられましたから覚えておられる方も多いと思いますが、2年半前の、2007年8月2日に米国ミネソタで大きな鋼トラス橋が崩壊しました⁷⁾ (図4)。この橋の事故の原因を調べた結果が米国政府から発表されています。それによると、トラス材どうしを繋ぐガセット鋼板の厚さが所定の半分しかないという設計ミスが数箇所あったとのこと。実に開通から40年、問題もなくきたのですが、橋の補修のための工事で一時的な荷重が設計ミスの部位に加わり、その破壊が引き金となって崩壊したものでした。

この事故は、我々橋屋にとっても極めてショッキングなことでした。ひとつは、崩壊につながる致命的な設計ミスが設計チェックや製作の段階で誰も気がつかなかったということです。この橋は、前から要注意ということで大学やコンサルタントに詳細検討が依頼されていましたが、プロの目は疲労損傷や腐食に行ってしまう、問題はあるものの使えるという判断がなされてしまいました。専門家の視野も広くないということです。アメリカでは、1970年代後半から、橋梁では目

視点検が義務化され、2年に一度行うことになっています。この橋の場合、目視点検を事故の数年前から毎年行ってきました。設計ミス部位は40年間、目視点検においても見過ごされてきたことになります。崩壊の発起箇所であるトラスのガセットが湾曲している写真が残っています。変状がありながら、検査や調査において、それを不思議に思う人がだれもいなかったということです。なお、1年後に新橋が建設されましたが、その橋にはモニタリングのためのいろいろなセンサーが取り付けられています。



図4 崩壊したミネソタのトラス橋(2007年8月2日)

インフラにかかわる様々な事故を調べていくと、地震災害のような自然災害によるものを別とすると、大きな事故は、設計や製作の不具合によるミスが原因という例が多いということが指摘されています³⁾。疲労クラックやさびというような劣化現象と違って、最初から変なので、それも外からは見えない場合も多く、目視点検見つけにくいのです。

安全安心に対する社会からの関心の高まり、高齢化していく我国の人口動態、環境資源への配慮等から考えれば、既存の膨大なインフラをいかに長く使いこなすかということを当然考えていかなければなりません。そのような中で、更新を極力少なくし、事故災害を減らすことが大きな課題となりますが、そのためには、今、インフラの状態を定量的かつ効率よくモニターすることがかせませません。それにはセンサーが必要になります。

グローバル時代の中で、社会がネットワーク化されてきていることは感じるどころです。地震で地方の工場の操業がとまると、部品が調達できなくなり、全く別の場所にある工場が停止に追い込まれることが往々にして起きています。人やものの移動がよりスムーズに、そして迅速に行われることが前提の社会になりつ

つある中で、交通や通信インフラが地震などの災害時にさえ、止まることは社会に多大の不都合をもたらします。より少ない時間で復旧するためには、状態把握が欠かせませんが、人手に頼れる時代ではありません。センサーの活用が必要なのです。

モニタリングに必要な技術としてセンサー、センサーからの情報(データ)の伝送、データの処理と貯蔵があげられます。

センサーに関していえば、従来から振動、温度気圧などを測るためのセンサーはありましたが、その精度、サイズ、価格、性能の進歩は、この10年著しいものがあります^{8,9)}。電子技術、レーザなどの光学技術、MEMSと呼ばれる小型化技術などにはものすごいものがあります。非接触センシングである画像もデジタル化の中で可能性がどんどん広がっています。無線センサー、スマートセンサ¹⁰⁾など、従来の計測のやり方を根本的に変える技術も視程距離に見える状態になったように思います。データ処理、貯蔵などの情報技術にかかわる長足の進歩は皆様もよくご存知のことでしょう。それから、少し前にはその存在すら知られていなかったGPSのような重要な測位技術が使える次時代になってきました。

3. インフラのモニタリング

よく知られているように、ある技術が社会の中に普及、浸透していくためには、ニーズとシーズがマッチすることが不可欠であるといわれています。往々にしてシーズが先走り、研究は進むものの社会での出口が見つからないことがよくあります。今回のテーマであるインフラのモニタリングは、今、ニーズとシーズがともに伸びてきており、社会への活用が期待される分野だと思われます。しかし、それでは黙っていても展開が進むかという、インフラならではの難しい面も多々あります。そういう問題をいかに克服するかをインフラに近い皆さんに考えていただく必要があると思っています。

3.1 モニタリングの現状 一横と縦一

さまざまなインフラにセンサーを埋め込んで、長期間にわたりモニタリングし、インフラのストック管理、インフラの事故災害の予防、事後対応に活用するというのが最終的なゴールなのだと思います。言い方を変えれば、インフラに人間がもっている神経網を埋め込むということだと思います¹¹⁾(図5)。図6はインフ

ラのモニタリングを横軸を時間、縦軸はさまざまなインフラ全体の集団を表すという意味で、空間軸と模式的にかいたものです^{1,2)}。縦軸は、空間に広がっている道路、鉄道であったり、橋梁を意味するとお考えください。私たちのゴールは、センサーによってこの領域を埋め尽くすこと、すなわち、塵のような小さくなったセンサーをはりめぐらすスマートダストなのですが、現在の技術、コストなどからしてそれはすぐには無理でしょう。としたら、どのようにしていくべきなのか？戦略、ロードマップを考える必要があると思います。図7に示すのはその一例です。

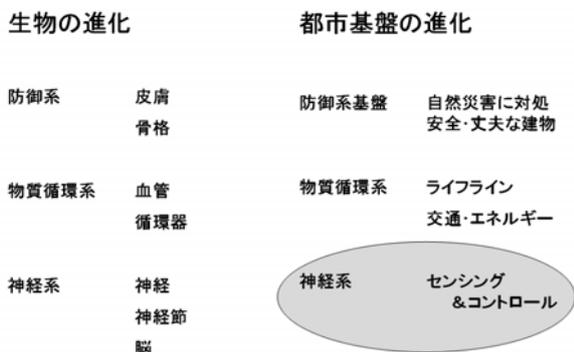


図5 インフラ(都市基盤)と生物とのアナロジー対比

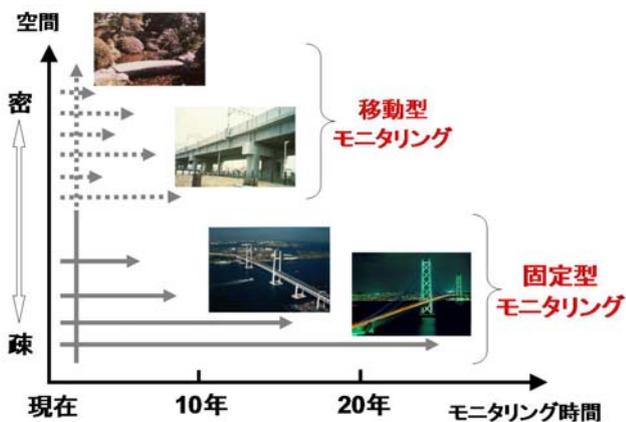


図6 インフラモニタリングの横(時間軸)と縦(空間軸)

	現状	2015年 基盤整備	2020年 統計ベース	2030年～ 定量的マネジメント
目標・将来像	事故・リスク インシデントの増加 →大事故懸念	事故に伴う被害の抑制	減少に転ずる	事故の未然防止
体制整備	事後対応	点検に基づく 予防的対応	優先度評価による 効率的対応	リスク評価による B/C最大化
技術開発	未整備	対策優先度	実性能の指標化	定量的リスク指標化
技術開発	保全技術	対処療法的	性能保証型技術 リスク予測技術	リスク明示型技術

図7 モニタリングロードマップの一例

3.2 移動型モニタリング

上述したように、劣化や損傷の予測ために、特定の構造物を対象とした固定型長期モニタリングで成功している例があります。ただし、このやり方における問題点の一つに、構造物の個体差の存在が挙げられます。得られた結果は対象とした構造物からのもので、一般化しにくいということです。同一設計の構造物であれば、設計上保証される強度や耐久性は同一ですが、材料や施工により余裕耐力や残留応力にはばらつきが生じます。また、完成後も建設された立地により、地盤の違いや荷重や日射・雨水などの環境もそれぞれに異なるため、長期的な劣化プロセスもそれぞれに異なると言えます。

1995年兵庫県南部地震では、隣接した同一設計の橋脚で、一方は、大きな被害を受けているのに対して、他方はほとんど無被害なケースが数多く見られました。また、私たちが近接した全く同一設計のいくつかの高架橋において、列車振動の応答速度を測定した結果、振動振幅には2倍近くの開きがあることが分かりました。このように、設計上は同一とみなされる構造物で、問題なく供用されているものであっても、災害時の損傷や外力に対する応答は大きく異なっている事例が確認されています。

劣化診断技術を構造物のストックマネジメントに適用する場合、求められるアウトプットは維持管理の優先順位の合理的な決定です。これを判断するには、構造物の標準的な応答値の幅と、対象物の個体差を勘案した応答との比較により劣化の程度を推定することとなります。

医療分野では、人体の計測値については、長年にかけて蓄積されており、年齢・身長・体重・血圧・血液成分などの平均値や標準値および個人差(個体差)、また各種計測値と体の異常との相関性などを分析した結果が整理されています。このため医師は、初診の患者に対しても標準値から乖離した項目を発見することで病気の有無のみならず、病名や原因までも推定し診断を行い、治療をすることができる環境にあります。

構造物においても構造形式や規模、建設年度や供用年数毎に多数の測定結果を蓄積しておき、これらの蓄積の中から構造物の応答の標準値や許容範囲などを把握できるような仕組み作りが必要であると考えられます。

そのために圧倒的に不足しているのが、さまざまなインフラのさまざまな環境条件での測定データの蓄積

なのです。目視点検は、全数を調べますが、分解能が低すぎます。

図6に示しましたが、世界の流れは、少数のモデル構造物を対象とした計測や研究により常時モニタリングの技術を確立し、その後、汎用性を有する技術を開発して、多くの構造物へと普及していくという展開を目指していると考えられます。しかし、これでは、比較できるデータの不足という状況に直面することが予想され、早い段階から、数多くの計測値を収集してデータベースを構築すべきなのだと思うのです。固定型から移動型モニタリングへの技術の転換が必要だと思うのです。図7において、数多くの構造物を対象にセンサを使った移動型モニタリングを行い、構造形式や規模・経年ごとの平均値や標準値の把握を行う（現状から上へ進める）ことを推進することも重要であると考えられます。

国の方針として、橋梁に関しては検査態勢が整備される背景があり、点検の一環として構造物の基本的な挙動について定量的な測定データを収集することも可能であると思われます。また、従来の研究では、固定型常時監視に主眼があったため、センサを構造物に固定した計測方法が前提とされてきましたが、点検の一環として構造物の挙動データを収集するには適していないと考えられます。そこで、機動性に優れ、かつ効率的に計測データを収集する方法として、例えば、コンパクトな計測装置や、車載型の計測装置の開発（移動計測システム）（図8、図9）などの必要性が高いと思っています^{15,16,17}。

データの蓄積が進むにつれて、数々の測定データの中から、標準値からの乖離の大きいものといった基準でスクリーニングを行うことが可能となります。何らかの不安要素が潜在している構造物をピックアップし、それらを対象に重点的なモニタリングを行うことにより、劣化に関する臨床的知見とノウハウの蓄積が進展するものと期待されます。また、人力で行われている点検作業の中からセンサ化できる項目については自動化を図ることで、発見精度の向上と点検作業の軽減を目指すことが考えられます。このような試行の中から、モニタリングによる劣化の把握に関する技術を確立させる方針で開発を進めることが望ましいと考えている次第です。

4. 最後に 一土木技術者のヘルスマニタリングにおける役割と価値一

わたしどもの研究室では、現在、挑戦しているものの一つに、既設の漏洩ケーブルを利用した雨量検知という課題があります。ケーブルから洩れる電磁波に雨が影響を与えらると思われるので、その逆手をとって、影響を受けた電磁波から場所場所の雨量を推定しようとするものです。電磁波、ケーブルを扱いますので、当然のことながら電気工学・アンテナ工学の知識が必要となります。得られた波形の一例を図14に示しますが、雨が降っているときと降っていないときでは見かけ上なら変わらないノイズのような波形です。ここから情報を抽出するとなると高度な波形処理技術が必要となり、信号処理の勉強も必要になります。屋内降雨実験施設かフィールドに装置を作って検証をおこないます。もうこの研究をはじめ3年が経過しており、あまりに難しいので、諦めの思いも出た時期がありました。今、博士課程の熱心な学生さんが電磁気学もアンテナ工学も信号処理理論もマスターし、やっと最近特殊な特異性分析を波形に適用すると、雨量の逆算ができそうな結果を得ることができました。実用化までの道のりはまだ遠いと思われませんが、一山越した気がしています。この研究を通じて、つくづく感じたことは、電気の人、応用数学の人に教えていただきながらここまでできましたが、「雨を検知したい」というインフラへの強い思いでもなければ、こんな研究はだれもやらないであろうということです。アンテナ工学の人や応用数学の人では決して考えもしないし、始めないし、そして出来ないテーマだということです。

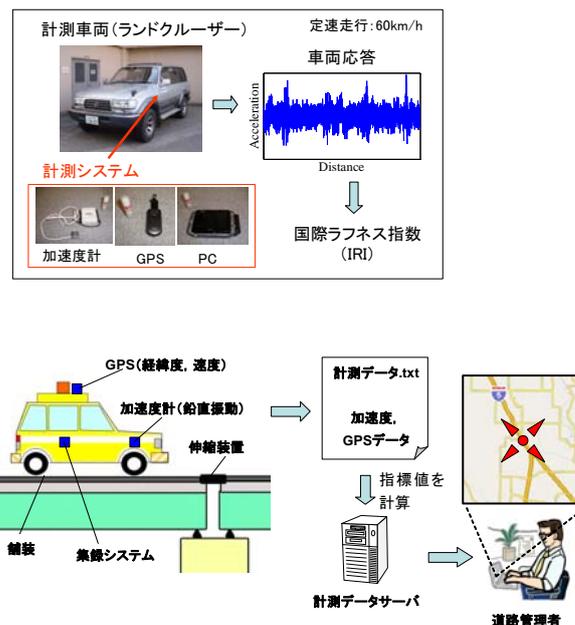


図8 検査車を利用した VIMS (Vehicle Intelligent Monitoring System)

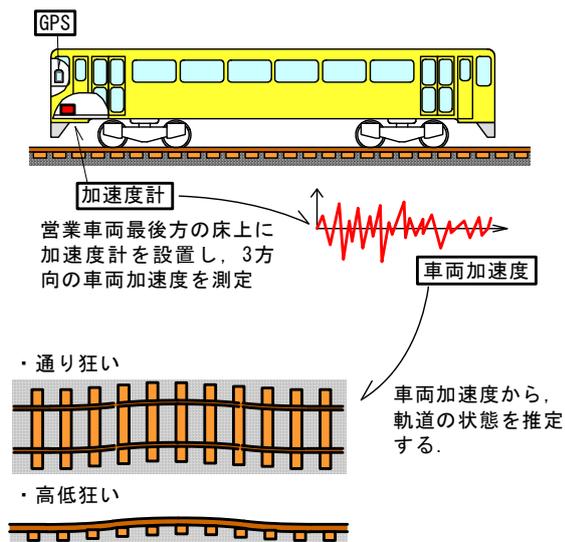


図9 営業列車を利用したTIMS (Train Intelligent Monitoring System)

インフラの（ヘルス）モニタリングは、難しい面が多く、1) 明確な目的意識、2) そのために何を測るか、3) どのように測るか、4) 得られたデータをどのように処理し、5) 判断するか をしっかりと持って行かないと、形だけのものになってしまいがちです。電子計測メーカーに人にお願いして... では決して成功できるテーマではないように、上の経験からも思います。土木、社会基盤、インフラ関係の方はコーディネートという点では、優れた面が強いといわれていますが、モニタリングに関していえば、センサー、データ収集、データ処理などの専門分野の素養をもつと、本当に「役に立つ」モニタリングができるようになると思われま。

この将来性の高い分野から新しい人材が生まれることがもっとも大切なことかと思えます。そうなるように期待し、自分の身の回りでも努力したいと思えます。

5. 参考文献

- 1) 宇沢弘文：共通的社会資本,岩波新書 696,2000.11
- 2) Boller, C., Chang, F-K. and Fujino, Y.(編著): Encyclopedia of Structural Health Monitoring, vols.1-5, pp.1-2709, Wiley, 2009.
- 3) 藤野陽三：社会基盤の保全に向けて一維持管理のあり方一, (独立行政法人) 土木研究所公開講演会,2007.10
- 4) 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活用, (財団法人) 鉄道総合技術研究所講演会,2007.11

- 5) 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
- 6) 藤野陽三：橋梁の事故防止と基準不適合問題, 橋梁と基礎, 2008年8月
- 7) 藤野陽三：鋼橋の維持管理, JSSC,No.69, 日本鋼構造協会, 2008年8月
- 8) 中村邦雄：計測工学入門 森北出版株式会社 1994年 初版
- 9) 安藤繁, 田村陽介, 戸辺義人, 南正輝 センサーネットワーク技術 東京電機大学出版局, 2005年初版
- 10) 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, 2009.6
- 11) 藤野陽三:都市基盤の事故災害リスクを低減する, 「アーバンストックの持続再生」—東京大学 21世紀COEプログラム「都市空間の持続再生学の創出」— (藤野陽三, 野口貴文編著), 技報堂出版, 2007年
- 12) 的場, 藤野, 阿部, 畠中: 研究報告「センサを活用したインフラモニタリング技術の開発の方向性について」, 国土技術研究センター, 2009年5月
- 13) Dionysius M. Siringoringo, Yozo Fujino, Observed dynamic performance of the Yokohama-Bay Bridge from system identification using seismic records, Journal of Structural Control and Health Monitoring. Vol. 13, No.1, pp 226-244, January/February 2006
- 14) Koji Takewaka: Maintenance plan for 100 years of service life on a newly constructed structures, Proceedings of the International Workshop on Service Life of Concrete Structures,2005.2
- 15) 藤野・西川・長山：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, (印刷中)
- 16) 朝川皓之ほか：一般車両の走行時動的応答を利用した舗装凹凸の簡易状態評価システムの開発, 土木学会論文集 (投稿準備中)
- 17) 石井・藤野・水野・貝戸：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.44-61,2008.2
- 18) 猪又 憲治, 辻田 亘, 水谷 司, 鹿井 正博, 鷲見 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.