

インフラのモニタリング技術の現状と課題  
 および計測データからの健全度評価技術の例

CURRENT STATUS and ISSUES of INFRASTRUCTURE MONITORING and INTEGRITY EVALUATION  
 APPROACHES from MEASURED DATA

高瀬和男\* , 河邊大剛\*\*, 金哲佑\*\*\*, 杉浦邦征\*\*\*

Kazuo TAKASE , Daigo KAWABE , Chul-Woo KIM and Kunitomo SUGIURA

**ABSTRACT** This paper is intended to present technical issues relevant to the technology development of infrastructure maintenance, and an activity on integrity evaluation approaches in conjunction with structural health monitoring. An innovative Bayesian approach to detect damage in bridges from the acceleration monitoring is discussed with verifications on field tests. An idea to reduce data communication during the monitoring campaign is also introduced.

**KEYWORDS** : 維持管理, モニタリング, 健全度評価技術

Maintenance, monitoring, integrity evaluation technology

1. まえがき

現在の社会は、ゲリラ豪雨、地震や台風などの自然災害、高齢化問題、国際競争力の確保、未知の感染症との共存など多くの難解な課題が顕在化してきている。それを克服して、国民が、安心した安全な社会環境、快適な生活環境、質の高い経済環境を創造するには、高度情報処理技術を駆使した新たな社会システムの構築が必要であると言われている。

我が国においては2015年度に国が公表した Society5.0 プラットフォーム構想<sup>1)</sup>において、将来のサイバー空間とフィジカル空間の社会モデルが示された。その構想を受けて、多くの企業などが新たな都市構想<sup>2)</sup>を掲げて、将来のデータ活用、社会システムの方向性を示している。その多くの例は図-1にまとめたように、あらゆるものやサービスがつながるスマートシティといわれる社会モデルである。そのスマートシティにおいては、センシング技術(計測する技術)を中心としたモニタリング技術(時間軸を考慮した

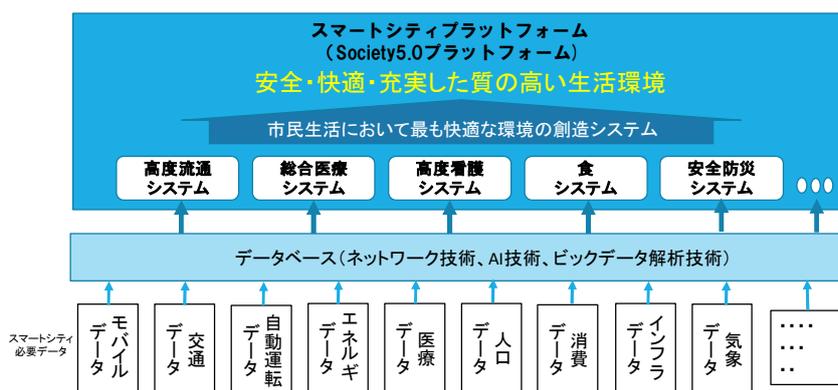


図-1 スマートシティ(あらゆるものやサービスがつながる都市)の考え方

\* 工博 京都大学大学院客員教授 地球環境学堂 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

\*\* 工修 京都大学大学院研究員 地球環境学堂 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

\*\*\* Ph.D.工博 京都大学大学院教授 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

計測技術)により多くのデータがネットワークを介してデータベースに収集される。そして市民生活において最も快適な環境となるように、AI技術などを使いデータは分析、解析され、我々の生活にわかりやすい指標として提示されるような社会システムが構築されることになると思われる。発展が期待されるシステムとしては、高度物流システム、総合医療システム、高度看護システム、安全安心な食システム、安全安心な防災減災システムなど数多くの項目が考えられる。

このシステムに導入されるデータは、ある目的で収集されたデータであっても、その目的以外の多くの用途に利用されることになると考えられる。例えば、図-1に示すように、モビリティ活動から計測されるデータ、エネルギー生産・消費活動から計測されるデータ、経済活動から計測される統計データなど多くのデータが、必要によって、かつ、簡単に計測されて、それがデータベースに格納される。我々は、安全安心、快適性や生活環境の向上などのために必要な評価システムを作り、そのシステムの評価値が適切な状態を示すようにフィジカル空間の物理量を適切にコントロールすることになるであろう。

この図式の中には、社会インフラの維持管理も含まれることになると考えられる。社会インフラの維持管理のために、どのようなデータを必要とするか、どのような項目を管理すべきか、どのような評価を行う管理システムを構築すべきかを計画し、その上で広く安価にそのデータを収集するために、多くのデータ収集者と情報の交換をする必要がある。例えば、橋梁のような構造物においては、そのインプットである車両重量とそれによるアウトプットである構造物の応答値を適切に収集する場合、車両重量は自動車に設置された荷重センサから計測し、その車両の走行位置、時間はGPSを利用して計測し、そして構造物の応答値として時刻同期を明確にしたセンサを対象橋梁に設置しておけば、適切に橋梁の健全度を評価するための一つのシステムを構築することができると思われる。よって、将来のデータ収集に対して、自動車の生産メーカーと必要な作用データの提供について協議を行い、GPSからの適切な車両位置データの収集を行う。その上で、社会インフラの維持管理者は、他の事業者では収集できない構造物の応答値のデータについて、センサを現地に設置するなど適切な手段を計画すべきであろう。

このシステムにおいて最も重要な点は、道路管理者や土木技術者に対する収集されたデータを用いた明確でわかりやすい健全度評価方法の提案である。現在、構造物の構造設計を理解し、劣化機構に精通した経験豊かな維持管理の専門技術者が減少してきている中で、多くの専門的知識を必要とする評価システムにおいては、その健全度評価方法の提案が待たれるところである。

本稿では、2013年頃からのモニタリングに関する国や団体の活動状況、最近の点検要領の改訂などの動きおよびその課題点を示す。次に新しい健全度を評価するモニタリング技術の例を紹介する。

## 2. 社会インフラ維持管理に関する国や団体の活動と課題

### 2.1 国や団体の活動

2013年に国土交通大臣により「メンテナンス元年」が宣言されて以来、法律の整備、予算措置や技術革新などの面で社会インフラの維持管理の活動は大きく加速してきたと感じる。特に2013年に実施された道路法改定はメンテナンスサイクルの取り組みに大きな方向性を示している。

まず、メンテナンスサイクルを明確にするために、道路管理者の義務を明確にしている。その中で、5年に1回の近接目視点検による全数検査を義務付けている。さらに、メンテナンスサイクルを回す仕組みを構築するために、高速道路更新事業の財源確保、点検、修繕予算の最優先での確保、地方における大規模修繕更新を支援する予算の確保などである。さらに、この仕組み作りの中には、産学官によるメンテナンス技術の戦略的な技術開発の推進も含まれている。

また、この2013年当時は、第2次安倍政権が発足し日本再興戦略の中で「三本の矢」といった三つの政策が示された。その第三の矢とした「新たな成長戦略」には、戦略市場創造プランの一つとして

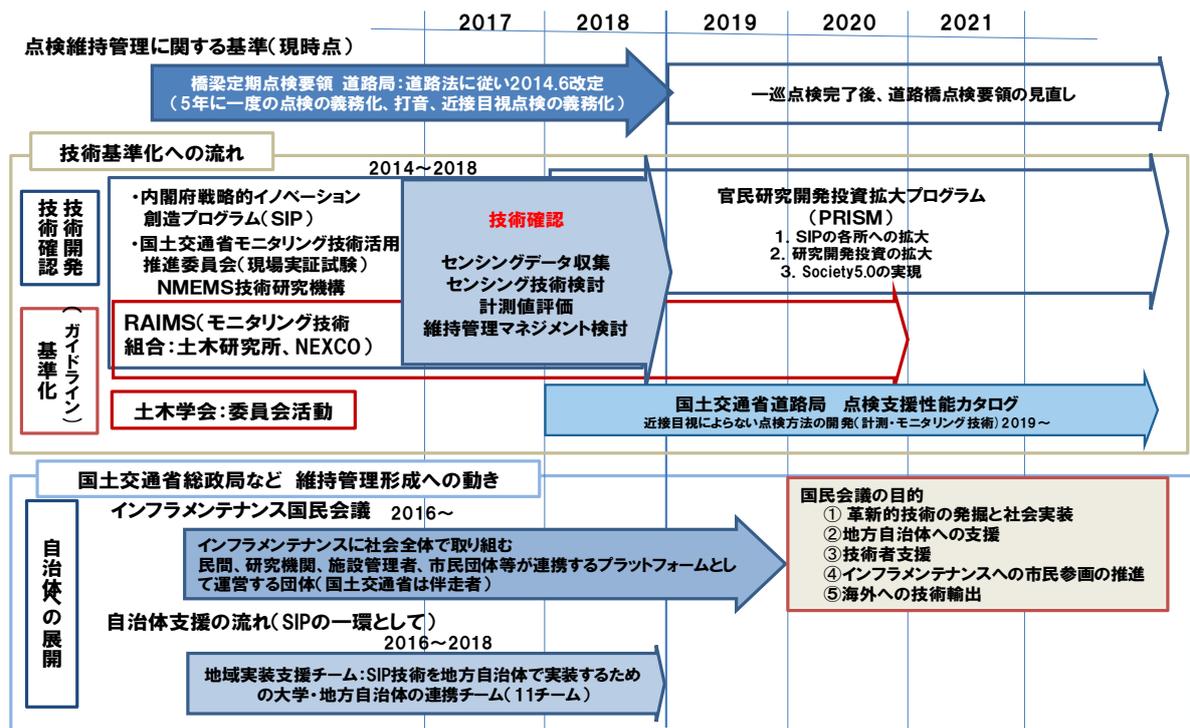


図-2 維持管理に関する国や団体の活動

「安全・便利で経済的な次世代インフラの構築」が示されており、最先端の技術を生かしたインテリジェントインフラを実現することを示している。具体的にはインフラ情報のデータ化と地理空間情報との融合、インフラへの各種センサの設置によるビックデータを活用した点検・補修計画の運営、交通データとの試験運用、センサやロボットによる新たな点検・補修技術の開発などが列挙され、2030年度にはモニタリング事業として20兆円規模の産業になることが期待されている。

その後、「メンテナンス元年」を受けた施策、日本再興戦略を受けた施策の実現に向けて、多くの活動が開始された。図-2には筆者が把握している主な活動内容を示す。内閣府を中心とした省庁を横断した活動(SIP)や国土交通省から開始した活動などがあったが、5年間の活動の中で統合や情報の共有などが進み、成果を生み出しているものや、インフラメンテナンス国民会議など活動中のものもある。国土交通省においては、2013年から2018年までは大臣官房技術調査課および総合整備局が中心として活動してきた維持管理の技術評価活動の部分に、2018年度から道路局も実務的な取り組みを始めている。それは、2018年度末に近接目視を義務付けた点検が一巡して、その点検活動に対する課題や技術の進展が見えた部分に対して、新たな対策の必要性を感じたものと推察できる。2019年2月に道路橋点検要領の改訂を行い、さらに点検の支援を目的とし「耐荷力や損傷の進展状況などを直接計測し、近接目視を実施せずに健全性の診断が可能となる「計測・モニタリング技術」を公募し、その結果を2020年6月に性能カタログに掲載している。

## 2.2 モニタリングの分類と意味

上記に示したように、維持管理におけるロボットやセンサ技術を適用した技術的革新への活動は、順調に進んでいるように見える。その多くは、計測された変位、加速度、ひずみ、画像などの情報から、従来発見できなかった損傷や異常を「見える化」する技術が進歩していると感じている。それは必要な技術である。しかし、従来は発見できなかった現象に見える化する技術と損傷の有無、大きさによる構造物としての健全性の判断とは異なるものであり、維持管理で必要なものは健全性を判断することであると考えられる。つまり、見える化する技術から健全度を評価する技術へ繋げていくことが重要であり、見える化する技術だけが独自に先行することは精度などの設定において無駄が生じること

表-1 モニタリング技術の種別

モニタリングの考え方	計測対象	計測内容	センサ
ローカルモニタリング  (構造物の部位を対象として、部材、2次部材レベルの局所的損傷の定量的評価方法:技術者による目視点検や非破壊点検の補助)	構造体(主桁、横桁、下部構造)	近接目視代替:ひび割れの進展	カメラ 光ファイバ
		打音検査代替:浮き、剥離	赤外線カメラ AE
		塗装劣化	カメラ
スクリーニングモニタリング  (構造物の部位や全体を対象として、通常と比べて変状が発生していないことを確認する手法)	構造体	構造体の破断、亀裂	加速度計 ひずみ計
	下部構造、法面	洗堀による下部構造の傾斜 法面の滑動	傾斜計 GPS
グローバルモニタリング  (構造物全体の損傷状態に着目し、労力をかけずに低コストで構造物全体の損傷の推定する方法:落橋の回避など安全性の確保)	構造体	腐食やひび割れなどの損傷の進行に伴う構造物の状態変化および耐荷力推定:振動、ひずみ	加速度計 ひずみ計
		腐食やひび割れなどの損傷の進行に伴う構造物の状態変化および耐荷力推定:たわみ	変位計 モアレ
			カメラ

になる可能性もあるように思われる。

技術の発展段階では、見えなかったものを見える化する技術とその技術の精度が、どこまで必要かを判断するための技術が並行して進展する必要がある。従来の見えなかった損傷を見えるようにする技術、構造体の健全度を評価する技術などについて、筆者らはモニタリング技術の種別として表-1にまとめた。

ここではモニタリングを、「橋梁の性能評価を行うために、橋梁の状態や橋梁への作用などの現象に係るデータを時系列的に計測し、得られたデータの分析・評価を行うこと」と位置づけ、そのモニタリングについて「ローカルモニタリング」、「スクリーニングモニタリング」、「グローバルモニタリング」に分類している。

「ローカルモニタリング」とは、「構造物の部位を対象として、部材、2次部材レベルの局所的損傷の定量的評価方法」であり、技術者による目視点検や非破壊検査の補助にもなりうると考えられる。

「グローバルモニタリング」とは、「構造物全体の損傷状態に着目し、労力をかけずに低コストで構造物全体の損傷の推定する方法」であり、落橋の回避など安全性の確保になりうると考えられる。

筆者らは、上記の中間として「スクリーニングモニタリング」といった考え方を提案している。その意味としては、「構造物の部位や全体を対象として、通常と比べて変状が発生していないことを確認する方法」と考えている。

ローカルモニタリングを定期点検など定時的な計測に実施することにより、例えばひび割れの自動計測および進展の評価、剥落の位置および範囲の計測および進展の評価、錆による減肉量の計測など、計測値自体で計測の目的とする評価（損傷の度合い、進行状況）ができる。さらに、この局所的な計測目的の一つとして、剥落などによる第三者被害の防止を図ることも可能であると思われる。

ローカルモニタリングの計測結果を含む点検結果を用いて、過去の経験から劣化状態を推測し補修や通行止めを判断する方法が、一般的な点検方法である。この方法では局所的な損傷の評価により、過去の技術者の経験に基づき、部位の評価点から構造体全体の健全性を点数評価し、補修の有無を判断する判定区分を決定している。判定区分によっては、詳細点検、載荷試験などを実施し、劣化の要因の究明や耐荷力を評価する場合がある。この方法では、専門技術者が劣化評価に対する判断を必要に応じて求め、詳細点検などの費用を投入して初めて、構造物自体に耐荷力、耐久性といった健全性を判断したものになると考えられ、経済的であり、合理的なシステムである。

構造物は、建設時には使用状態、終局状態などにおける構造部材の応力度などに基づく設計を行い、完成されている。完成後は、一部の構造物では設計時に想定した振動特性を確認し、構造物としての妥当性の評価を行っている。よって、構造物の劣化に伴う安全性を評価するには、本来、設計された応力状態や完成時の振動特性などを基本とし、その上で劣化した状態と比較し、安全性を評価するものであると考える。

過去、土木構造物の計測において計測機器は、高価であり、耐久性に劣っていた。そのために、構造物の剛性などの健全性を評価するとなると、大きな費用を必要としていたため、先人の技術者や研究者は表面の損傷から構造状態を評価する方法を数多く研究し、発表してきた。現在、その専門的技術が診断技術の基本として確立している。しかし、2010年ころから半導体技術を適用したMEMSセンサの精度向上と低価格化が急速に進み、かつ日本再興戦略などの国の施策によりセンサメーカーや通信機器メーカーなどは、市場の拡大を期待し開発を進めている。現在では、現場でも使い易く、精度を有し、耐久性を確保した計測センサが開発されつつある。しかし、土木構造物の維持管理における市場性が価格面の課題として残っている。

センサおよび通信機器の使用性、計測精度、耐久性を考え、かつ将来の維持管理の「あるべき姿」を鑑みると、「グローバルモニタリング」といった構造物の耐荷力などを直接計測で推定できる技術を適切に適用することが重要ではないかと考える。

### 2.3 道路維持管理方法の課題

道路の維持管理方法と他の一般的産業の維持管理方法との比較を、表-2に示す。

車検制度などを観察すると、法定点検に関して国が基準を定めて、その基準に沿って資格者が調査、確認を行い、利用者の安全を担保している。医療においても、薬など医師が使うものは国の基準を定め、資格を持った医師がその責任で患者に投与している。鉄道事業は、その事業を行っている民間企業に対して国が鉄道営業法の中で事業認可を行い、それを受けて各鉄道会社が維持管理の要領を制定し、各鉄道会社が認めた資格者がその権限で点検を行っており、その点検結果も責任者を設定し結果を評価している。よって、事故が起こった場合、点検者は資格を有していること、要領などの作業手順を遵守していることであれば、会社は点検方法の不備を指摘はされることはあるが、点検者はその責任を免れることができるのではないかと考える。

道路事業においては、5年に1回近接目視を行うといった法定点検のルールはできた。しかし、その点検における実施内容は、道路局が示している点検要領といった指導書であり、その中には道路管理者の責任で技術内容を設定することが示されている。また、点検者の資格者制度についても、土木施工管理士や橋梁調査会の道路橋点検士などの有効な資格はあるが、点検者に必要な資格を明示して

表-2 技術基準としての課題

項目	車検制度	エレベータ保守管理	鉄道橋保守管理	道路橋保守管理
法律	道路運送車両法	建築基準法 労働安全衛生法	鉄道営業法(認定鉄道事業者制度) 鉄道事業法	道路法改正第42条(H25) 道路法施行令第35条の2第2項
検査/点検の義務	初年度は3年目 以後、2年に一度	年1回(国交省:定期 検査) 年1回(厚労省:性能 検査)	省令に基づく告示で設定2年に 1回 <sup>3)</sup> 「鉄道事業者は実施基準を定 め遵守すること」	省令で設定 <sup>4)</sup> ・5年に1度近接目視 ・結果の記録保管 ・統一尺度で診断結果の分類
検査対象/水準の 設定 検査者の資格制度	国が検査対象を設定 整備事業者 検査場の設定	国交省大臣指定:昇 降機検査資格者 厚労省大臣指定検査 員	鉄道事業者が定める実施基準 等/資格認定制度(資格書の交 付などで設定)	道路局名の道路橋定期点検要 領で技術的助言 点検員の資格(道路橋点検士)
検査結果の認定 認定書の交付/掲 載	運輸支局、検査登録 事務所 検査標章の掲示義務	国交省:検査マークの 配布 厚労省:労働基準監 督署の検査	検査結果は検査責任者が認定 検査結果は鉄道事業者が定め るシステムで検査状態を認定・ 管理	点検結果認定者 認定書(なし)掲示義務(安全性 の掲示なし)
罰則規定	未検査の罰則あり	未検査の罰則あり	実施基準が不適合な場合は認 定の取り消し	未検査の罰則なし

いる法制度はない。さらには、点検結果を評価する責任者を担当している道路管理者の資格も明確に設定していない。つまり、検査を行うことは決まっても、何を検査して、だれがどのような資格で検査をし、結果の安全性をだれがどのような資格で担保しているか、基準として明確でない。国として点検された道路の安全性において各道路管理者において、一定の安全性が担保されていないことになるのではないかと感じる。

道路事業において、点検の内容に関する国の技術基準を細かく決めることは、とても大きな労力が必要となる。しかし、この技術基準を決めた上で、その技術基準に沿って、点検資格者が扱うデータや評価システムを設定し、責任を有する道路管理者が適切な診断結果に沿い適切に安全性を認可することが、国として均一な道路資産の維持が図れるのではないかと感じる。

### 3 モニタリングによる健全度評価技術

#### 3.1 モニタリングによる健全度評価技術の現状

従来の計測データによる健全度評価方法は、例えば、橋梁などの加速度を計測し、そこから各振動モードを推測し、固有振動数、減衰係数などの振動特性を算出する。センサが橋梁全体に設置されている場合には、その振動モードも評価することは可能である。しかし、一般的には、各振動回数におけるモード形状は推測できていない。そのために、FEM 解析などの数値解析にて各振動回数の固有振動数、振動モードを算出し、計測結果が数値解析のどのモードに適しているかを推測する。その上で、計測結果と数値解析結果の固有振動数や振動モードの乖離などから損傷の有無や損傷の場所を想定し、さらに、その損傷をモデル化した数値解析を行い、剛性の変化や部材厚の変化などを定量的な数値として想定する。また、計測を続けて固有振動数、振動モードや減衰係数の変化を把握し、そこから損傷の進展を数値解析により推定する。この従来の方法では、損傷の場所や構造物の劣化に伴う剛性低下を定量的に推定できる利点があるが、下記のいくつかの課題も考えられる。

- ① 大量の加速度データを計測し、通信するために高価なセンサと転送システムが必要となる。
- ② 上記ステップで示したように数値解析が煩雑であり、その部分に大きな費用が生じる。
- ③ 計測データから固有振動数などを評価したり、損傷に敏感な振動モードを評価したりと多くの専門的知識を必要とする。損傷に敏感な振動モードを設定できたとしても、必ずしも全ての観測データに対象振動モードが現れる保証はない。
- ④ 構造物の損傷に伴う固有振動数の変化は微小であり、またゆっくりと進行して行くため、その微妙な変化に着目しなくてはならず、かつ損傷の位置によって、複数の振動モードに着目した観察が必要である。かつ、その変化が小さいために、計測時のノイズや活荷重などの強制振動などによりその変化は埋もれてしまうことがあり、適切にモニタリングできないことが多い。

このような課題を解決するために、いくつかの手法が研究開発されているが、上記の課題をすべて解決する方法の実現には、少し時間がかかるようである。

#### 3.2 多変量自己回帰モデルを使った特徴量抽出による異常検知方法<sup>5,6)</sup>

損傷の状態を剛性の数値評価などで表現するのではなく、構造物の部位や全体を対象として、通常時と比べた状態の変状の発生状況を提示する方法（スクリーニングモニタリング）について示す。この方法は、固有振動数、モード形状や減衰定数などの構造物の振動特性を算出し、それらの変化を調べる従来からの評価方法によらないアプローチである。例えば、振動の位相空間における軌跡形状に着目し、損傷による振動状態の変化に伴う軌跡変化を把握する方法<sup>7)</sup>や、従来の振動状態の入力と出力の関係だけに着目した古典制御の考え方から、入出力関係だけでなく内部状態を捉えた状態方程式による現代制御の考え方をういた方法などがある。ここでは、状態空間モデルに状態方程式のシステム行列を用いた方法について紹介をする。

構造物の運動方程式は一般的に次の式(1)のように示される。

$$m\ddot{\mathbf{w}} + c\dot{\mathbf{w}} + k\mathbf{w} = \mathbf{f} \quad (1)$$

ここで、 $\mathbf{w}$ ,  $\dot{\mathbf{w}}$ ,  $\ddot{\mathbf{w}}$ を構造物の変位、速度、加速度ベクトル、 $\mathbf{f}$ は外力、 $\mathbf{m}$ ,  $\mathbf{c}$ ,  $\mathbf{k}$ はそれぞれ質量、減衰、剛性マトリックスを表す。

上記の運動方程式は、次の式 (2) ように状態方程式として変換できる。

$$\dot{\mathbf{z}} = \mathbf{A}_s \mathbf{z} + \mathbf{f} \quad (2-1)$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{C} \mathbf{z} \quad (2-2)$$

ここに、 $\mathbf{z} = [\mathbf{w} \quad \dot{\mathbf{w}}]^T$ ,  $\dot{\mathbf{z}} = [\dot{\mathbf{w}} \quad \ddot{\mathbf{w}}]^T$ ,  $\mathbf{A}_s = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I} \\ -\mathbf{k}/m & -\mathbf{c}/m \end{bmatrix}$ である。

すなわち、 $\mathbf{z}$ は状態変数ベクトルを、 $\mathbf{y}$ は観測（出力）ベクトルを表す。 $\mathbf{A}_s$ は状態空間におけるシステムの特性を表す行列でシステム行列と呼ぶ。 $\mathbf{C}$ は観測とシステムの状態を関連つける係数行列で、観測点をそのままシステムの状態とみなす場合は単位行列になる。

上記の状態方程式は、式 (3) のように離散化し観測情報による多変量自己回帰モデルで表現できると知られている<sup>8)</sup>。

$$\mathbf{y}(k) = \sum_{i=1}^n \mathbf{A}_i \mathbf{y}(k-i) + \mathbf{e}(k) \quad (3)$$

この状態方程式の行列 $\mathbf{A}_i$ の各要素は、当然ながら剛性 $\mathbf{k}$ 、減衰係数 $\mathbf{c}$ および質量 $\mathbf{m}$ の構造物の物理量を含んでいる。言い換えれば構造物の振動に関する情報が内在している。よって、行列 $\mathbf{A}_i$ の情報をまるごと用いることで、振動モードを選択することなく、振動のほぼすべての情報を用い構造物の状態を表現することができる。つまり、行列 $\mathbf{A}_i$ の変化を捉えることが構造状態の正確な変状を捉えること

となる。行列 $\mathbf{A}_i$ の成分を $a_{ll}$ とすると、 $\mathbf{A}_i = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{l1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{1l} & \cdots & a_{ll} \end{bmatrix}$ 。  $l$ 個のセンサによる計測された加速度の時

系列から  $n$  次の自己回帰モデルを構築し、行列式で表現すると式 (4) になる。

$$\mathbf{Y}_f = \mathbf{A} \mathbf{Y}_p + \mathbf{E} \quad (4)$$

式 (4) の行列 $\mathbf{A} (= [\mathbf{A}_1 \quad \cdots \quad \mathbf{A}_n]) = \left[ \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{l1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{1l} & \cdots & a_{ll} \end{bmatrix}_1 \quad \cdots \quad \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{l1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{1l} & \cdots & a_{ll} \end{bmatrix}_n \right]$ の次元は  $ll \times n$  になる。

また、第2項 $\mathbf{E}$ には不確定性に起因する誤差を含むことになる。 $\mathbf{Y}_f$ は予測状態を、 $\mathbf{Y}_p$ は過去の状態を表す。結局、多数のセンサ情報からシステム行列の $\mathbf{A}$ を推定し、その変化を捉え橋梁の異常を検知することができる。式 (4) には不確定性を含むことから、システム行列の $\mathbf{A}$ の確率分布を推定し、意思決定に用いるのと辻褄が合う。それで、ベイズ推定によるシステム行列の $\mathbf{A}$ の確率分布を推定し異常検知に用いている。図-3に行列の表現する内容について示す。

さらに、図-3のように、ベイズ推定を用いて評価値に分散を与えているために、平均値のわずかな変化のみならず分散の状況により数値の確からしさを示し、損傷状態の変化を示すことができると考えている。

また、従来、このような振動状態を評価する場合に数分間の加速度データを用いることが必要であったために、大きな通信量が必要であった。しかし、本手法では場合、必要な情報は行列 $\mathbf{A}$ の値だけであるため、計測機内でのエッジ処理により、行列 $\mathbf{A}$ を求め、小さなデータにすることにより特定小電力無線 (LPWA : Low Power, Wide Area) などの安価な先端技術の利用が可能となり、図-4に示すように管理コストにおいて利点があると考えられる。

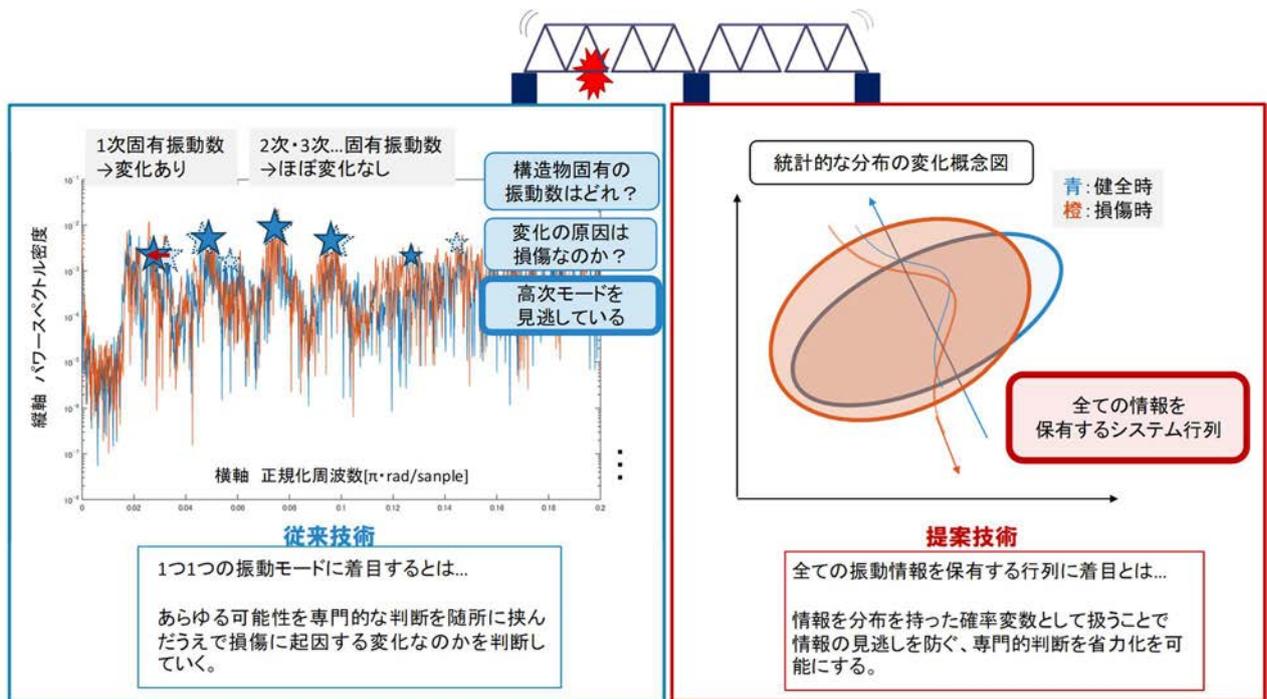


図-3 行列 A の説明図

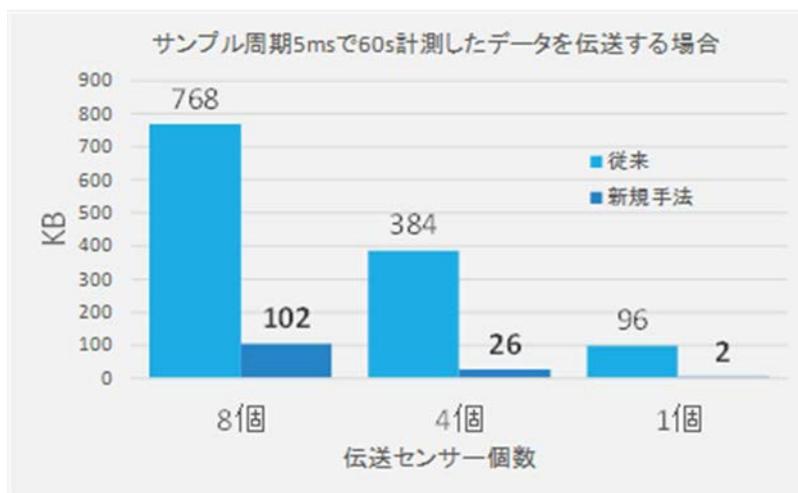


図-4 通信関係の効率化

以上の手法を使って異常値の判断をした結果を、図-5、図-6 に示す。この場合の異常値の評価においては、計測値が健全状態に近いのか、それとも異常な状態に近いのかを異常判断指標  $B$  で表現したもので、健全状態であれば  $B$  の値は 0 またはそれ以下となり、異常は発生し、健全状態と乖離が大きくなると  $B$  の値が大きくなる。

図-5 は撤去する鋼橋において、支点のソールプレート前面の下フランジを切断したものを DMG1、さらにそこから腹板へ亀裂を模したものを DMG2 とした。図-6 も撤去を予定している PC 橋梁において、破壊試験時の振動データにより異常判断指標  $B$  を示したものである。

図-5、6 とともに、従来の固有振動数の数値を読み取るよりは、明確に異常を検知できていると考えられる。

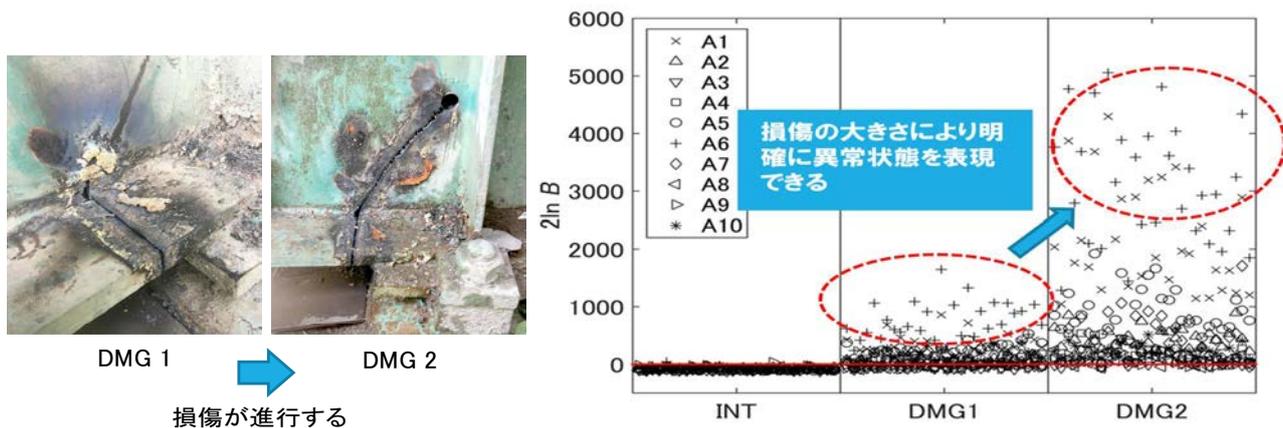


図-5 鋼橋における異常値検知結果

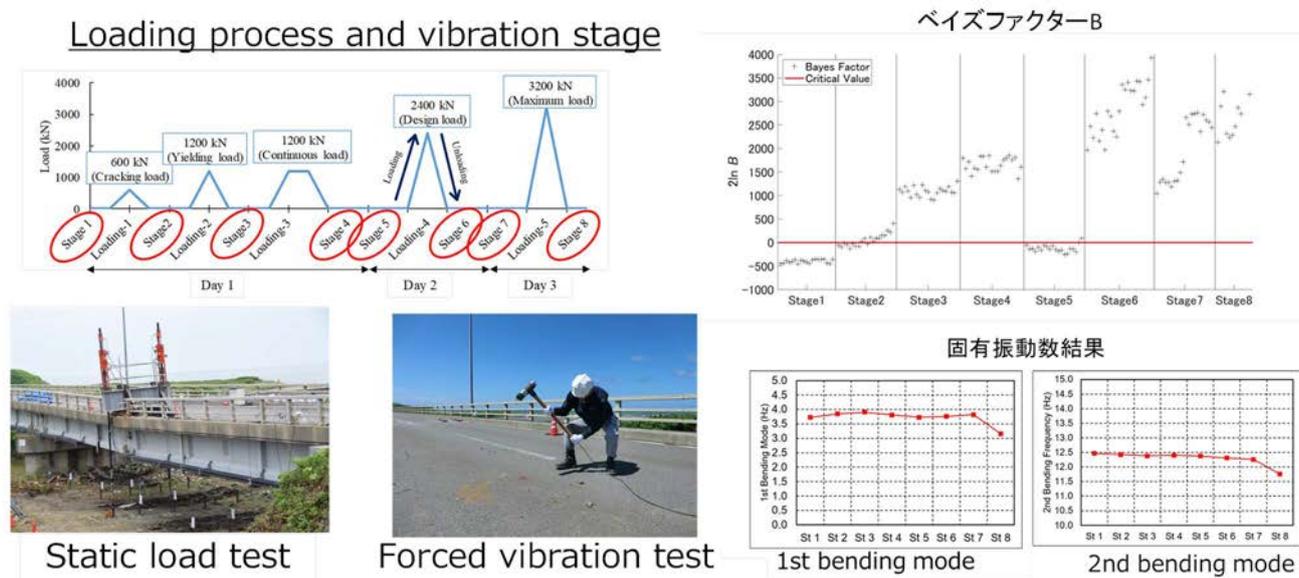


図-6 PC 橋梁における異常値検知結果

#### 4. まとめ

高度成長期に建設した構造物が完成後 50 年を迎え、徐々に劣化が顕在化し始めている。その中で構造物のモニタリングを行うことは、構造物の定量的な耐荷力や耐久性を知り、損傷の症状から、補修をしないことも含めた適切な対処方法を講じること、さらには地域の構造物の中で更新をすべき構造物の優先度をつけ、その結果、地域としての更新費の平準化を図ることができる方法であると思われる。

また、モニタリングを行うことは、つまり、構造物の耐荷力や耐久性を解りつつ供用を続けていくことであり、よって構造物を適切に使切ることを目的としていると思う。先人が工夫をして、かつ大きな投資をして作ってきたストックを、補修をしながらしっかりと適切に使切る。その上で最後に架け替える。架け替える時期は 100 年後かもしれない。100 年後の新しいモータリゼーションの発達の中で、使い続けた構造物をさらに有効に使っていくように、適切に耐荷力や耐久性を定量的に評価していくデータを新たな維持管理に継続していくことが、現在の重要な課題ではないかと感じている。最後に、本考察にあたっては京都大学経営管理大学院の玉越隆史特定教授に貴重なご助言を伺いました。紙面をお借りして感謝いたします。

## 参考文献

- 1) 内閣府, 第5期科学技術基本計画, 総合科学技術・イノベーション会議, 2016. 1. 22.
- 2) トヨタ, ウーブン・シティ計画, CES2020, 2020. 1. 7.
- 3) 鉄道に関する技術上の基準を定める省令第90条に基づき, 施設及び車両の定期検査に関する告示(国土交通省告示第1786号)の第2条より.
- 4) 道路法施行規則の一部改正する省令(道路法施行規則建設省令第25号).
- 5) 金哲佑, その他: 多径間連続鋼トラス橋の交通振動を用いた損傷検知手法, 土木学会論文集A 1, Vol.69, No.3, pp.557-571, 2013. 11.
- 6) 五井良直, 金哲佑: 橋梁振動の多変量自己回帰モデルのベイズ推論に基づく異常検知, 材料, Vol.67, No.2, pp.143-150, Feb. 2018.
- 7) P. TUTTIPONGSAWAT, et al.: Change of phase space topology due to tendon damages of a prestressed concrete girder, 土木学会第73回年次学術講演会 CS2-013, pp.25-26, 平成30年8月.
- 8) C.W. KIM et al.: Modal parameter identification of short span bridges under a moving vehicle by means of multivariate AR model, *Structure and Infrastructure Eng.*, Vol.8, No.5, pp. 459-472, 2012.