

# センシング・モニタリング技術の課題と展望



藤野 陽三  
Yozo Fujino

東京大学大学院  
工学系研究科 総合研究機構  
特任教授(東京大学 名誉教授)

## まえがき

世の中、次第に監視、モニタリング(Monitoring)社会になってきていることを感じます。

防犯カメラという名の監視センサーがわが国では350万台も置かれ、問題の解決に威力を発揮するケースを間々聞く昨今です。1995年の阪神大震災で残っている映像は圧倒的に少ないのに対し、2011年3月11日の東日本大震災のときの凄まじい津波の映像が数多く残されています。

鉄道ではSuicaのような電子カードが導入されていますが、この記録から一人ひとりの行動経路が分かるという意味では強力なセンサーでもあります。携帯電話はさらに進んでおり、カメラやビデオ機能はもちろん、GPS、加速度計をはじめさまざまなセンサーが内蔵されています。上空からは衛星で、下からは街中のビデオや個人の携帯電話で、地球や社会に関わる情報をモニターしうる体制が構築されつつあるのが現状に思えます。これらは

ICT (Information and Communication Technology) の成果の賜物であり、20、30年前には考えられなかった状況です。

2012年12月の笹子トンネル天井板の崩落事故は、高齢化するインフラの安全に対する漠然とした不安が現実であることを見せつけました。と同時に、目視や打音点検の限界も社会が知ることになり、現代ICT技術を使ってこの問題を解決できないかと多くの人に思わせました。事実、総合科学技術会議の平成26年度の研究開発目標の一つの柱は「インフラの安全」であり、そのための先端技術すなわち、センシングやロボット技術の適用が掲げられています。インフラにいわば、神経系を組み込んで傷みの分かる自律的なシステムにするということです(図1)。インフラが社会の経済活動に重要であることはよくわかっていますが、政府の研究開発対象の重点課題にあがったこ

とはこれまであまりなかったと思われます。予算もつく中で当然、成果も期待されます。筋のよい研究開発テーマを設定し、この分野の発展、特に実務面での普及に貢献することに尽きます。私も含めて関係する研究者、技術者の責任は大きいと言えます。

モニタリングを支える技術を大きく2つに分けると、センシングとシステム同定技術などそれを処理する技術に分けられます。後者はERA (Eigensystem Realization Algorithm) 法に代表されるように1980年、1990年代に大きく発展しました。最近では、ビッグデータと呼ばれるように大量のデータから有意な事実や異常値の検出の方向に進んでいるように見えます。前者は1990年代のレーザーなどの計測装置や高度な非破壊検査法が継続的に発展し、2000年台に入りワイヤレスセンサーの研究が加わってますます盛況な状況です。

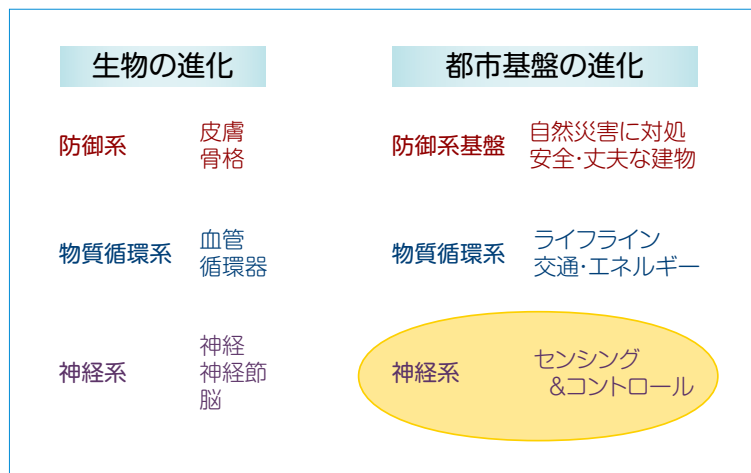


図1 都市基盤と生物とのアナロジー対比

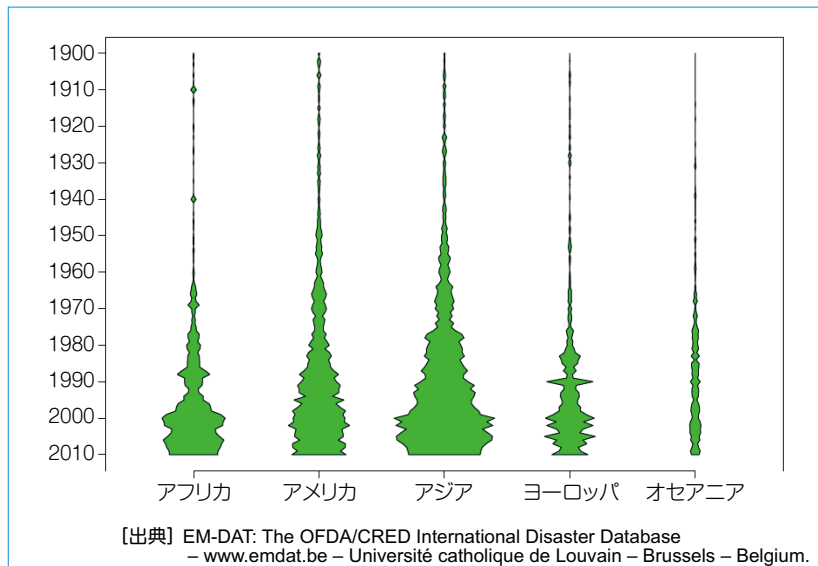


図2 自然災害の発生件数の1900年から2010年まで推移(大陸間の比較)

この分野は、もともとは航空系が中心となって出発しましたが、「構造ヘルスマニタリング」、英語で言えば Structural Health Monitoring (SHM) という新しい分野を形成し、次第に、土木、船舶、機械、自動車、原子力、建物、電子、計測、数理などさまざまな分野の人が集まる横断的な分野として成長しました。Encyclopedia of SHM (構造ヘルスマニタリング百科事典) という2700ページにも達する本<sup>1)</sup>が刊行されましたが、欧州、米国からの編者に加えてアジアから私が加わったのは、このテーマが世界に広がるホットな研究分野となっているからであり、SHMを扱う国際学会がいくつも組織されています。

ここでは、土木や鉄道などのインフラ分野への適用を視野に入れ、課題や今後の展開などを述べます。

### 構造ヘルスマニタリング(SHM)への関心の高まりの背景

SHMへの関心は、前述のように世界的に高いレベルを示しています。その理由はいろいろな側面から説明ができるように思います。

「安全」に対する社会的関心の高ま

りが大きな原因の一つとして挙げられます。逆に言えば、事故、災害が増える傾向にあるということです。自然災害が世界的に増えつつある傾向にあることは統計的にも明らかになっています(図2)。最近の集中豪雨などの多さを見るとうなずく人も多いでしょう。人口が増え、我々のインフラ関係の資産も増えている状況の中では自然災害によるリスク(ロス)が増えることは当然ともいえます。

インフラは人工物であり、時間とともに劣化し、脆弱性が増します。トンネルの事故も経年が関係していることは事実です。わが国でいえば、高度成長期に建設されたものが40年、50年経過しつつあり、適切な維持管理、補修をしないと危険域に達するものが出てきます。2007年に突如、崩壊したミネソタの橋は設計ミスが原因でした。このように設計や施工のミスや不良の問題も潜在的に抱えています。インフラそのもののリスクが高くなりつつあるのです。自然災害やインフラの事故を減らそうというときにセンシングは有力な方法になりえます。

インフラには鉄道、道路、上下水道などさまざまなものがあります。原子力

発電などのエネルギーは公共性が高くインフラといえます。図書館や病院などもインフラといえますし、最近では公共空間に大きな影響を与える住宅、オフィスビルなども広い意味でのインフラに入れる向きがあります。このようなインフラに深く関係するのが土木、建築の分野であり、学術的には「構造工学」といわれる分野です。この分野における最近の30年の大きな学術的な変化といえば、それは有限要素法と呼ばれる解析技術の進展と浸透といえます。

有限要素法に関しては固体だけでなく、流体解析や熱などさまざまな解析に使われ、数多くの汎用ソフトが出回っています。さまざまな非線形問題(材料、幾何学、衝突など)も扱え、自由度も何十万、何百万が解ける時代です。昔は、自由度や計算時間をいかに減らすかに力が注がれ、それで研究論文になりましたが、今や、そうではありません。式が立てば解ける時代だからこそ、マイクロな緻密な実験から材料の詳細なモデル(構成則)を構築するという基礎的研究か、実際の構造物が示す複雑な挙動から新しい現象やテーマを探すフィールドベースの研究かの二極化の時代になってきているよ

うに感じます。神戸のEディフェンスにある超大型振動台を使ったような構造実験というのももちろんありますが、個人ベースでは装置や費用の面から無理であり、研究の主流ではありません。研究者が新しいテーマを探しに、センサーを使ってフィールド計測に出る時代になったのです。

以上はニーズ面からの要請ですが、前述のようにシーズ側の技術革新も驚異的です。一つはセンシング技術の向上です。さまざまなセンサーが開発され、その小型化、高機能化そして低価格化が非常に進んだことは大きく影響しています。センサーからの膨大なデータを直ちに処理するコンピューティング技術の進展も大きいです。システム同定技術、すなわち、データからモデルそのもの、モデルのパラメーター決定などの解析手法も極めて進歩しました。これはいわゆる逆問題に相当し、パラメーターを入れて応答を求める、普通の正解析に比べ、難しく、数学的にも高級な問題です。研究者がより高級な課題を好むのも自然です。

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であることは間違いありません。しかし、それでは黙っていても展開がどんどん進むかということ、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方、センサーや情報処理に近い方の両方が考えていただく必要があると思っています。

## インフラのリスク

インフラの災害・事故によるリスク (Risk) は、概念的には原因となるハザード (Hazard) と脆弱性 (Vulnerability) の積、すなわち

$$R = H \times V$$

で表してよいでしょう。ハザードとは構造物にとっては作用 (Action) のようなものであり、交通荷重、地震、風、雨量などがその代表的なものといえます。劣化やさびに関係する塩や水もいれてもよいでしょう。脆弱性は構造物でいえば抵抗に相当するようなもので、強度や粘りは当然ですが、冗長性とか設計ミスなども入ります。設計で考えていないような想定外の挙動を入れてもよいかもしれません。

## ハザードセンシング・モニタリング

わが国は自然条件が厳しく、事実、地震や豪雨による自然災害が極めて多く、統計的には世界で最も自然災害の影響を受けている国と言えます。そのようなこともあって、地震や風、雨量などのハザードのセンシングは従来から行われてきました。気象庁の気象計測 Amedas や地震観測、防災科学技術研究所の全国ネット K-NET、KiK-net などよく知られています。気象庁の地震動観測データはリアルタイムで集計され、緊急地震速報に使われています。2011.3.11の地震でも東京では揺れが来る前に、地震警報がテレビの画面に出されました。このようなシステムは諸外国にはない、日本ならではのシステムです。

このようなハザードセンシングをインフラの運用に適用している代表的な例が、鉄道系の早期地震警報システムと東京ガスの Supreme と呼ばれるシステムです。

早期地震警報システムは地震動があるレベル以上になると列車への電源供

給を止め、ブレーキをかけるシステムですが、このシステムがはじめて導入されたのは東海道新幹線の1965年で、開通と同時期です。今から50年近くも前にこのような斬新なシステムを導入した当時の国鉄技術陣の先見性と、システムとして作り上げた技術力には感服するばかりです。その後、海岸線にも地震計が設置され、海洋性の地震にも対応できるようになり、地震波が到達するまでの時間差を利用した、より有効なシステムに発展して今日に至っています。

東京ガスの Supreme は、1995年阪神淡路大震災でのガス施設の被害の大きさを鑑みて開発導入したもので、SI地震計を管轄内の4000箇所あまりに設置し、ガスの遮断を揺れや液状化の情報をベースにリアルタイムに行うものです。これも世界的にも画期的なものです。

ただ、いずれのシステムもハザードのセンシングであって、高架橋やガス管などのインフラそのものをセンシングするものではありません。停止した列車や止めたガスの再開となると、人間が現地でインフラの安全を確認する作業を必要とするため、ダウンタイムが大きくなります。

## インフラのセンシング

構造物の強震観測と呼ばれるセンシングが始まったのは1958年でダムが最初といわれており、橋りょうで始まったのは1961年です。構造物の周期帯域を対象にしたSMAC強震計が1953年に開発され、各地で地震動とともに構造物の揺れが計測されました。もちろん、これはリアルタイムではなく、オフラインで処理されるものですが、地盤の揺れがいかに構造物で増幅されるかを定量的に実証的に示すもので、耐震工学、耐震設計の発展に大き

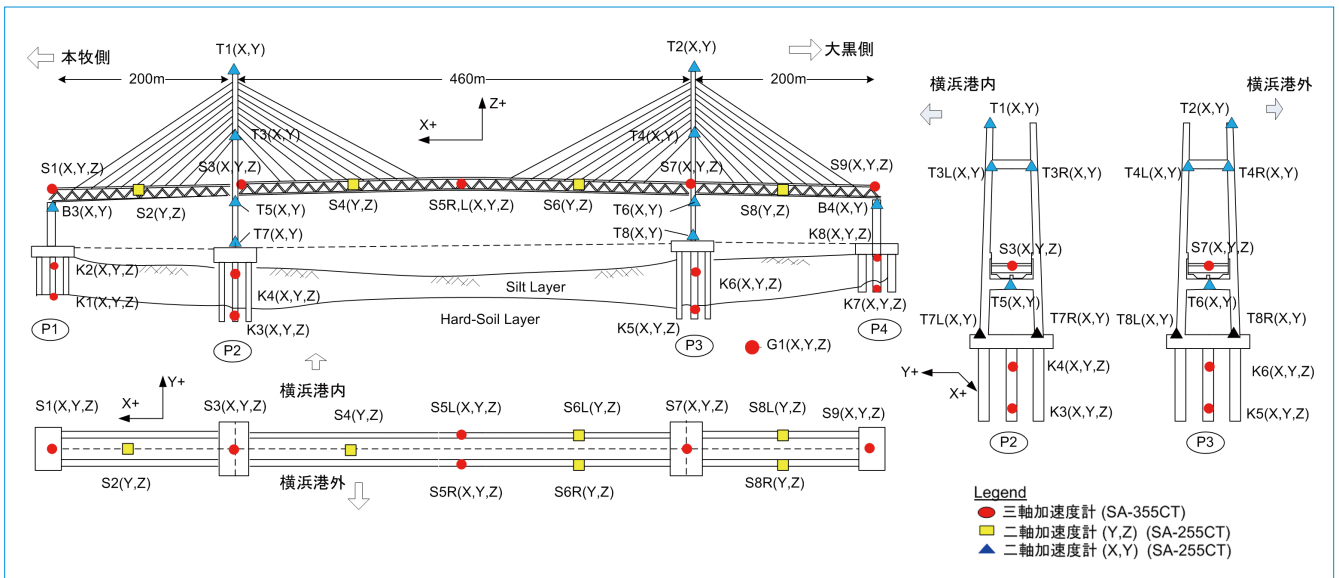


図3 横浜ベイブリッジの高密度地震センシング

く貢献しました。

地震に敏感に反応する長大橋の建設が盛んになり、それらでは強震観測が行われる例が増えました。強震観測の圧巻は1989年に完成した横浜ベイブリッジです。30台以上のサーボ型の高精度地震計が設置され、以来、2011.3.11の地震を含め数多くの地震の揺れを記録に収めてきました(図3)。2000年ごろ、耐震補強検討の段階でそれまでに計測された地震応答記録を調べた結果、橋軸方向の揺れで端部のエンドリンクが桁と固着してヒンジとして動作しないことが明らかになりました。1995年の阪神淡路大震災のとき、東神戸大橋のエンドリンクが破損し、危うく桁が崩壊直前までいったという想定外の壊れ方が私の頭の中になりましたので、横浜ベイブリッジでは耐震補強の際、端橋脚部で桁と基部をPCケーブルで繋ぐfail-safe設計を導入しました。地震応答センシングの結果から、設計で考えているのとは異なる「想定外」の動きを見つけ、それを耐震補強に生かしたという、センシングの効用を示す例です。

1997年に完成した白鳥大橋(室蘭市)

では強風時の吊橋の振動をセンシングする動態観測を行ってきました。そのデータから、世界でも例を見ない、完成系の吊橋の主塔において風向方向に振幅は小さいのですが、きれいな自励的な振動が発生していることが発見されました。もちろん、設計では想定していない振動です。

これらは地震や風による揺れを長期にわたってセンシングし、その結果、工学的あるいは学術的に価値のある事実をつかんだ例です。とくに横浜ベイブリッジの場合は補強設計に生きたという意味では価値が高いと言えます。

長期計測ではなく、短期に計測するのも意味がある場合もあります。

鉄道高架橋は場合によっては、同じ形式が連続して建設され、供用されています。これらは同じ荷重に対して同じような挙動をするのでしょうか? 図面上は全く同じ高架橋の同じ場所にセンサーを貼り付け、計測した結果の例を図4に示します。上を通る列車は共通であるにも関わらず、応答は同じ走行速度でもばらばらで倍半分かっています。これは何を意味するのでしょうか? 実際には、その後、詳細な調査

検討が行われ補強工事が行われたと聞いています。同じような構造が同じ荷重を受けても中には特異的な、あるいは逸脱した応答をすることが、同じような構造物を数多くセンシングしてはじめて見つけれられるのです。

インフラはライフラインと英語では言われるように、重要な線状構造物であることが多く、鉄道はその最たるものでしょう。となると、究極のセンシングは移動しながら線状のインフラをセンシングということでしょう(私はこれを移動体センシングと呼んでいます)。

ドクターイエロー、道路で言えばロードプロファイラーなどは移動しながら、軌道や路面の状態を高い精度でセンシングします。しかし、これらは高価なため、新幹線などの主要幹線でのみ使われますが、一台のものを使いまわすためセンシングの頻度がどうしても低くなります。事故災害を未然に防ぐとなると高頻度なセンシングが欠かせません。ローカル線でも使えるシステムが今後の日本にとり重要だと考え、東大橋梁研究室ではTIMS, VIMS (Train-, /Vehicle Intelligent

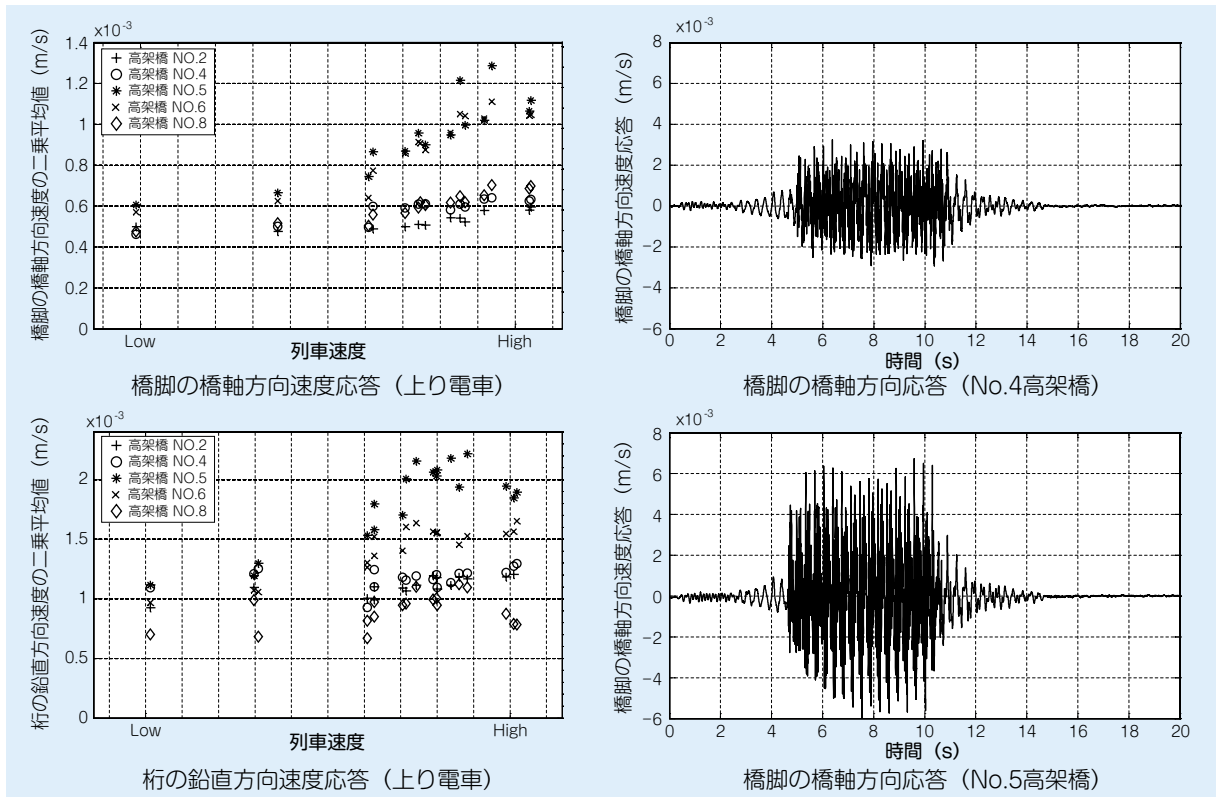


図4 図面上は全く同じ鉄道高架橋群での列車通過時の振動計測

Monitoring Systemの略)というシステム(図5)を2000年ごろから勉強してきています<sup>2,3)</sup>。営業車に加速度計や位置情報のためのGPSとPCを積んだシンプルなもの、ローカル線での適用を視野に入れたものです。最近ではJR鉄道各社で同じような試みがなされ、実用化しているのは喜ばしいことです。

### インフラセンシング・モニタリングの今後の展開

日本のインフラの経年化、高齢化が進んでいることは事実であり、笹子トンネルの事故もあり、「老朽化」という言葉も使われています。インフラにとり大事なことは安全で安心して使えることであり、事故災害をなくし、維持管理の費用を抑えるための努力は今後とも大きな課題です。

アメリカでは立て続けに起きた橋りょうでの大事故を踏まえ、1970年代前半から橋りょうでは目視検査を導

入し、インフラマネジメントを進めてきました。しかし、個人に大きく依る、見えないところへの対応など目視の限界を意識し、センシングを重視したLTBPP(Long Term Bridge Performance Program)を2007年から開始しました。ヨーロッパでも同じような研究プロジェクトが行われています。中国では、SHMを満載した橋りょうをすでに数多く建設していますが、モニタリングの効用が現時点で示されているわけではありません。

インフラモニタリングの難しさは、量が膨大であること、構造特性も、劣化も、化学的なものから物理的なものまで多種多様であることにあります。リスクマネジメントではハザードモニタリングに力点が置かれてきましたが、高架橋や橋りょうなどのインフラそのものへのセンシングが次のステップであることは間違いのないでしょう。古い橋脚では洗掘による傾斜の問題がありますが、鉄道分野でセンサーを使って

の常時モニタリングが実用化しつつあるのはその一例です。洗掘が懸念される橋脚の数はそれほど多くないと思われる、実用化しやすい分野でもあります。

インフラストックのセンシングとなると必要なセンサーの数が増えます。ハザードである地震動では、10kmとか20kmの間隔でのセンシングということでもある程度、揺れの空間的分布の状況をつかめます。しかし、一つの高架橋ユニットそれぞれにセンサーを配置するとなると、20m間隔のオーダーになり、必要なセンサーの数は2桁とか3桁、増えます。センサーの精度、安定性、耐久性を保持したままで、どれだけセンサーのコストダウンを行えるかが最大の課題となります。MEMS加速度計などが次々に開発されていますが、スペックを明確にした上で本気になっての組織的な開発が欠かせないように思われます。

インフラの立場から言えば、すべての高架橋ユニットにセンサーを置く必

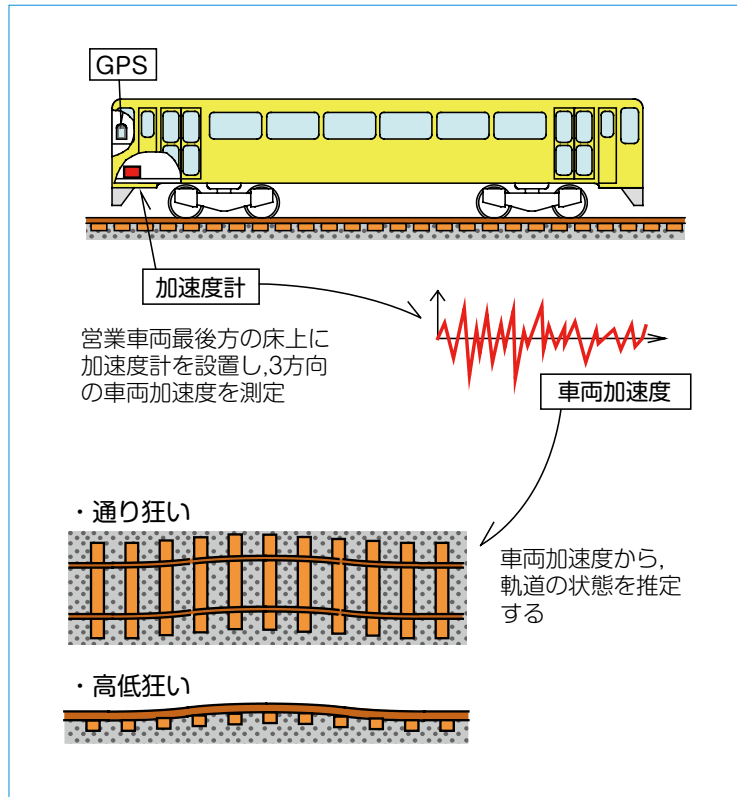


図5 TIMS (Train Intelligent Monitoring Systemの略)

要があるのか、ある程度間引けるのかなどに答えられるようにしておく必要があります。

材料の劣化に起因する損傷を対象とするストックマネジメントへのセンサーの適用はさらに難しい問題を抱えています。損傷は極めて局所的（ローカル）であり、センサーに必要な精度は高くなります。損傷の可能性がある箇所は普通、無数に近く、必要なセンサーの数も莫大となります。また、局所的な損傷の進展は概して極めて緩慢であり、センサーに要求される精度、安定性、耐久性、コストはリスクマネジメントに使うセンサーに比べ、ワンオーダーは高いと言えます。構造側から、センサーの置く場所、密度などに関してスペックを明確に書けるかがキーとなるでしょう。

ストックマネジメントへのモニタリングの適用は、上記のような理由から埋め込み型によるのは難しい面が多々あり、移動型のものを追求するのが一

つの方向でしょう。図4に、鉄道高架橋での振動測定の例を示しましたが、このような計測が精度よく、できれば非接触で簡単にできる方法などが考えられないでしょうか？多くの同種の構造をざっと計測して、母集団の特性を把握し、その中で逸脱した値を示すものを詳細計測するというような2段階型も考えられてもよいでしょう。移動型の究極は営業列車によるモニタリングでしょう。

### おわりに

ICTの分野の研究者だけでなく、企業もがインフラを有望な適用先として熱いまなざしで見えています。ICTのインフラ監視への取り込みは間違いのない方向であると思いますし、私もその方向で研究を行ってきました。笹子トンネル事故のあと、何人かのセンサー研究者から、天井板の吊材にセンサーをつけていれば事故は防げたのではないか？という質問を受けました。確かに、それは正しいかもしれませんが、現実

的な話では全くありません。話はそんなに単純ではありません。

インフラのリスクマネジメントやストックマネジメントへの適用、インフラを管理する我々サイドが、明確な目的意識をもった上で明確なスペックを書き、センサー側などのICT側の開発者と綿密な技術のすり合わせを行い、互いが相手側の状況をよく知ることが大切なことだと感じています。[RRR]

### 文献

- 1) Boller, C., Chang, F-K. and Fujino, Y. (編著) : Encyclopedia of Structural Health Monitoring, vols.1-5, pp.1-2709, Wiley, 2009
- 2) 下園武範, 阿部雅人, 藤野陽三, 小芝明弘, 鹿間剛 : 車両振動に着目した軌道モニタリングシステムの開発, 土木学会年次学術講演会講演概要集共通セッション Vol 58, 2003
- 3) 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