

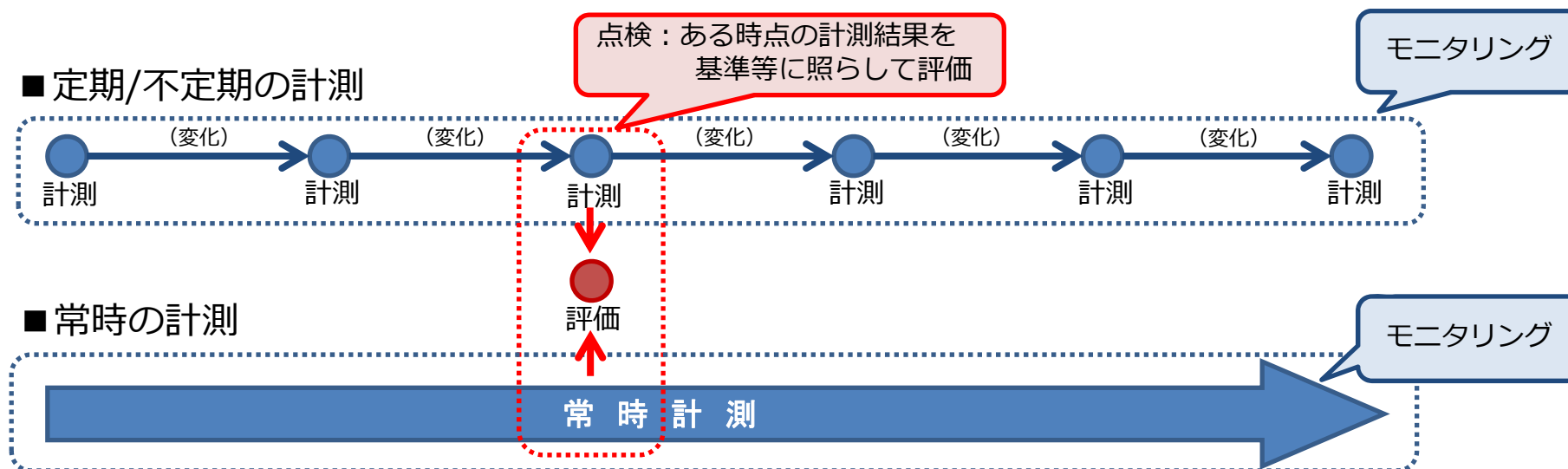
# モニタリング技術に関する 海外事例について

## <モニタリング技術>

- 構造物等の状況を常時もしくは複数回（常時/定期/不定期、最低2時点）で計測し、状態の変化を客観的に把握する技術

## <点検技術>

- 構造物の状況のある時間断面（定期点検等）で計測し、基準等に照らして評価する技術



## 時間の経過

(参考) 広辞苑での意味

点 検 : 一つ一つ検査すること。

⇒検査：基準に照らして、適不適や異状・不正の有無などをしらべること。

モニタリング： 観測・調査・分析すること。

⇒観測：自然現象の推移・変化を観察・測定すること

⇒調査：ある事項を明確にするためにしらべること。

⇒分析：ある物事を分解して、それを成立させている成分・要素・側面を明らかにすること。

### ●モニタリングを行う目的（管理ニーズ）

維持管理のニーズ

- ・維持管理の高度化による安全性・信頼性の向上
- ・維持管理の効率化によるコストの縮減・平準化

モニタリングに期待される役割  
(評価の材料となる計測データの提供)

(平常時)	点検	・劣化損傷の原因となる事象の監視 ・詳細点検が必要なインフラや箇所抽出・絞り込み
	補修等	・劣化損傷の発見、劣化損傷箇所の特定 ・発見・特定した劣化損傷の進行状況の監視 ・補修補強効果の確認
(非常時)		・地震等の災害発生時における迅速な変状把握

### ●モニタリング技術に求められるもの

- ・ 目的に応じた計測内容、箇所、頻度、精度、信頼性
- ・ 計測内容等に見合ったセンサ等の機器、システム
- ・ 現場に適用可能な経済性、操作性、耐久性
- ・ 計測データ等と劣化・損傷・修繕等との合理的関連性

### 3. モニタリング技術に現場適用にあたって備わらべき要件

4

第1回資料5・p.4

- トータルコストの縮減・平準化の達成に見合ったコストで実現できること

⇒システムの導入・維持コストと人件費がかかるものは適用困難

- 劣化損傷等の把握すべき事象に見合った精度・信頼性を有すること

⇒高すぎれば無駄、低すぎれば無意味

- 劣化メカニズム等の技術的な知見レベルに整合していること

⇒劣化損傷等を説明できない技術は適用困難

- 供用中の様々な環境下において性能を維持できること

⇒安定的に動作しなければ社会資本分野では適用困難

- 社会インフラの寿命や点検サイクル等に見合った期間、性能を維持できること

⇒システムの寿命が著しく短い場合は適用困難

- 大量の計測データ等を効率的に収集・処理・分析し、維持管理に活用できること

⇒データの処理・分析にかかる負担が大きいと適用困難

- 建設・供用開始後でも設置・データ取得が可能であること

# 4. モニタリング技術に関する現場ニーズの概要

維持管理のニーズ  
(第1回資料5・P3注1)

場面例	通常点検（巡回）、維持	定期・中間・特定点検	詳細点検	追跡調査	応急措置、補修・補強後	異常時点検
モニタリングに期待される役割 (第1回資料5・P3注1)	劣化損傷等の原因となる事象の監視	詳細点検が必要なインフラや箇所の抽出・絞り込み	劣化損傷等の診断	発見・特定した劣化損傷等の進行状況の監視	補修補強効果等の確認	地震等の災害発生時における迅速な変状把握
対象（想定）	全て	全て	損傷確認箇所	劣化や損傷が進行している箇所	事前対策・補修・補強が必要な箇所	全数～災害発生箇所

主として高度化による  
安全性・信頼性の向上

目視できない重要部位の確認	注2					
目視では捉えられない有用情報の確認 (例) ... 定量的に遠隔地から (例) ... 適時に	①重要箇所は巡回時に異常を発見したい。	③目視による把握が困難な事象を定量的に把握したい。	④経年的な劣化等の進行状況を把握したい。 ※構造物の年齢把握を含む	(非破壊検査技術など点検技術の高度化で対応)	⑦目視による把握が困難な事象の進行を把握したい。	⑧損傷の進行等を遠隔地から確認したい。
					⑨補修・補強の効果及び手法の妥当性を把握したい。	⑩補修による把握が困難な事象を定量的に把握したい。【再掲】

■ 高度化に関するニーズ  
■ 効率化・合理化に関するニーズ

主として  
効率化によるコストの縮減・平準化

現状の水準を維持しつつ 現状作業の効率化・合理化 (例) ... 低コストで (例) ... 人手を掛けずに (例) ... 社会的影響を少なく	②十分に巡回できない場合でも最小限の確認をしたい。	⑤高所作業車・船舶等を利用することなく安価に把握したい。	⑥広い・長い・多い施設の点検作業時間を削減したい。 ※規制時間の最小化を含む		⑨損傷の進行等を効率的に確認したい。	⑩規制等の措置を講ずる必要性を明確化したい。
					⑪高所作業車・船舶等を利用することなく安価に把握したい。【再掲】	⑫広い・長い・多い施設の点検作業時間を削減したい。【再掲】 ※規制時間の最小化を含む
						⑬異常の可能性が高い箇所を効率的に抽出したい。 ※利用者への注意喚起を含む

注1：第1回資料から一部内容を修正 注2：主としてニーズがあると考えられる場面を記載

- ❖ 1967年：オハイオ州のシルバー橋崩壊
  - ⇒ ラッシュ時に発生したことにより、46人が死亡する事故となった
  - ⇒ この事故をきっかけに、橋梁の定期的な点検の実施の重要性が認識された
  
- ❖ 1971年：全国橋梁点検基準（NBIS）制定
  - ⇒ この基準に基づき道路橋の点検が2年に1度実施
  
  - ⇒ 主として目視を基にした点検データをもとに、橋梁マネジメントシステムで橋梁の健全度データを管理しており、補強・補修の意思決定に役立てられている
  
  - ⇒ FHWAの研究結果として、目視点検の重要性は軽視できないものの、技術者による結果のばらつきが課題であることが指摘。  
(FHWA発行のPublic Roads, March/April 2001 Vol. 64・No. 5、November/December 2000 March/April 2001 Vol. 64・No. 3 より)  
<http://www.fhwa.dot.gov/publications/publicroads/01marapr/bridge.cfm>  
<http://www.fhwa.dot.gov/publications/publicroads/00nov/bridge.cfm>
  
- ❖ 長期観測による、橋梁の性能を定量的に把握するLTBPP;Long-Term Bridge Performance Program（長期橋梁性能プログラム）が2006年から20年間の研究開発プロジェクトとして発足
  
- ❖ 2007年のミネソタ州の落橋事故発生

### LTBPP; Long-Term Bridge Performance Program

- ❖ 全国の橋梁のうち、代表的なサンプルについて情報（詳細点検結果とモニタリングデータ）を収集し、データベース化
- ❖ 高品質で定量的な性能データを長期間にわたり（最低20年）管理する  
<目的>
  - 劣化モデルおよび予測モデルに用いる
  - 設計手法の向上、補修・補強法方法の検討
  - ライフサイクルコストの分析
  - 次世代橋梁マネジメントシステムの開発
- ❖ 橋梁の性能に係る要因を4つに分類し定量評価
  - 構造的安全性・安定性（ex.供用年数）
  - 耐久性・耐用性
  - 機能性（利用者の安全性・利便性）
  - コスト（管理・利用コスト）

<http://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/ltbp/13051/13051.pdf>



Figure 2. Illustration. Main Categories of Bridge Performance Issues.

- ❖ LTBPプログラムは「Development Phase」を経て、現在「Long-Term Data Collection Phase」に移行中(2013年3月～)。



## 米国の研究開発プログラム：NIST※のTIP；Technology Innovation Program

※NIST( National Institute of Standard and Technology : 国立標準技術研究所)

### 背景・目的

- ❖ NISTによるTIPは産業界や各種研究機関等の支援の下設立され、国の重要な研究分野における、ハイリスク・ハイリターンな技術革新を推進することを目的に設立

### インフラ分野の技術募集

・・・TIPの最初の公募はインフラ分野から開始

2008年:インフラ技術の募集(高度センシング技術：道路・高速道路・橋梁・水システム分野)→応募数46のうち9つが選定

2009年:インフラ第二次募集(高度修繕材料技術とセンシング技術：水システム、ダム、堤防、橋梁、道路・高速道路)

→応募数50のうち8つが選定

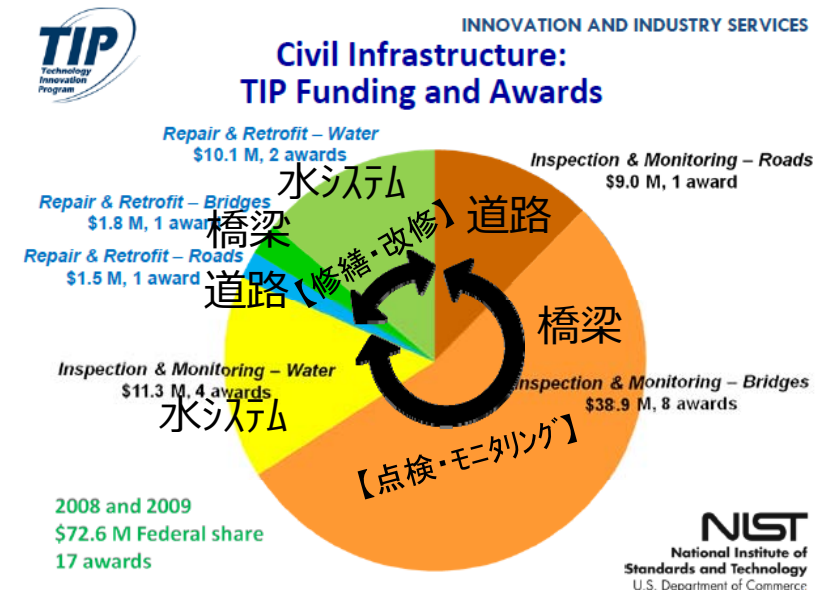
:製造業関連技術の募集

2010年:製造業関連技術の第二次募集

2011年:募集なし

### TIPの停止・終了経緯

- ❖ 2012年度TIPプログラムのための予算が得られなかった。
- ❖ TIPは各プログラムは終了に向かっているが、プロジェクトの選定時に、全資金を供給された進行中のプロジェクトは継続





❖ 以下の施設を対象としたモニタリング技術の海外事例を調査し、モニタリング技術に関する現場適用に係る課題等を整理

**橋梁**   **路面**   **斜面(法面)**   **管路**   **鉄道・地下鉄**   等

分野	事例名称	設置/移動	国
橋梁	Weigh-in-motionを用いた橋梁モニタリング	設置	アメリカ
橋梁	新I-35W橋(St Anthony Falls Bridge)のヘルスマニタリングシステム	設置	アメリカ
橋梁	インフラ劣化防止のためのコンピューターネットワークによる無線監視システム	設置	アメリカ
橋梁	アラスカ港アクセス道路における地震応答に係るモニタリング	設置	アメリカ
橋梁	ビンセント・トーマス橋の加速度計による振動特性把握	設置	アメリカ
橋梁	ParkView橋の架け替え工事後の常時モニタリング	設置	アメリカ
橋梁	センサを利用した洗掘のモニタリング	設置	アメリカ
橋梁	Jindo橋のワイヤレス スマートセンサネットワークによるモニタリング	設置	韓国
路面	スマートフォンアプリケーションを利用した道路路面性状評価	移動	スウェーデン他
路面	自動車搭載型の橋梁・道路の状態観測・評価システム	移動	アメリカ
路面	レーザーを利用した道路路面のプロファイリング計測	移動	アメリカ・カナダ
斜面	衛星やトータルステーションを利用した岩盤すべりのモニタリング	設置	ノルウェー
埋設管	光ファイバを使った温度モニタリングによるパイプラインの漏出検出	設置	ドイツ
水道管路	水道インフラ災害を予防および緩和するための次世代SCADA	設置	アメリカ
鉄道	鉄道架線のリアルタイムモニタリングシステム	設置	韓国
地下鉄	ロンドン地下鉄の老朽化把握の為のセンサネットワーク	設置	イギリス

## 関連事例

## Weigh-in-motionを用いた橋梁モニタリング

対象構造物	橋梁（舗装・床版等）	計測内容	車両総重量、軸重、速度、車種等、亀裂等
国	アメリカ	移動/設置	設置型
背景・目的	<ul style="list-style-type: none"> <li>効率の良い過積載車両の取締り及び橋梁の損傷度合のモニタリングを通じた橋梁の適切な維持・修繕を実現することを目的に実施。</li> <li>橋梁の損傷度合を正確に把握し既存インフラの維持・修繕に役立てることを目的として実施。</li> </ul>		

## モニタリング技術活用イメージ

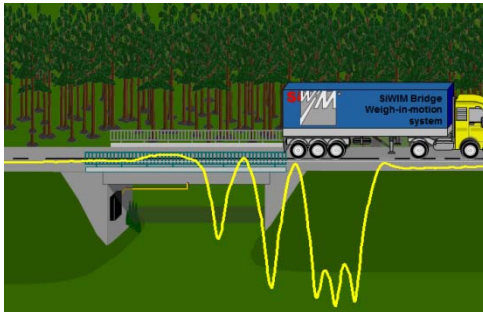


図-1: B-WIMシステム



図-2: 橋梁の下部に取り付けられたB-WIMシステム

[http://ntl.bts.gov/lib/45000/45400/45495/07212\\_Final\\_Report.pdf](http://ntl.bts.gov/lib/45000/45400/45495/07212_Final_Report.pdf)  
<http://www.nctspm.gatech.edu/field-validation-drive-by-bridge>

- 車両総重量、軸重、速度、車種、温度等のデータを取得すると同時に、超音波を利用した非破壊検査技術も組み込まれている（橋梁内部の損傷の有無等）

- この研究におけるB-WIMシステムはスロベニアで開発されたシステムで、通過車両の総重量、軸重、速度、車種、温度等を取得することが可能
- 図-1及び図-2に示す通り、システムは橋梁の下部に取り付けられる
- 道路を閉鎖することなく設置することが可能
- 同システムは、ポータブルで取り外しが容易
- アラバマ州における試験では重量計測結果について他の計測機器（ベンディングプレート型）と比較しても同等の精度となった
- キャリブレーションを5軸のトラックに照準をあてて実施していたため3軸トラックの重量については5軸トラックに比べて良くなかった。
- 計測条件は短いスパンの橋梁で、舗道に凹凸がなく、加速・減速がされにくい位置にあるものが望ましいとされている。
- アラバマ州の実験では、静止重量に対して±10~15%程度の精度であり、ヨーロッパのWIMの運用基準では、重量車両に係る取締等への利活用には適さないことが分かった。

→供用中の橋梁に取り付けることが可能（取り外し可能）。

→重量貨物車両の識別等の運用に耐えうる精度はないが、老朽化要因となる重量車両の走行状況把握には利用できる可能性あり。

## 新I-35W橋 (St Anthony Falls Bridge)のヘルスマニタリングシステム

対象構造物	橋梁	計測内容	加速度、温度、ひずみ、腐食、湿度、温度、位置等
国	アメリカ	移動/設置	設置型
背景・目的	2007年に発生したI-35W橋の落橋事故の後に架け替えられた新橋は施工中の安全性や供用後の安全性を示す必要があった。		

### モニタリング技術活用イメージ



光ファイバセンサ

Long-gauge SOFO fiber optic sensor



振動弦式ひずみ計

Vibrating Wire Strain Gauge

コンクリート腐食  
湿度計

Concrete corrosion and Humidity sensors



加速度計

Accelerometer



データロガ

SOFO Fiber Optic Sensor Datalogger



振動弦式ひずみ計

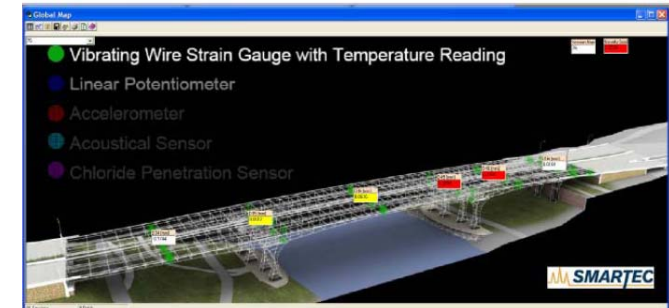
Vibrating wire and temperature sensors datalogger

<http://www.roctest-group.com/sites/default/files/bibliography/pdf/c202.pdf>

JACIC情報 97号 p.15-20 (欧州の橋梁モニタリングの現状について)

- 2007年に落橋下I-35w橋は鋼トラス橋、架け替え後の橋梁はプレキャストコンクリート桁橋
- 橋梁性能や経年劣化に関連する多様な指標を計測するための多くのセンサーを設置した
  - 振動弦式ひずみ計
  - 加速度計
  - コンクリート湿度および腐食センサ
  - ロングゲージSOFO光ファイバセンサ(ひずみ等)
  - リニアポテンシオメータ(直線上の位置検出)
  - サーミスタ(温度計測)

- 施工時からモニタリングを実施
- 計測結果のリアルタイム情報や事前に定義した警告レベルに応じたカラーで表示

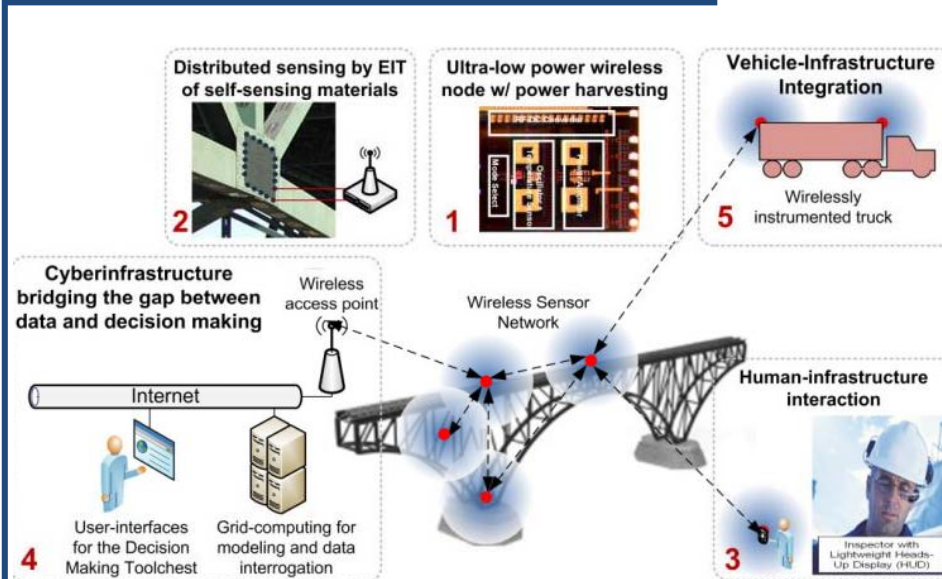


→多様なセンサの利用による橋梁の挙動把握は可能。将来的な劣化予測は今後の課題

## インフラ劣化防止のためのコンピューターネットワークによる無線監視システム

対象構造物	橋梁	計測内容	車両動態情報、材料の状態 等
国	アメリカ	移動/設置	設置型
背景・目的	点検等の運用を効率化して、専門家以外の管理者が点検結果や観測データから状況把握を容易にできる必要があった。		

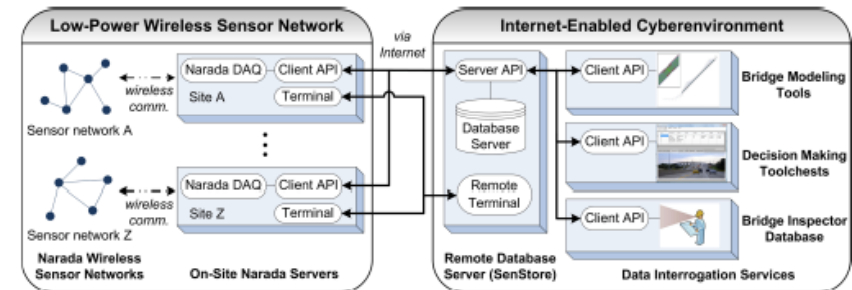
### モニタリング技術活用イメージ



<http://www.scsolutions.com/bridge-health-monitoring-cyber-enabled-wireless-monitoring-systems-protection-deteriorating-national>

・実験はNew Carquines Suspension Bridgeにて実施

- スマート材料※を部品に使ったセンサーを利用  
※材料自体が外部刺激の検出や劣化診断などのセンサー機能や自己修復機能などを持つ機能性材料
- 環境発電(振動を利用)や、超省電力のワイヤレスセンサノードで構成
- 車内のモバイルセンサで車両の動きを得て、橋梁を通過した際にその情報を取得する仕組みを開発
- 個々の構造物のみならず、地域全体での情報の統合を行うことを目的としている
- 技術者以外の利用者でも、分析結果をもとに意思決定を行うための支援技術ツールを提案した(本システムはTIP選定プロジェクト)



[http://structure.stanford.edu/workshop/documents/Keynote%20presentations/IWSHM%202011%20Keynote\\_Felix%20Wu.pdf](http://structure.stanford.edu/workshop/documents/Keynote%20presentations/IWSHM%202011%20Keynote_Felix%20Wu.pdf)

→環境発電等について考慮がなされるなど先端技術が利用されている。



## アラスカ港アクセス道路における地震応答に係るモニタリング

対象構造物	橋梁	計測内容	ひずみ、加速度
国	アメリカ	移動/設置	設置型
背景・目的	アラスカ港へのアクセス道路はアラスカ物流を担う重要施設であり、アラスカ州の中南部は地震が多く、橋梁の振動特性や凍結地盤における動態把握を行うことが必要となった。		

## モニタリング技術活用イメージ



図1: 対象橋梁

- 主なモニタリング装置は1軸、2軸、3軸の加速度計
- センサの計測結果はバッテリー駆動によるデータ記録装置で記録
- モニタリングデータは電話回線によりアラスカ・アンカレジ大学に送信
- 2004年11月1日から2005年12月31日にかけて、マグニチュード3.5~5.5の21の地震と列車による振動が観測
- 凍結深さの増大と固有周波数の減少に関係が見られること等の結果を得た

- Primary reason for the change: the seasonally frozen ground.
- Implication to engineering design
  - Design load
  - Failure mode of foundation system

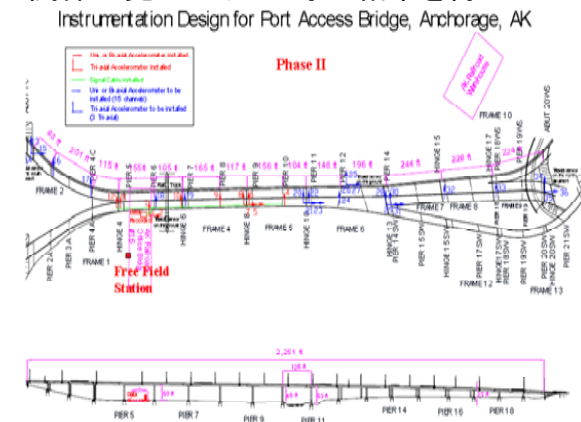
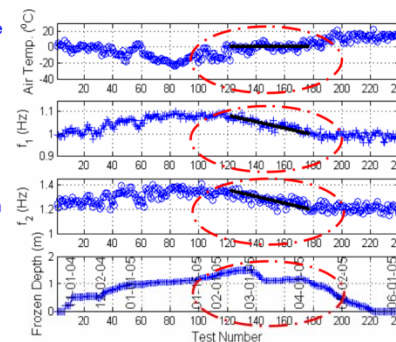


図-2: モニタリング装置の配置計画

[http://seismic.alaska.gov/download/ashsc\\_meetings\\_minutes/2006\\_12\\_05\\_Yan\\_g\\_MonitoringPortAccessViaductAnc.pdf](http://seismic.alaska.gov/download/ashsc_meetings_minutes/2006_12_05_Yan_g_MonitoringPortAccessViaductAnc.pdf)

→極寒地での基礎地盤凍結箇所において、地震に対する応答変化が確認された。  
→設計方法や解析方法の確立には至っておらず。

## ビンセント・トーマス橋の加速度計による振動特性把握

対象構造物	橋梁	計測内容	加速度
国	アメリカ	移動/設置	設置型
背景・目的	ロサンゼルスにあるビンセントトーマス橋は、1963年供用の古い吊り橋である。交通網の動脈にあり、地震活動な活発な南カリフォルニア地域の断層帯にまたがる危険な箇所にあることから、地震による構造物への影響を把握することが求められた。		

### モニタリング技術活用イメージ

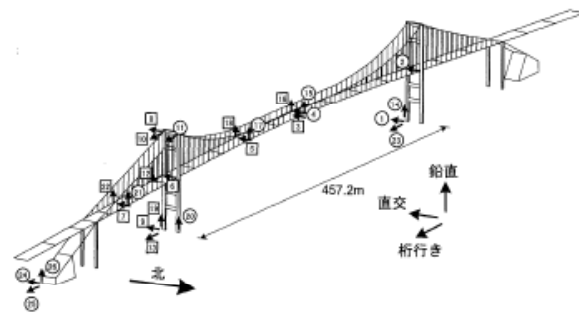


図-9 Vincent Thomas Bridge

図1: 対象橋梁

- 1987年のWhittier地震や1994年のNorthridge地震も観測されておりそれらの構造物への応答特性をベースに各種のモデルが構築されている
- 1995年よりデジタルでのモニタリングが可能なシステムが導入されている
- 26個の加速度センサが常設され、長期のヘルスマニタリングに利用されている
- テストベットとして複数のプロジェクトに用いられている
- 橋梁の下を管が通っていることから、水道システムのモニタリングの試験対象構造物としても利用されている



[https://www.jstage.jst.go.jp/article/coj1975/44/5/44\\_102/\\_pdf](https://www.jstage.jst.go.jp/article/coj1975/44/5/44_102/_pdf)

<http://www.ece.uci.edu/~chou/sss13.pdf>

→長期に渡るデータ蓄積がされており、振動等に対する挙動については観測されている。



## ParkView橋の架け替え工事後の常時モニタリング

対象構造物	橋梁	計測内容	ひずみ
国	アメリカ	移動/設置	設置型
背景・目的	ミシガン州の老朽化したParkview Bridgeの架け替え工事に伴い、橋梁供用後の影響把握や、供用後の維持管理の参考とすることを目的に架け替え後に常時モニタリングを実施。		

## モニタリング技術活用イメージ



図1: ParkViewBridge

[http://www.michigan.gov/documents/mdot/MDOT\\_Research\\_Report\\_RC1536\\_317702\\_7.pdf](http://www.michigan.gov/documents/mdot/MDOT_Research_Report_RC1536_317702_7.pdf)

[http://www.zuj.edu.jo/conferences/icit11/paperlist/Papers/Information%20Systems/503\\_osama.pdf](http://www.zuj.edu.jo/conferences/icit11/paperlist/Papers/Information%20Systems/503_osama.pdf)

- 橋梁建設の工期短縮のため、現場外で製作した主部材を運搬し、現場で組み立て・架設を実施したミシガン州初の橋梁
- 建設:2008年4月7日開始、供用:2008年9月8日
- 4スパン、3車線のプレキャストRC床版

## &lt;機器構成&gt;

- 振動ワイヤーひずみゲージ(床版パネルに導入)(184台)
- データロガー(2台)
- 通信ソフトウェアを導入したコンピューターワークステーションを遠隔地(研究所)に設置。

- 184台のセンサは計測対象を4つのグループに分け橋梁性能を監視

(縦断方向の応力、/横断方向の応力/パネル間のジョイント応力/南北のパネル間の場所うち部分の両側の応力)

- モニタリング結果から、荷重と温度によって応力は大きく変化することが分かった

## &lt;今後の課題&gt;

- 橋の動態、環境条件等の多様なパターンのデータを蓄積し、床版の状態を定期的に把握・記録することが必要
- 橋梁は48枚のプレキャストコンクリートパネルからなる特徴的な橋梁であるため、橋梁のモデルを構築するのに蓄積データをもとにキャリブレーションしていく必要がある
- データ蓄積を継続し、エラーデータを抽出できるようなアルゴリズム開発が必要

→データ蓄積中。様々な課題有り。

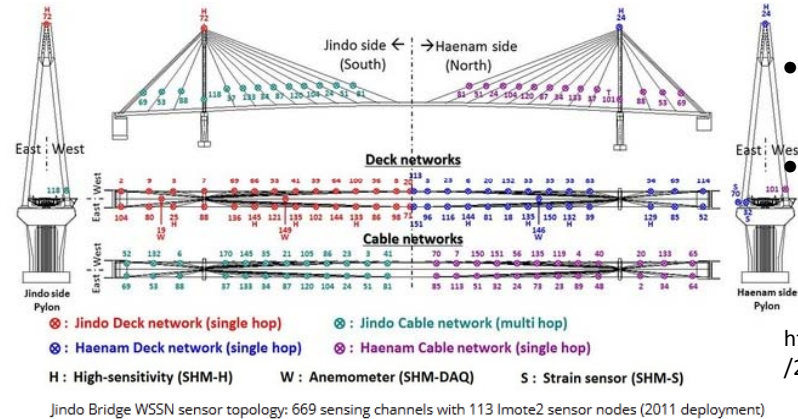
## Jindo橋のワイレス スマートセンサネットワークによるモニタリング

対象構造物	橋梁	計測内容	加速度、温度、湿度、風速 等
国	韓国	移動/設置	設置型
背景・目的	構造物を効果的に監視するには密にセンサを配置する必要があり、有線システムの場合高額となる傾向にあった。そこで、低コストで、モジュール化しやすいシステムが必要とされた。		

### モニタリング技術活用イメージ



図1: jindo橋



<http://smartstructure.weebly.com/jindo-bridge.html>

<http://www-smartinfrasturcture.eng.cam.ac.uk/20130118CSICSeminarProfBillSpencerpresentation.pdf>

- 米国のイリノイ大学と、韓国のKAISTと、日本の東大の共同研究によりスマートセンサ“Imote2”を用いた橋梁モニタリングを実施
- イリノイ大学のillinois SHM projectによる、カスタマイズ可能なオープンソースソフトウェアを用いたツールを利用
- 韓国のjindo橋(斜長橋)をテストベッドとしてモニタリングを実施
- 2009年の開始時には70台のセンサから始めて、2010年から2012年の間に、669の観測チャンネルを持つ113台のセンサを設置した
- センサは床版と、ケーブルに設置し、すべてのセンサは太陽発電により給電

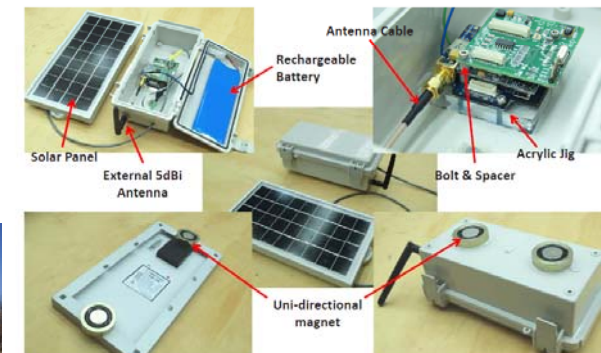
- 2010年9月の台風の時にも観測し、強風に対する橋梁の動態把握を行った

韓国では、Hwamyung橋(斜張橋)でも“imote2”を用いたモニタリングを実施している

<http://downloads.hindawi.com/journals/ijdsn/2013/804516.pdf>



#### Imote2 Sensor Enclosure



→橋梁全体に多様なセンサを配置することで、橋梁全体の挙動把握が可能。  
→ソーラ発電を用いており電池交換等の作業が不要で長期観測に適する

## センサを利用した洗掘モニタリング

対象構造物	橋梁	計測内容	距離（ソナーによる川底までの距離）
国	アメリカ	移動/設置	設置型
背景・目的	構造物の洗掘状況を簡易且つ効率的に把握することを目的にセンサーを活用したモニタリングが実施された。		

## モニタリング技術活用イメージ

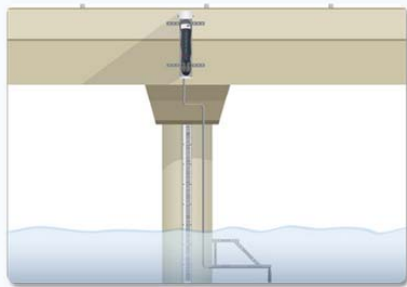


図1: 取付けイメージ図



図2: データ蓄積装置



図3: 地図上へのリアルタイム表示

### <システム概要>

- Bridge Scour Monitoring (NEXSENSE)は、橋梁に取り付ける形式の洗掘モニタリング
- データ貯蓄部分を橋梁上部に、センサを水中に取り付け、レーザー装置を橋梁上部に取り付けることによりデータを蓄積
- ソナーにより、常に川底あるいは海底までの距離をモニタリングし、リアルタイムでデータが供給
- データ蓄積装置は6インチ(約17cm)と小型であり、Wi-Fiや衛星電話回線を用いてデータ通信が可能
- 電源はソーラー、バッテリー、ACの組み合わせにより運用
- 既設構造物への取付けが可能

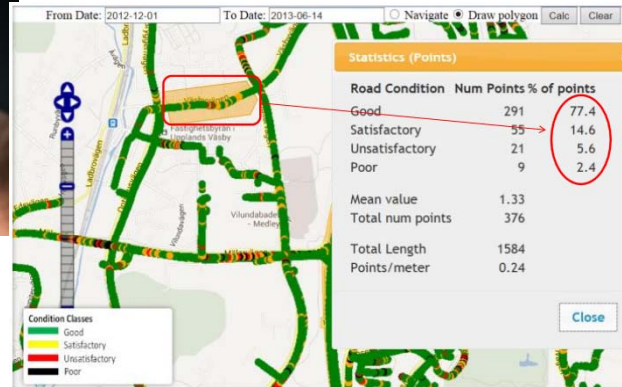
[http://www.nexsens.com/systems/bridge\\_scour\\_monitoring](http://www.nexsens.com/systems/bridge_scour_monitoring)

→供用中の構造物に取り付けることが可能(取り外し可能)。  
→洗掘が起きやすい箇所や重要構造物の監視が期待できる。

## スマートフォンアプリケーションを利用した道路路面性状評価

対象構造物	路面	計測内容	路面平坦性
国	スウェーデン他	移動/設置	移動型
背景・目的	日常の巡回時に車両に乗りながら、道路の状況を効率的に把握することが必要とされた。		

## モニタリング技術活用イメージ



- アプリを起動し自動車に取り付けることで自動的に路面の平坦性に関するデータ(IRI: 国際ラフネス指標)を収集できる
- 収集したデータと走行経路を対応づけて地図上マッピングすることができる

<http://www.roadroid.com/common/References/IRF%202013%20Final%20Paper.pdf>

「Roadroid」は、スマートフォン(Android)アプリケーションを利用した道路状態評価方法

→通常点検時に併せて利用可能。

→IRIの計測精度は高いとはいえないものの、定量的に把握可能。



## 自動車搭載型の橋梁・道路の状態観測・評価システム

対象構造物	橋梁・路面	計測内容	各種（タイヤ空気圧、路面画像、ひび割れ等々）
国	アメリカ	移動/設置	移動型
背景・目的	道路や橋梁床版の地表下の観測を行うための運用・費用負担を軽減するために、通常の走行速度で、道路の健全度や疲労状況を把握し、どの箇所をいつ修正すべきかについての計画立案を効率的に実施することが必要とされていた。		

## モニタリング技術活用イメージ

## VOTERS VEHICLE

INNOVATION AND INDUSTRY SERVICES

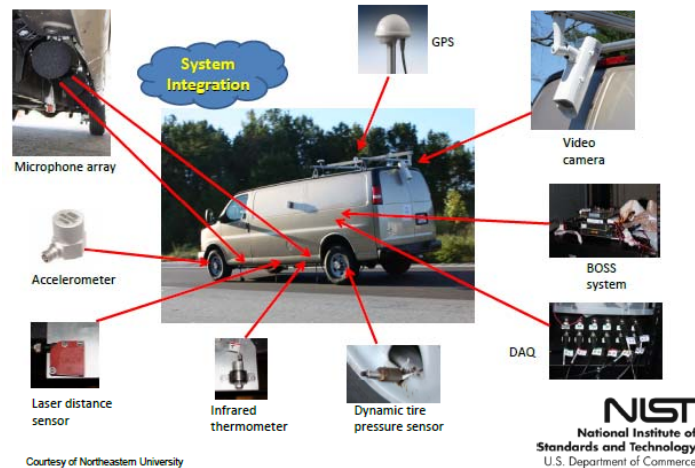
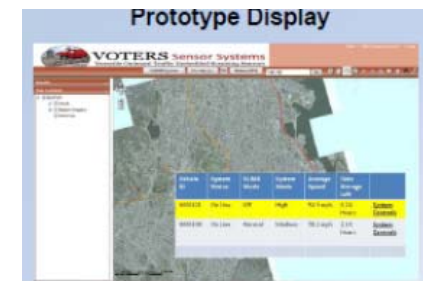


図1: 計測機器構成

[http://structure.stanford.edu/workshop/documents/Keynote%20presentations/IWSHM%202011%20Keynote\\_Felix%20Wu.pdf](http://structure.stanford.edu/workshop/documents/Keynote%20presentations/IWSHM%202011%20Keynote_Felix%20Wu.pdf)

## VOTERS; Versatile Onboard Traffic Embedded Roaming Sensors

- 複数の計測機器を車両に搭載して計測するシステム
- 地中レーダ: 1フィートまでの地表面下の鉄筋腐食等をとらえる
- アコースティック法により、地表、地表直下の疲労状況をタイヤの振動や音波で把握する
- 光学カメラ等で表面の劣化損傷の発見や予兆をとらえる
- レーダーにより表層1~2mmの水分や凍結状況を把握する
- GISシステムと連携して、各種センサーの表示結果と観測位置を連動させる →
- テラバイトになるセンサーデータをGISと連携して管理・分析

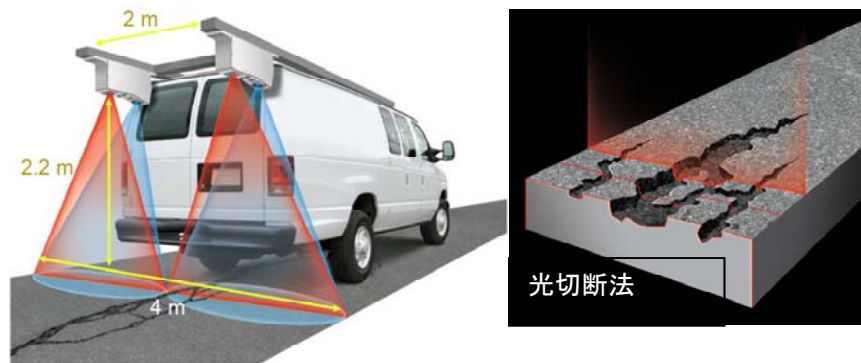


→移動型の計測機器のため、設置場所や設置環境を選ばない。  
 →取得した大量のデータをGISシステムと連携して分析はできるが、リアルタイムでの分析の実現が今後の課題。

## レーザーを利用した道路路面のプロファイリング計測

対象構造物	路面	計測内容	クラック、ポットホール
国	アメリカ・カナダ	移動/設置	移動型
背景・目的	米国では、道路管理者が舗装マネジメントシステム（PMS）及びトンネルマネジメントシステム（TMS）の運用に必要な構造物の健全度データの収集が課題となっている。そこでレーザーを用いた効率的な収集を目的としたモニタリングが実施された。		

## モニタリング技術活用イメージ



図：Pavemetrics 社製 レーザークラック計測システム

<http://www.pavemetrics.com/en/lcms.html>  
[http://www.pavemetrics.com/pdf/LCMS\\_flyer.pdf](http://www.pavemetrics.com/pdf/LCMS_flyer.pdf)

## ＜システムの概要＞

- 車両に搭載したレーザー照射装置により路面にレーザー光を真上方向から線状に照射し、これを斜め上方から写真撮影することによって道路路面の三次元形状を把握（光切断法）
- レーザー照射装置と写真撮影装置が対になって、1個のプロファイラ（重量10kg）を構成
- 車両にはこのプロファイラを2個搭載し、幅4mの範囲を計測
- 100km/hr までの高速走行で調査可能
- 路面管理に必要な数値データが自動的に算出
- 昼夜測定が可能
- 精度：幅1mm 深さ0.5mm

→移動型の計測機器のため、設置場所や設置環境を選ばない。

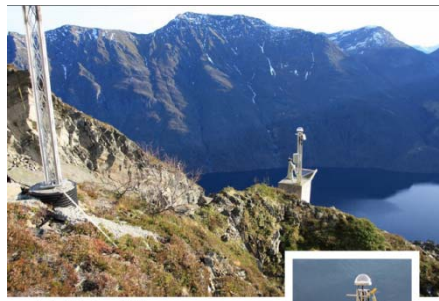
## 衛星やトータルステーションを利用した岩盤すべりのモニタリング

対象構造物	斜面	計測内容	すべり速度、変位
国	ノルウェー	移動/設置	設置型(対象物には利用しない、遠隔に機器設置)
背景・目的	フィヨルド地帯では、大規模な岩盤すべりによる大災害が発生することがある。1934年にTafjordで発生した岩盤すべりでは落下した岩塊が津波を発生させ40人の住民が命を亡くした。また、UNESCOの世界遺産に指定されるほどの絶景であり、遊覧船で訪れる観光客も多い。したがって、大規模岩盤すべりを事前に検知するモニタリングシステムが必要とされていた。		

## モニタリング技術活用イメージ



These total station systems have replaced with a sophisticated early warning system set up by Centre Geo for the Norwegian government and the Tafjord Early Warning Centre. The automated reports are sent directly to the operators of the Early Warning Centre. The Centre Web Monitoring system also accommodates functionality for viewing and analysing data in different



A series of total station were installed on and around the perimeter rock slides area. Other instrumentation devices incorporated employed at the site include a laser ranging system aimed at target based slopes. These are also ground based real time radio reporting from mobile receivers across the field with comparison of data on the slope and preprocessed in the (spatially specific) measurements from satellite. These systems are supported by more highly constrained precise observations data (European wide "continuous") receiver must with a portable receiver. A portable receiver serves a total of



- 岩盤すべりのモニタリング・警報システムは、生命の安全を確保することが必要であることから、単一の測定方法のみに頼るのではなく、複数の測定装置を組み合わせることによって構成

## ①トータルステーション(Trimble S8)

⇒月数ミリから崩壊直前の日数センチの変動が捉えることができる

## ②GNSS(全地球航法衛星システム、Trimble NetR9 GNSS)

⇒10ユニットのGNSSによって岩盤の動きが観測

## ③その他の計測装置

⇒高精度伸縮系(エクステンソメーター)、地上設置リアルタイムレーダー、衛星開口レーダー(InSar)、ポータブル3Dレーザーキャナー

図-1: 計測装置(左:トータルステーション、右:GNSS)

[http://www.nexsens.com/systems/bridge\\_scour\\_monitoring](http://www.nexsens.com/systems/bridge_scour_monitoring)

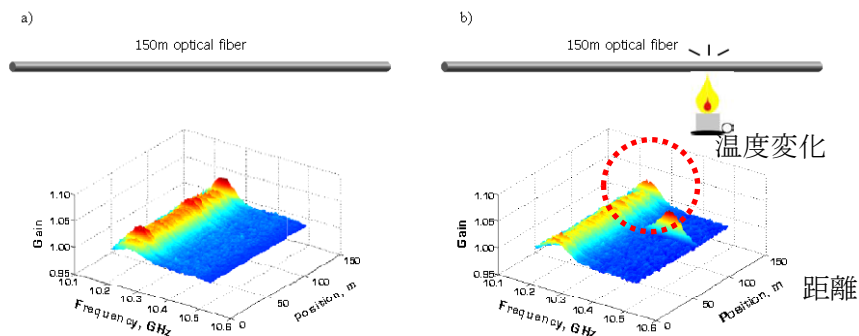
→住民・観光客への警報システムとして運用されており、岩盤すべりの危険検知が期待できる。



## 光ファイバを使った温度モニタリングによるパイプラインの漏出検出

対象構造物	パイプライン	計測内容	温度
国	ドイツ	移動/設置	設置型
背景・目的	岩塩を温水で流体輸送する際の漏洩は環境破壊を招くので、漏水が発生した事象をいち早く把握する必要がある。		

## モニタリング技術活用イメージ



ベルリン近郊の延長55kmの岩塩流体輸送用パイプライン

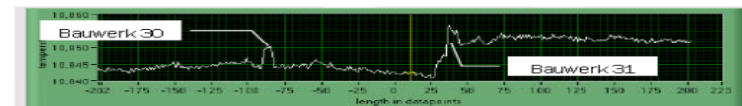
※既存のラマン散乱型光ファイバの温度センサは、光ファイバに入射する光が光ファイバ内で散乱されて戻ってくるまでの時間をもとに位置を特定している。光ファイバ内で散乱される光強度は微弱であるため、長距離の温度測定には限界がある

<http://www.roctest-group.com/sites/default/files/bibliography/pdf/c106.pdf>

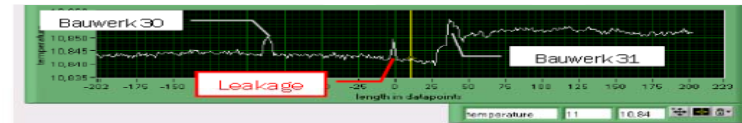
## 55kmの塩水輸送パイプラインの漏水検出

- ベルリンの東北に位置する、延長55kmの岩塩流体輸送パイプラインに誘導光ブルリアン散乱型光ファイバーが敷設され、温度測定・漏水箇所検出を実施
- この延長を考慮すると、既存のラマン散乱型、自然光散乱型ブルリアンの光ファイバーを使うことはできない※
- 誘導光ブルリアン散乱型光ファイバーを適用した結果、55kmを1°Cの精度、測定時間10分で計測することができた。

Temperature profile before leakage



Temperature profile when the leakage is detected



→劣化損傷等の把握すべき事象に見合った精度・信頼性で計測可能(1°C精度)。

## 水道インフラ災害を予防および緩和するための次世代SCADA

対象構造物	上下水道管路	計測内容	加速度等
国	アメリカ	移動/設置	設置型
背景・目的	目視が困難な管路内や埋設管の破損等を未然に把握もしくは、破損個所を正確に把握したい。		

### モニタリング技術活用イメージ

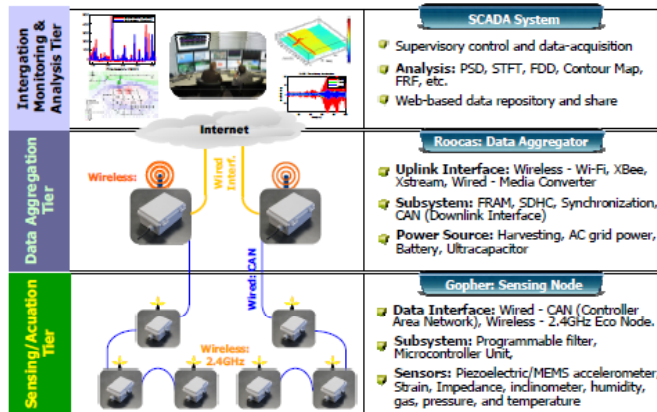
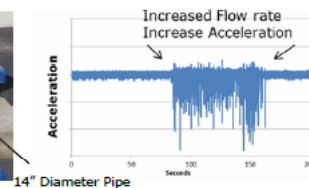
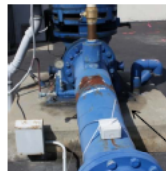


Figure 2. PipeTECT: Tiered networking system by DuraMote.

<http://www.ece.uci.edu/~chou/sss13.pdf>

#### PACE\* (Subwardee)



- DuraMoteと呼ばれる、監視制御システムとデータ収集システムからなるSCADAシステムの次世代システムとして、コンパクトでワイヤレスネットワークからなる仕組み
- Gopherと呼ばれる加速度計を含むセンシングを行うノードと、Roocasと呼ばれるデータ収集ノードがある
- GopherからデータをRoocasが収集して、基地局にWifiを通じてデータ伝送を行う仕組み
- 送水管を付帯している大規模橋梁は、風や車両走行による振動を受けることから、それらの影響を除いた評価を行う必要がある
- 実験中の大雨、強風、台風下でも加速度データは連続的に記録され、長期モニタリングに対応可能な耐久性についても実証された

- 上水道管(加圧による送水を行う)の場合は、パイプ外側表面に付し、振動状況から圧力状況や他の外部要因による変化をモニタリングする  
下水道管(自然流下)の場合は、破損個所や破損によって生じる破損波によって生じる振動や音から変化をモニタリングする  
破損個所を把握するだけでなく、残存耐用年数や補修計画を立てることを目的に開発

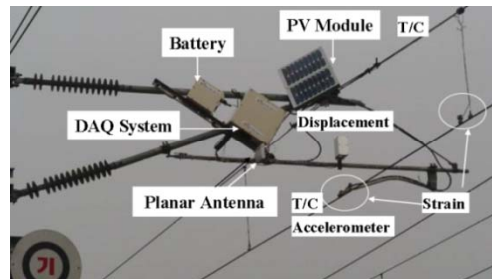
[http://structure.stanford.edu/workshop/documents/Keynote%20presentations/IWSHM%202011%20Keynote\\_Felix%20Wu.pdf](http://structure.stanford.edu/workshop/documents/Keynote%20presentations/IWSHM%202011%20Keynote_Felix%20Wu.pdf)

→気象条件が悪い場合での稼働確認されており、供用中の様々な環境下での性能維持に係る可能性がある。

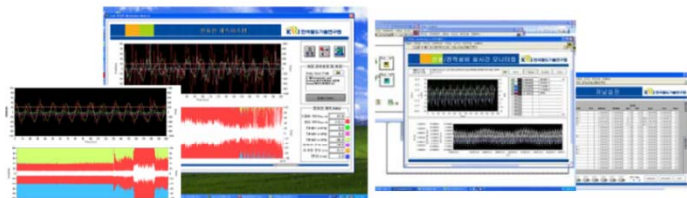
## 鉄道架線のリアルタイムモニタリングシステム

対象構造物	鉄道（架線）	計測内容	ひずみ、変位、温度、振動
国	韓国	移動/設置	設置型
背景・目的	架線障害による鉄道の運行停止等の影響を少なくするために、異常箇所や内容を素早く把握する必要があった。		

### モニタリング技術活用イメージ



設置状況図



モニタリング画像

- FPGA ( ; Field Programmable Gate Array ) ※を用いたリアルタイム遠隔監視システムの開発であるプログラミングすることができるLSIのことで、製造後に購入者や設計者が構成を設定できる
- センサによって架線の温度、ひずみ、変位等のデータを取得し、コンピューターに無線送信可能
- センサ、データ収集システム、ホストコンピューター（無線）、制御・監視システムから構成。
- 25キロボルトの架線にも設置が可能である
- 再プログラム可能なFPGAは、ハードウェアを変更せずに、各種センサとの動的挙動と故障検査の測定を可能にする

※プログラミングすることができるLSIのことで、製造後に購入者や設計者が構成を設定できる

[http://www.uic.org/cdrom/2008/11\\_wcrr2008/pdf/l.2.1.1.3.pdf](http://www.uic.org/cdrom/2008/11_wcrr2008/pdf/l.2.1.1.3.pdf)

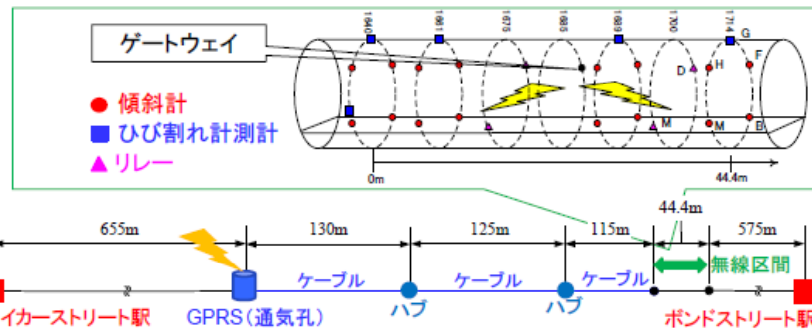
→25000ボルトの架線に設置可能なシステムであり、特殊な環境でも性能維持が可能。

→供用開始後でも設置が可能。

## ロンドン地下鉄の老朽化把握の為のセンサネットワーク

対象構造物	地下鉄（トンネル）	計測内容	傾斜、ひび割れ
国	イギリス	移動/設置	設置型
背景・目的	地下鉄の老朽化場所の監視を効率的に行うことを目的に実施。（英国ケンブリッジ大学と日本の鉄道総研による共同研究）		

### モニタリング技術活用イメージ



a) ジュビリー線ボンドストリート～ベイカーストリート（箇所①）

<http://www-civ.eng.cam.ac.uk/underground/>

<http://bunken.rtri.or.jp/PDF/cdroms1/0011/2008/20001108010105.pdf>

<http://bunken.rtri.or.jp/PDF/cdroms1/0011/2011/0011002027.pdf>

- モニタリング対象箇所は土圧によるトンネル外壁に変状が生じていた
- ジュビリー線のベイカーストリート駅とボンドストリート駅間の区間に約25のセンサを設置
- 観測データはケンブリッジ大学に送信される
- コンクリートの内壁を観測する試験システムを導入
- 電力供給源が無い箇所は有線にて電力供給
- 観測対象箇所は無線によるセンサネットワークシステムにてデータ伝送

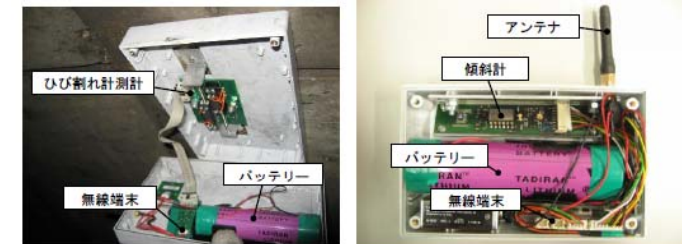
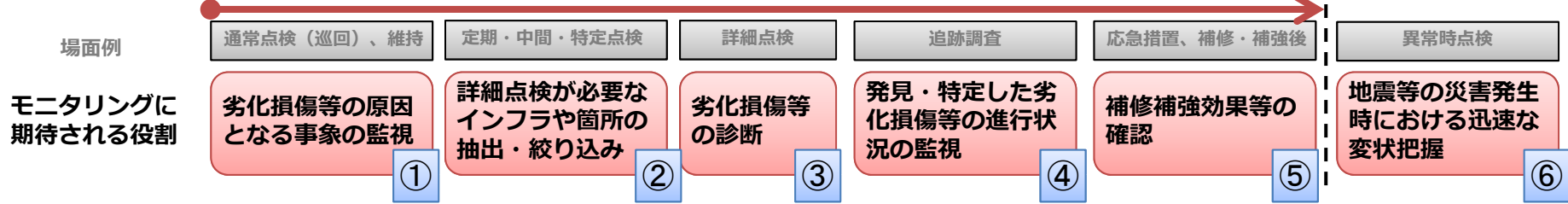


図4 ハードウェア（センサ・リレー）

→供用中のトンネルに取り付けることが可能（取り外し可能）。  
→長期的なモニタリングを実施するには、電力供給が課題。

# 8. モニタリングに期待される役割と関連事例(一覧)

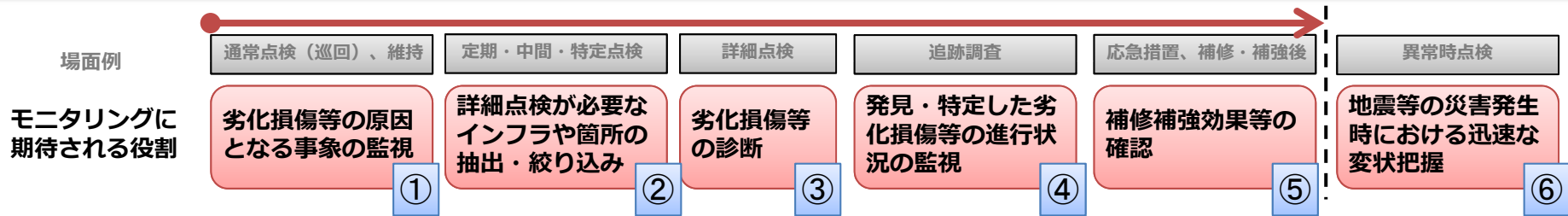
※今回収集した事例を、委員会で整理している「モニタリングに期待される役割」に当てはめて分類すると以下のとおり



分野	事例名称	設置等	国	①	②	③	④	⑤	⑥
橋梁	Weigh-in-motionを用いた橋梁モニタリング	設置	アメリカ	○					
橋梁	新I-35W橋(St Anthony Falls Bridge)のヘルスマニタリングシステム	設置	アメリカ	○				○	
橋梁	インフラ劣化防止のためのコンピューターネットワークによる無線監視システム	設置	アメリカ	○	○				
橋梁	アラスカ港アクセス道路における地震応答に係るモニタリング	設置	アメリカ	○				○	
橋梁	ビンセント・トーマス橋の加速度計による振動特性把握	設置	アメリカ	○					○
橋梁	ParkView橋の架け替え工事後の常時モニタリング	設置	アメリカ	○				○	
橋梁	センサを利用した洗掘モニタリング	設置	アメリカ				○		
橋梁	Jindo橋のワイヤレススマートセンサネットワークによるモニタリング	設置	韓国	○					
路面	スマートフォンアプリケーションを利用した道路路面性状評価	移動	スウェーデン他		○				
路面	自動車搭載型の橋梁・道路の状態観測・評価システム	移動	アメリカ		○				
路面	レーザーを利用した道路路面のプロファイリング計測	移動	アメリカ・カナダ		○				
斜面	衛星やトータルステーションを利用した岩盤すべりのモニタリング	設置 ※1	ルウェー				○		
埋設管	光ファイバを使った温度モニタリングによるパイプラインの漏出検出	設置	ドイツ		○				
水道管	水道インフラ災害を予防および緩和するための次世代SCADA	設置	アメリカ	○	○				
鉄道	鉄道架線のリアルタイムモニタリングシステム	設置	韓国		○				
地下鉄	ロンドン地下鉄の老朽化把握の為のセンサネットワーク	設置	イギリス		○				

※1: 対象構造物には設置しない





分野	事例名称(第一回委員会資料の事例番号)	設置等	①	②	③	④	⑤	⑥
岸壁・護岸	護岸ブロックの流出検知による河川護岸監視(1-1)	設置	○					
栈橋	栈橋上部工 床版等のひずみ量モニタリング(1-2)	設置		○				
栈橋	滑走路栈橋の変位把握による健全度評価(1-3)	設置		○				○
橋梁・トンネル	光ファイバによるひずみ把握(1-4)	設置		○				
橋梁	塩害コンクリート橋の架け替えまでの変位監視(1-5)	設置		○			○	
橋梁	補修・補強を行ったコンクリート橋の長期モニタリング(1-6)	設置					○	
橋梁	橋梁モニタリングシステムの適用性検討(1-7)	設置	○					○
橋梁	亀裂変位計および水管式沈下計による損傷橋梁のモニタリング(1-8)	設置	○	○				
共同溝	公益共同溝の光ファイバによる変状監視(1-9)	設置		○				○
岸壁・護岸	結氷港湾における水中部の劣化診断(1-10)	設置※1	○					
下水道	広角カメラや衝撃弾性波などによる下水道管渠のモニタリング(1-11)	移動	○	○				
栈橋	栈橋上部工の腐食モニタリング(1-12)	設置		○				
トンネル	走行型計測車両を適用した移動体による変位観測(1-13)	移動	○	○				
トンネル	画像による壁面劣化把握(1-14)	設置※1	○					

※1:対象構造物には設置しない



分野	事例名称(第一回委員会資料の事例番号)	設置等	①	②	③	④	⑤	⑥
橋梁	東京港臨港道路の橋梁動態把握 (2-1)	設置	○					
橋梁	本四連絡橋の動態把握システム(2-2)	設置	○					
橋梁	破断検知線を用いた鋼橋の疲労損傷モニタリング(2-3)	設置				○		
橋梁	亀裂発生箇所のセンサによる状況監視(2-4)	設置				○		
橋梁	新湊大橋の耐風対策工効果把握のための振動観測(2-5)	設置		○				
栈橋	電気防食化した栈橋鋼管杭部の腐食状況把握(2-6)	設置		○				
橋梁	ひずみ可視化シートによる構造部材劣化検知(2-7)	設置	○	○				
斜面	光ファイバセンサを活用した道路斜面モニタリング(3-1)	設置		○				
斜面	傾斜・ひずみセンサによる道路施設モニタリングシステム(3-2)	設置		○				
斜面	既設アンカーの荷重計による緊張力監視(3-3)	設置		○				
斜面	GPSセンサによる法面の位置ずれ把握(3-4)	設置		○				
斜面	デジタル画像計測による斜面モニタリングシステム(3-5)	設置※1	○					
地盤	干渉SAR解析による地盤変動監視(3-6)	設置※1		○				
ダム	GPSを用いた堤体の変位計測による健全度評価(4-1)	設置		○				
道路	特殊車両走行重量計測システム(4-2)	設置	○					
道路	カメラ・センサを搭載した車両による道路現況計測システム(4-3)	移動		○				
鉄道	鉄道道床変位自動検知システム(4-4)	設置		○				

※1:対象構造物には設置しない



あくまで収集事例に基づくものの、以下の傾向が見られる。

- ❖ 「詳細点検が必要なインフラや箇所の抽出・絞り込み」を目的とした事例が多い。（海外事例：8/16、国内事例※：20/31）  
⇒詳細点検が必要な箇所の抽出・絞り込みは各国共通課題。
- ❖ 特に移動型は「詳細点検が必要なインフラや箇所の抽出・絞り込み」を目的とする場合に適用しやすい。（海外事例：3、国内事例※：4）  
⇒“モニタリング技術に現場適用にあたって備わるべき要件（p3参照）”のうち、移動型のものは、以下の要件に適合しやすい。
  - 供用中の様々な環境下において性能を維持できること
  - 社会インフラの寿命や点検サイクル等に見合った期間、性能を維持できること
  - 建設・供用開始後でも設置・データ取得が可能であること  
⇒移動型を採用することで、広い・多い・長い施設を比較的安価に把握しやすい。
- ❖ 長期的なモニタリングがなされている例は存在するが、健全度予想や余寿命把握は今後の課題。  
⇒現段階で完成されたモニタリングシステムは見当たらない。