慣性計測を用いた鉄道橋モニタリング のためのセンサ性能評価

杉崎 光一¹・阿部 雅人²・輿水 聡³

¹正会員 株式会社BMC (〒261-7125 千葉県美浜区中瀬2-6 WBGマリブウエスト25階)

E-mail: sugisaki@hashimori.jp

²正会員 株式会社BMC 主幹研究員 (〒261-7125 千葉県美浜区中瀬2-6 WBGマリブウエスト25階)

E-mail: masato@hashimori.jp

³正会員 東日本旅客鉄道株式会社 (〒151-8578 渋谷区代々木二丁目2番2号)

E-mail: koshimizu@jreast.co.jp

土木構造物の維持管理において、ヘルスマニタリングへの期待が高まっている。モニタリングシステムの実用化のためには、手法の開発だけでなく、実装可能なシステムを構築する必要がある。しかし、モニタリングシステムはシーズベースで開発されることが多く、センサメーカーにとってどのようなセンサをユーザーが期待しているかを把握するのは困難な状況にある。本研究では、システムを実装する上で、評価が必要な項目を、鉄道橋の橋脚で計測した実際のモニタリングデータを利用して整理し、その特徴を明らかにした。また、評価項目に関して、想定する外力や算出する指標ごとに精度や耐久性について具体的な性能例を示した。性能を明示することで、ユーザーとメーカーが一体となった高付加価値で信頼性の高いシステム開発が期待される。

Key Words : health monitoring, inertial sensing, railway bridge, sensor specification

1. はじめに

構造物の維持管理において、ヘルスマニタリングの活用が期待されている¹⁾⁻¹⁴⁾。しかし、研究が活発な反面、土木構造物の維持管理用途としてモニタリングシステムが実用化された例は稀である⁹⁾。この要因として、ユーザーがセンサに期待する性能項目が明確でないことが挙げられ、メーカーが提示する仕様(スペック)との間にミスマッチがある可能性がある。土木構造物の設計においては、仕様規定から性能規定へと変更されているが¹⁰⁾、センサの活用においてもメーカーが作成する仕様ではなく、ユーザーが利用するニーズに基づいて、開発の段階からセンサに要求する性能を提示することが考えられる。性能を提示する上では、定量的な指標が必要であり、今まで暗黙知的に利用されてきた仕様規定に対する知識を、いかに形式知として明示化できるかがミスマッチを解消する上で重要となる¹¹⁾⁻¹³⁾。

例えば、衛星制御においては、センサ性能を評価する重要性が認識されており、センサがどのような性能を満たせば、良い結果が得られるかが検討され

ている¹⁵⁾。また、汎用化が進んでいる地震計の評価では、振動台を利用して、よりよいセンサを選択するような精度検証等が行われている¹⁶⁾。構造物計測においても、センサ性能について検討した事例はあるが^{11),17)}、ユーザーとしてセンサに要求する性能を明示化するには至っていない。

そこで、本研究では、実際の鉄道構造物を対象としたモニタリングシステムの研究開発から得られた知見を利用して、モニタリングシステムにおいて重要となるセンサやシステム性能を検討する。対象は、図-1に示すような橋梁下部工の健全性を評価するためのシステムであり、橋脚天端に設置されたセンサにより、傾斜(変位)や振動特性を評価するものである。傾斜角は常時観測され、閾値を120秒連続して越えた場合警報が発報される。その他の指標は、統計的な評価の基に、検査の初動情報等に利用される。センサは、設置の容易性から慣性センサを利用している。傾斜角は最大±0.5°の振幅値を2°/1000程度の分解能で計測でき、また、振動特性に関しては、50Hz程度までの帯域を評価可能であり、強震から微動まで広い振幅範囲の振動を対象としている。

図-1 対象としているモニタリングシステムの概要

本研究の構成は以下の通りである。2.において検討をしているモニタリングシステムの概要を述べ、そのニーズを満たすために必要なシステム性能項目を整理する。センサの性能はセンサ単体の評価だけではなく、AD変換方法を含めたシステム全体として評価する必要がある¹⁶⁾。そのため、センサ単体の性能は「センサ性能」、AD変換まで含めた性能は「センサシステム性能」と呼ぶ。また、データ解析方法や解析結果の評価方法、転送、保存方法までを含めた運用方法を含めれば、モニタリングシステム性能と呼ぶことができる¹⁸⁾⁻²⁹⁾。モニタリングシステム性能はユーザーが決めることができるが、実装にはメーカーを含めた検討が必要である。3.において実際のデータを利用したシステム性能評価結果の例を示す。4.において、性能項目を整理し、評価方法を合わせて検討した上で、センサシステム性能を明示した例を、対象とする外力と指標の二つの観点から整理する。5.で結論を述べる。

2. モニタリングニーズとセンサシステム性能

(1) 構造物の性能評価に対するニーズ

モニタリングシステムの構築は、ニーズを基にして開発を行うことが肝要である。ニーズは開発を進める段階で明らかになっていくものであるが³⁰⁾、構造物の性能という観点から、橋脚モニタリングシステムを例にとれば、橋脚天端に設置したセンサ応答を利用して、図-2のような性能を評価するニーズが考えられる¹⁸⁾⁻²⁹⁾。走行安全性能の評価では、洗掘等の現象が生じた際の橋脚の傾斜を検知し、列車抑止警報をリアルタイムで発する。このため、センサには欠報を無くした上で誤報を最小限とする高信頼性が必要とされる。また、列車通過時や地震時の応答を利用して、強震時の警報機能や被災後の被害評価、

図-2 モニタリングのニーズとセンサ要求性能

また、劣化等による性能変化を捉えることで検査の初動情報とする等、復旧性能や耐荷性能を評価して検査の支援情報を提供する。その際の性能指標としては、変位が指標であれば、検査者にとって直観的にわかりやすく、また設計との整合性も高い。検査の支援情報で利用する場合は、リアルタイム性や信頼性において警報で利用するよりもシステム性能に関してハードルを下げるができる。また、強震時応答から、増水・強風時の微動応答まで計測可能である必要があり、また列車通過時には高振動数成分が多くなるため、広帯域かつ高分解能の性能が期待される。

(2) モニタリングシステム運用上のニーズ

センサシステムに要求されるもう一つのニーズとしては運用上のニーズが考えられる。運用上のニーズは、データの集録方法だけでなく、構造物の性能指標を算出する際の計算量やリアルタイム性など、解析方法などにも影響される。また、解析結果を表示する方法や、計測データを保存する方法などにも依存する。その中でサンプリングレートを高速化することは、AD変換の性能や計測データの容量等に影響するため、できるだけ低いレートでの計測が望ましい。また、フィルタとしてアナログフィルタを利用する場合は、次数を高くすると高価になり、また不安定化する原因ともなるため、次数を低くするニーズがある。また、データの収集やシステムの維持管理性を考えれば、年単位程度の点検のみで、較正が頻繁に必要ではない等、長期的な安定性が重要となる。

(3) 評価するセンサシステム性能

構造物の性能評価や運用上のニーズを満たすように、最低限必要なセンサシステムの性能を評価する指標としては図-3のようなものが考えられる。これらの項目は、ユーザー側が、与えられたセンサを評価する上で検討が必要な項目となっている。アナログ入力信号をセンサによりデジタル信号に変換する仕組みの中で、誤差が混在する要因はセンサ性能だけではなく、AD変換の性能にも依存する。量子化における解像度（レンジの設定）とサンプリングレートは可変であることが多いが、ユーザー側の要求に対してメーカーにより一体化したシステムとして実装されるのが一般的である。このため、センサシステム性能を評価する必要がある。

図-3 アナログ信号の検知とデジタル化

3. センサシステム性能の特徴

2.で示した評価項目に対して、その特徴を実際のフィールド試験結果により検討する。フィールド試験は鉄道橋の橋脚の天端に設置した加速度計および傾斜計による計測結果であり、センサやAD変換の方法等を適宜変えながら行った。また検証データとして鉄道構造物の計測において実績のある変位計³¹⁾による計測との同時計測結果を利用している^{18)・21)}。ここでは、センサ性能を評価するデータとして現地計測データを利用しているが、一般的に現地計測は費用が掛かるため、自己ノイズの評価や温度特性の評価は、室内試験等で評価が可能である。室内試験は環境条件等を制御しやすいという特徴もある。

(1) 折り返しノイズのスペクトルへの影響

計測可能な振動数とサンプリングレートとの兼ね合いから折り返しノイズが起きないようにフィルタを実装する必要がある^{32)・33)}。特に、列車通過時の応答は、地震時の応答に比して高振動数成分が多い等、折り返しノイズの影響は計測環境に大きく依存することに注意が必要である。折り返しノイズが起きる原理については付録に記載する。折り返しノイズのスペクトルへの影響を示したものが図-4である。サンプリングレート 25kHz で橋脚天端の列車通過時の加速度応答に対して、フィルタ処理をしないでデータを間引くことで、サンプリングレートを小さくした時のスペクトルに与える影響を確認できる。低いサンプリングレートにした場合は、実際のスペクトルよりもフーリエ振幅が大きくなることわかる。

次に波形への影響について、図-5に示すサンプリングレート 50kHz で集録した橋脚天端の加速度デ

ータを利用する。図-6は、図-5の波形を 250 点間隔で間引きして 200Hz の波形にする際に、フィルタ無と 2 次、5 次のバターワースフィルタ（カットオフ 26.2kHz）を適用してから間引いた波形の比較である。フィルタ無の結果の縦軸のスケールに注意されたい。列車通過時の応答においてフィルタ無の場合では、 10m/s^2 程度の大きな応答となっているが、フィルタを適用してから間引いた場合は 0.4m/s^2 程度の応答になっている。このため、フィルタを適用しないで 200Hz でサンプリングを行うと、ナイキスト振動数である 100Hz 以上の高振動数成分が、ナイキスト振動数以下の成分として認識されて、見かけ上大きな加速度が生じているように見えてしまい、また波形も歪んでしまうことがわかる。2 次と 5 次のフィルタ比較でもこの影響が確認でき、2 次のフィルタでは 5 次のフィルタを適用した場合よりも大きな応答が出ており、100Hz 以上の応答が混在していることが確認できる。図-7は地震時の波形を示したものであるが、同様の分析を行った結果が図-8である。規模の小さな地震であるため、電気的なノイズの影響がみられるが（ゼロ点の周りに見えるうなりのような波）、フィルタ無とフィルタ有の応答を比較したときに、最大値は大きくは変わらず、高振動数成分は少ないことがわかる。このように、地震計などではあまり影響を受けない高振動数成分の応答は、列車応答を計測する場合は特に注意する必要があることがわかる。

折り返しノイズの対策としては、アナログフィルタを利用する方法とデジタルフィルタを利用する方法が考えられる。アナログフィルタはハード的な設計が必要であり、簡単にはカスタマイズできないため、仕様（次数や関数形等）を明確にしたうえで導

図-4 折り返しノイズのスペクトルへの影響

図-5 列車通過時の加速度波形

図-6 折り返しノイズの加速度波形への影響 (列車)

入する必要がある。実装可能な次数に対して、カットオフ振動数を決めてやればよい。また、アナログフィルタは帯域幅の制限を行うために、ノイズを低減することにも役立つ³²⁾。デジタルフィルタを適用する方法としては、近年デルタシグマ型のAD変換方法として多く利用されている³⁴⁾。デルタシグマ型のAD変換は、高いサンプリングレートで集録(オーバーサンプリング)して、デジタルフィルタ処理で高振動数ノイズを除去するため、高分解能で高精度な信号を取得できる。高サンプリングレートで集録するために、解析や記録を行う際には、ダウンサンプリングしてから行うのが一般的であるが、その際にエイリアシング対策として、デジタルフィルタ(デシメートフィルタ)処理を行う。デジタルフィルタをどのような特性にするかによって、AD変換機としての性能が決定される。

図-7 地震時の加速度波形

図-8 折り返しノイズの加速度波形への影響 (地震)

(2) 自己ノイズの評価

自己ノイズは、センサの電気回路等において発生するものであり、温度特性等の外的な要因におけるノイズとは分けて考えるべきである。ただし、自己ノイズにおいて内的な要因と外的な要因を分離することは困難であるため、ここでは外的な要因も含め、自己ノイズとして考える。自己ノイズは振動数ごとに異なることから、自己ノイズの大きさを振動数ごとに把握することができれば、計測可能振幅レベルを振動数ごとに得ることができる³⁵⁾。アンプ等により増幅する場合、自己ノイズ(センサが有するノイズ)も合わせて増幅される可能性があり(増幅器雑音³⁰⁾)、その場合は、感度を上げて分解能は高くない。また、低振動数域では自己ノイズが大きくなるため(低周波雑音³²⁾)、低振動数域を精度よく計測できるかはセンサの重要な選定要件となる。

AD変換まで含んだパッケージ式の加速度計測システムのスペック表示では、例えば分解能0.2Galといった表記が行われる。この場合、最小目盛りは0.2Gal以下であるとともに、自己ノイズレベルも0.2Gal以下であるということを意味している。それに対して、センサ単体の仕様としては、振動数ごとの自己ノイズを求めている例もある³⁵⁾。振動数ごとの自己ノイズが評価できない場合は、ある振動数に0.2Galの自己ノイズが集中すると考える必要があり、

図-9 自己ノイズの評価例

その場合は、振動数ごとの表示に換算すると、最大で $4.1 \times 10^{-3} [\text{m/s}^2/\sqrt{\text{Hz}}]$ のノイズがあるということになる。この性能と橋脚天端に設置した加速度センサで、微動、列車、地震といった外力に対する応答を記録してフーリエスペクトル振幅で比較した結果が図-9である。この比較からは、微動はもとより、列車通過時や地震時の応答でさえ、高い振動数まで仕様の外になってしまう。このため、ユーザー側にとっては仕様外使用となるため、誤作動等が生じた際には問題が生じることになる。

(3) ゼロ点温度特性

本計測で対象としている慣性センサは、重力を検知する機構であるため、センサのゼロ点の出力は、姿勢により影響をうける²²⁾。このような物理的な特性だけでなく、温度特性等によってもゼロ点不均衡が発生する。温度特性には電圧感度の温度特性と、ゼロ点の温度特性が考えられる。感度の温度特性に関しては、各メーカーにおいて仕様化されており、直線性（温度変化に対して感度が比例的に変化する）等も規定されている。ゼロ点の温度特性に関しては、変化する範囲（温度変化に対してゼロ点がずれる最悪値）をゼロ点不均衡として明示しているメーカーもある。ゼロ点不均衡の別の発生原因としてはヒステリシスの問題があり、応答の大きさに比例して、ゼロ点が元に戻らないという現象が発生する。傾斜計はゼロ点の値を読み取り傾斜を測るためゼロ点不均衡は大きな誤差となるが、動的計測においてもゼロ点不均衡により基線ずれが生じると、平均を引く等のゼロ補正だけではオフセットできず、スペクトルの低振動数成分等に歪みが生じることになる³⁶⁾。温度特性による基線ずれの場合は、温度変化速度に応じて基線ずれの影響が大きくなるため、センサの発熱や直射日光等がある場合には特に注意が必要となる。

センサが温度変化によって基線ずれ(ドリフト)を起こしている例が図-10である。図-10の波形は 120

秒間の現象であり、この間の温度変化は小さいと考えられる。図-11には、橋脚天端に設置した加速度センサの 3 方向（鉛直、橋軸直角、橋軸）のゼロ点の値とセンサボックス内に設置した温度計の値との関係を示したが、温度と直線的な関係があり、その傾きは同じ種類のセンサでも個体差がある。図-12は図-10に示した波形の前後の DC 値の差（緑の枠で囲んだ波形）と 100 秒の間で生じるセンサボックス内の温度変化との関係を示したものである。横軸は日付である。温度特性は温度速度と関係があり、温度変化が急な時間帯ほど基線ずれが大きいことがわかる。特に、3 軸加速度センサの鉛直成分における基線ずれが、他の方向に比べて大きい。ゼロ点の変化は温度特性以外でも生じることがあり、例えば、図-13に示すように、同一の測定条件で同じセンサ間の応答の比較においても相違が生じていることがわかる。この事例は、0.5Hz のカットオフで 2 次バターワース型のローパスフィルタ処理をしたものであるが、低振動数成分の応答に個体差があることでゼロ点の値が変化している。このように温度特性の評価はセンサの品質を評価する上で重要であり、また簡易に個体差を評価できる。このような個体差は、加速度の最大値等を評価する上では問題とならないが、積分をする等の数学的な操作を行う場合は、低振動数成分の大きさが重要となるため、大きな誤差が生じる原因となる。

(4) 長期耐久性（センサ性能変化）

以上挙げた性能に関して重要となるのは、長期的に性能が変化しないということである。モニタリングは長期間にわたって継続的に行われるものであり、センサの長期的な性能の安定性は重要な性能である。このため、センサの異常としては短期的な波形の異常だけでなく、長期的な性能の変化を検討する必要がある。例えば、加速度センサの検出器である振り子の材質が金属である場合、感度が温度特性等により変化することはよく知られている。例えば図-14は、温度と加速度の DC 値が重なる点がある、ある時点を境に変化している事例である。センサを設置した対象物が傾斜をしていないとすると（もしくは温度により傾斜する場合）、同じ温度では同じ DC 値になるはずである。このような特性変化は微小であれば大きな問題とはならない。しかし、図-15のように傾斜センサのゼロ点と温度との関係が大きく変化している事例も見られた。橋脚の傾斜は実際温度による鉄桁の伸縮等により生じていると考えられるが²³⁾、構造物に急激な劣化等が見られない状態で温度との相関が大きく変化することは想定し難い。同

図-10 ゼロ点の温度特性によるドリフト現象

図-11 ゼロ点温度特性の個体差

図-12 加速度三成分のゼロ点の変化と温度変化の関係

図-13 温特以外の低振動数成分の変化によるゼロ点変化
(上：生波形 下：ローパスフィルタ処理後)

図-15 ゼロ点温度特性の不安定性 (傾斜計)

図-14 ゼロ点温度特性の変化 (加速度センサ)

様の事例として、鉄桁のひずみ計測においても温度変化によるひずみの変化が問題となるが⁵⁾、傾斜センサのようなゼロ点成分を長期的に計測していく場合は実際の現象との区別が難しいため、長期的なセンサ性能の変化をある範囲に抑えることが課題となる。温度特性が時間と共にどの程度変わるかで評価することは困難であるが、信頼性を確保するためには、長期的な変化を一定範囲に抑えることが必要となる。

4. センサシステム性能の明示例

(1) モニタリングシステム開発の流れ

モニタリングシステムの開発は、図-16に示すようなフローで行っている¹⁹⁾。センサの選定では、モニタリングコンセプトを実現するものが求められる。構造物の性能評価指標を決めた上で、その指標を算出するにあたってシステムが性能を満たしているか評価する。本手法における構造物の性能評価指標は、地震時や列車通過時の慣性計測結果から、不規則振動理論を援用して最大変位や卓越振動数を推定したり（付録 2）¹⁸⁾、列車通過時に橋脚が回転運動すると想定し、加速度計測においてセンサが傾斜する影響を除去したあとの橋脚の傾斜角に回転半径を掛け、最大変位を求める方法を利用している（付録 3）²²⁾。微動応答に関しては、不規則振動理論を援用して卓越振動数を推定している（付録 2）²¹⁾。傾斜角の計測では、気温変化による橋脚の傾斜角（静的傾斜角）を算出している²³⁾。また、選定されたセンサは実際に利用する環境で評価することが重要となる。評価結果を利用して、実際の応答に合わせてセンサへの要求性能項目を表-1のように検討し、導入の費用対効果を踏まえ可能な範囲でカスタマイズする。

図-16 モニタリング開発項目

表-1 加速度センサの性能表示例

要求性能	センサ性能 (加速度・傾斜センサ)
傾斜計測	DC 温度特性の安定性（感度、ゼロ点不均衡）
	低ドリフト
長期性能	耐久性
	センサ特性の安定性
微動計測	低自己ノイズ
	高解像度
列車応答計測	折り返しノイズ対策

(2) センサシステムの性能を明示するための方法

a) 折り返しノイズ

設計されたフィルタ性能が実際に実装できているか、加振試験においてフィルタ処理をしていない応答との比較から評価することが可能である。フィルタがバターワース型フィルタである場合、カットオフ振動数 f_c およびフィルタの次数 n を以下の式を利用して推定することができる。

$$G[f] = \frac{100}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_c}\right)^n}} \quad (1)$$

推定結果は図-17のようになり、 $f_c=24.6\text{Hz}$ 、 $n=1.7$ のような特性を示すローパスフィルタであることがわかる。

次に、折り返しノイズ対策ができているかという評価においては、オーバーサンプリングした加速度データに関して、デシメートフィルタの特性を変えて、保存するサンプリングレートまで間引くことで評価できる。図-18は、50kHzで計測した加速度波形に対してフィルタ特性を変え、間引きしない基準スペクトルと比較した結果である。縦軸は、フィルタ無のスペクトルを基準として、フーリエ振幅の誤差を求めたものである。下部工の振動特性を評価す

る上で、必要な上限の振動数や電源ノイズを考慮してカットオフ振動数を25Hz付近にし、ナイキスト振動数や保存時のデータ量等も考慮し、フィルタ後に100Hzに間引く場合と200Hzに間引く場合について比較している。200Hzを検討した理由は一般的に電源ノイズが50Hzや60Hzで生じることがあり、その影響を検討するためである。

デジタルフィルタとしては、図-19に示すような、移動平均を利用した簡易なフィルタである sinc 関数が利用されることがある。このフィルタは、特定の振動数においてノッチが生じるため、電源ノイズ等の特定の振動を除去する上では有効であるが、バターワース型のフィルタといったより高度な FIR 型のフィルタに対して、カットオフ振動数以下の信号成分も低減してしまう特徴が見て取れる。例えば、sinc3 次フィルタで26.2Hzのカットオフを行えば100Hzに間引いた場合でもエイリアシングは起きないが、カットオフ以下の低減が大きい問題が残る。それに対して、sinc3 次フィルタで96.5Hzのカットオフの場合は、エイリアシングの影響が出てしまっている。200Hzに間引く場合は、エイリアシングの影響が少なく、バターワース5次のフィルタのみをかけた場合とほぼ同等のスペクトルを得られること

図-17 センサシステムのフィルタ特性

図-18 エイリアシング対策例

(上: 100Hz へ間引き, 下: 200Hz へ間引き)

図-19 適応フィルタ例

が分かった。電源ノイズが大きい場合は 100Hz に間引く場合はバターワース 5 次でもエイリアシングの影響が出ており、バターワース 9 次の高次のフィルタをアナログフィルタで実現する選択肢も残す場合は、保存メディアの容量が許せば 200Hz に間引く方がよいといった結果を得ることができる。

また、入力に対するセンサの出力は、振幅や位相について遅れが生じるものであり、これにより、

図-20 自己ノイズの評価

(上: スペクトル比較 下: コヒーレンス)

センサが計測可能な振動数範囲が決まる。このようなセンサの原理的(物理的, 材料的)な振動数特性を利用したフィルタもエイリアシング対策としては有効である。

b) 自己ノイズ

実際にどの振動レベルまで計測が可能であるか判断する方法として、より分解能の高い高性能のセンサと同時計測し、応答を比較する方法が考えられる。自己ノイズはセンサ個体間で相違する可能性があるため、個々に基準センサとの比較を行いながら計測可能範囲を決定する。比較の方法としては、 x と y をそれぞれのセンサの時系列応答として、以下のコヒーレンスを利用することが考えられる³⁵⁾。

$$r^2 = \frac{\Phi_{xy} \Phi_{xy}^*}{\Phi_{xx} \Phi_{yy}} \quad (2)$$

ここで Φ_{xx} , Φ_{yy} はパワースペクトルであり、 Φ_{xy} はクロススペクトルである。

図-20は列車通過時の変位計と加速度計の同時計測結果から、変位計の 2 階微分と加速度計の応答を比較したものである。ここでは、加速度計の応答を変位に換算するという観点から、変位計の応答を正と考え、変位計よりも大きな応答がでている箇所は加速度計の自己ノイズと考えている。コヒーレンスが低い振動数範囲では、メーカーの仕様外であっても計測が可能であると判断することもできる。逆に、計測可能な振動レベル以下は利用を行わないように解析手法をカスタマイズする必要がある。この場合は、折り返しノイズ等の影響を含め設置条件を踏まえた上で組上がったシステムの評価であるため、実験室レベルより有効な評価となる。

表-2 指標ごとのセンサ性能例

指標		センサ性能				
		自己ノイズ (m ² /s ² /Hz)	温度特性 [m/s ²]/°C	折り返しノイズ対策		長期安定性
				アナログフィルタ	デジタルフィルタ	
最大加速度		< 1×10 ⁻¹⁰	< 0.05	フィルタ特性: 25Hz, 5次バターワース型 サンプリングレート: 200Hz	サンプリングレート : 10,000Hz以上 デシメートフィルタ : 25Hz, 5次バターワース型 デシメート : 200Hz	C
最大変位	地震外力不規則振動理論	< 1×10 ⁻¹²	< 0.005			B
	一般外力不規則振動理論	< 1×10 ⁻¹²	< 0.005			B
	加速度傾斜補正	< 1×10 ⁻¹⁰	< 0.005			B
卓越振動数	橋脚	< 1×10 ⁻¹²	< 0.01			B
静的傾斜角		-	< 0.001	-	-	A

※長期安定性ではAが最も高い性能が要求される

表-3 観測対象ごとのセンサ性能例

対象応答	発生頻度	荷重特性	センサ性能項目					
			振幅範囲 (m/s^2)	自己ノイズ ($\text{m}^2/\text{s}^2/\text{Hz}$)	温度特性 ($[\text{m}/\text{s}^2]/^\circ\text{C}$)	折り返しノイズ対策		長期安定性
						アナログフィルタ	デジタルフィルタ	
強震	小	低振動数成分が卓越	> 20	$< 1 \times 10^{-8}$	< 0.005	フィルタ特性: 25Hz, 5次バターワース型 サンプリングレート: 200Hz	サンプリングレート: 10,000Hz以上 デシメートフィルタ: 25Hz, 5次バターワース型 デシメート: 200Hz	C
中小地震	中	低振動数成分が卓越	> 10	$< 1 \times 10^{-10}$	< 0.005			B
増水・強風	中	常時微動に対してS/N比が高いが高振動数成分もある	> 1	$< 1 \times 10^{-10}$	< 0.005			B
交通(車)振動	中	地盤特性と関係?	> 10	$< 1 \times 10^{-10}$	< 0.005			B
列車振動(橋直)	大	連行荷重のため非定常性が高い	> 10	$< 1 \times 10^{-10}$	< 0.005			B
列車振動(橋軸)	大	連行荷重のため非定常性が高い	> 10	$< 1 \times 10^{-10}$	< 0.005			B
列車振動(鉛直)	大	連行荷重のため非定常性が高い	> 10	$< 1 \times 10^{-12}$	< 0.005			B
常時微動	大	S/N比が低い	> 0.1	$< 1 \times 10^{-12}$	< 0.005			B
傾斜計測	大	温度変化の影響が混在	-	-	< 0.001	-	-	A

※長期安定性ではAが最も高い性能が要求される

(3) 橋脚モニタリングを例とした性能評価例

センサを活用するためには、シーズベースのメーカーによるセンサ開発と、ニーズベースのユーザーによる手法開発とのミスマッチをいかに小さくするかが課題である。実際の開発では、一からユーザーが主体となってセンサ開発を行うことは少ないため、既存のセンサを利用する上で、メーカーと歩調を合わせながら改良を視野に開発を行うことが考えられる。そのためには、ユーザー側から必要なセンサ性能を明示していく必要がある。

本モニタリングシステムにおける評価対象は、地震による被害や洗掘による被害があり、以下のような性能評価のニーズを想定している。

・強震観測特化

強震時の最大変位や卓越振動数から橋脚の健全性や被害評価に対する情報を得る

・多目的振動計測(中小地震, 増水・強風微動, 列

車振動計測)

中小地震, 列車振動の橋直方向および橋軸方向の動的変位を算出。また, 増水や強風時微動から卓越振動数を推定

・長周期振動・傾斜観測併用

列車通過時鉛直沈下, たわみの計測, 常時微動から卓越振動数の推定および傾斜観測(警報利用)

これらのニーズを考慮した上で, 表-2ではモニタリング指標ごと, そして表-3では対象外力ごとにセンサ性能を明示した例を示す。

指標ごとに整理する場合, 最もセンサ性能に依存する項目は温度変化等による橋脚の傾斜変化(静的傾斜角)を計測する必要があるかであり(長周期振動・傾斜観測併用), 温度特性が小さく, 安定したセンサを選定する必要がある。なお, 長期安定性に関しては, 試験期間の制約があり, 値までは仕様化はできていないが, ランク付けした結果を記載して

表-4 加速度センサの試験方法例

項目 (評価例)	評価時期	評価方法例
センサ温度特性	製造時	恒温層, 加熱・冷却試験
	現場	加熱・冷却試験, 長期計測 (四季)
センサ振動数ごとの自己ノイズ	製造時	加振試験, 微動試験
	現場	微動試験, 変位計測
センサ耐久性	製造時	ランニング試験 (耐候性, 耐振動性)
	現場	長期フィールド試験

いる。指標としては、フルレンジ $V/m/s^2$ に対する変化率等で評価が可能であると考えられる。最大加速度のみを評価する場合は、センサの自己ノイズや温度特性等の性能を下げるができる。また、卓越振動数を指標とする場合は（多目的振動計測）、特に強制振動となる列車振動からの推定が難しい場合、ランダム入力に近いが S/N 比の低い微動応答からの推定が必要となる²¹⁾。その場合は、センサ性能では自己ノイズが小さいことが必要となる。自己ノイズ指標の値については、図-9に示したような実際の外力ごとのスペクトルを参考にしている。次に、最大変位を指標とする場合は、ドリフト現象等による低振動数におけるスペクトルの歪が大きくなるために温度特性の小さなものを選定する必要がある。折り返し雑音により振動数特性が悪くならないようにするためのフィルタ特性としては、アナログフィルタを適用する場合と、デジタルフィルタを適用する場合で性能を明示した。デジタルフィルタを適用する場合は、計測機の性能の上限から 10kHz のサンプリングレートを選定している。保存データの容量等の関係から間引きが必要となるが、デシメートフィルタとしては図-18の検討から、25Hz 付近のカットオフで 5 次のバターワース型のフィルタを適用後に 200Hz に間引く方法とした。サンプリングレートが 10kHz まで上げられない場合は、アナログフィルタとして 5 次のバターワース型のフィルタを適用して 200Hz でサンプリングすればよい。

外力ごとの性能評価については、最大変位の推定を前提とした場合では、強震に特化した場合でもある程度高い性能が必要となる。ただし、自己ノイズの問題においては、例えば震度 6 以上の地震において被害評価を行うのか（強震観測特化）、震度 5 以下の地震でも評価を行うのか（多目的振動計測）等で仕様が異なる。また、列車振動の計測（多目的振動計測）に対しては高振動数成分が多く含まれるため、折り返しノイズ対策が重要となる。分解能の性能に関しては、対象とする振幅範囲によって、必要

となる AD 変換の性能が決まるため一概には決まらないが、多目的振動計測のように、全ての外力を計測対象とした場合は、自己ノイズが小さいセンサを選定した上に、解像度を高くする必要がある。

(4) 性能の明示と評価試験

センサ性能の評価では、項目ごとに評価する単位を共通にし、評価方法を合わせて検討する必要がある。これにより、メーカー側に要望を出す場合の共通言語とすることが可能となる。さらに、要求する性能を明示することで、表-4のようなメーカーと一体となったセンサシステム評価試験を行うことができる。例えばゼロ点温度特性に関しては、メーカーにおいても温度による感度変化以外の原因はよく分かっていないため、製品試験による評価が難しい。また、メーカーによる試験は一般的に全ての製品に共通した仕様化という観点から行われるため、かなり厳しい環境制御をした上で行われる。しかし、要求している性能が明示されていれば、必要な水準に対して柔軟な評価基準で温度特性試験をメーカーに課すといった提示が可能となる。また、個々のセンサの評価結果に対して後処理で補正等を行うことで対応することも可能である。このため、ユーザーが必要なレベルを提示した上で、評価式等を提示してもらい、共同で評価を行うことが考えられる。評価時期に関しても、センサ出荷時に検査を行うことで、トータルでの手間が少なくなると考えられる。それに対して、フィールド試験で行う場合は、センサ性能に影響を与える変数の制御が困難なことや、シグナルとノイズを分けることが難しくなるが、実際の運用環境において評価が行える等の利点もある。

5. 結論

本研究で得られた結論を以下に述べる。

- (1) モニタリング技術の実用化が進まない問題において、メーカーとユーザーのミスマッチの問題を挙げ、構造物の設計における仕様規定と性能規定の関係や、暗黙知と形式知の観点などから、ユーザーがセンサに求める性能を明示化する必要性を述べた。
- (2) モニタリングシステムのニーズを、構造物の性能評価の観点と運用の観点から整理し、センサシステム性能を評価するための項目や指標を整理した。
- (3) 評価項目に対して、その特徴を実際のフィールド試験や室内試験結果により検討した。

(4) センサシステム性能を評価するための具体的な方法を挙げ、鉄道構造物の橋脚モニタリングシステムにおいて性能評価の一例を提示した。

本検討では、試験期間の制約等からセンサシステム性能の長期安定性に関しては数値化できていない。今後は、明示した性能の実装方法を含めてフィールド試験を行い、さらに検討を行う予定である。性能の明示は開発製品ごとに行う必要があり、本検討ではあくまでも一例を提示したに過ぎない。今後様々な用途のシステムにおいて性能の評価が期待される。

付録 1 量子化誤差と折り返し雑音

アナログ振動をデジタル変換する際には、デジタル化する時間間隔（サンプリングレート）とデジタル化する際の刻み、つまり解像度が重要となる。解像度があらい場合は、量子化誤差が生じ、時間間隔があらい場合は、折り返しノイズが生じる。量子化誤差に関しては、解像度を上げることで減らすことが可能である。折り返しノイズは、図-21に示すように、例えば 0.25Hz の sin 波を計測する場合には、サンプリングは黒丸で示した 2 秒間隔、つまり折り返し振動数（ナイキスト振動数）0.5Hz より早く設定する必要がある。しかし、実際の応答に 0.75Hz の波が混在している場合は、0.5Hz でサンプリングした場合は、図-21の赤丸を結んだ点線のように、0.25Hz の波として認識してしまう。これにより、0.25Hz のスペクトルが実際よりも大きくなる。このような折り返しノイズを防ぐためには、アナログフィルタを利用して、高振動数成分を除去してからデジタル化するか、高速でサンプリングをする必要がある。

付録 2 不規則振動理論を利用した変位推定

応答加速度 $\ddot{x}$ と応答速度 $\dot{z}$ が観測できる場合は、相対加速度 $\ddot{y} = \ddot{x} - \dot{z}$ から以下のように変位を推定することが可能である。

一般外力 f を受ける 1 自由度系の運動方程式は以下のように表わされる。

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = f \quad (3)$$

応答加速度のパワースペクトルは

図-21 折り返しノイズの発生原理イメージ

$$\begin{aligned} \Phi_{\ddot{x}} &= \frac{\omega^4}{\omega^4 + (4\zeta_s^2 - 2)\omega_s^2\omega^2 + \omega_s^4} S_0 \\ &= \left\{ 1 - \frac{(4\zeta_s^2 - 2)\omega_s^2\omega^2 + \omega_s^4}{\omega^4 + (4\zeta_s^2 - 2)\omega_s^2\omega^2 + \omega_s^4} \right\} S_0 \quad (4) \\ &= S_0 - (4\zeta_s^2 - 2)\omega_s^2\Phi_{\dot{x}} - \omega_s^4\Phi_x \end{aligned}$$

ここで、 ω ：外力の角振動数、 ω_s ：構造物の固有振動数、 ζ_s ：減衰比、 S_0 ：外力のパワースペクトル、である。

パワースペクトル密度の振動数における積分を考えた時、加速度応答では発散するため、加速度の 2 乗平均をスペクトルから求めることができない。このため、無限区間ではなく有限な振動数値までを累積することで変位応答比を定義する。この応答比を求めることで、加速度 2 乗平均値から変位の 2 乗平均値を求めることができる。

応答比の求め方については、減衰比が 1 より十分小さく、 $c=1$ とした場合、以下のように近似計算から求めることができる。

$$\gamma_w^2 = \frac{I_x(\infty)}{I_x(\omega_s)} \approx \frac{2}{\omega_s^4} \quad (5)$$

なお、仮定の妥当性については文献(38)を参照されたい。等価振動数および減衰比については、変位応答と速度応答の累積スペクトルを以下の式で加速度応答から求める。

$$\bar{I}_x(\omega) = \frac{\int_{\omega_l}^{\omega_h} \frac{\Phi_{\ddot{x}}}{\omega^4} d\omega}{I_x(\infty)} \quad (6)$$

$$\bar{I}_{\dot{x}}(\omega) = \frac{\int_{\omega_l}^{\omega_h} \frac{\Phi_{\dot{x}}}{\omega^2} d\omega}{I_{\dot{x}}(\infty)} \quad (7)$$

ここで、 ω_l および ω_h は外力特性やセンサ性能等から決まるバンドパスフィルタであり、累積スペクトルの形状から適宜決定する。

以下の正規化を利用して、

$$I_{mean}(\omega) = \frac{\bar{I}_x(\omega) + \bar{I}_{\dot{x}}(\omega)}{2} \quad (8)$$

その四分位点から以下のように求めることができる。

図-22 座標系

$$\omega_s = \omega_{l/2} \quad (9)$$

$$\zeta_s = \frac{\omega_{3/4} + \omega_{l/4}}{2\omega_{l/2}} \quad (10)$$

推定値を利用すれば、変位の RMS は

$$E[x^2] = \gamma_w^2 I_{\ddot{x}}(\omega_s) \quad (11)$$

となる。加速度のピークファクタと変位のピークファクタは理論的には同じとなるため、観測される相対加速度のピークファクタを利用して、変位の最大値を以下のように求めることができる。

$$x_d = \bar{p}_{\ddot{x}} \sqrt{E[x^2]} = \bar{p}_{\ddot{x}} \sqrt{\gamma_w^2 I_{\ddot{x}}(\omega_s)} \quad (12)$$

付録3 慣性センシングによる傾斜・振動計測

図-22のような座標軸を定義し、 θ : 傾斜角、 x : 変位、 $\ddot{x}$, $\ddot{y}$: 加速度のように定義する。 g は重力加速度である。図-22のようにセンサを設置した場合、センサは傾斜し慣性力の影響を受け、応答傾斜角 θ' 、応答加速度 $\ddot{x}'$ とすると以下のような物理量が計測されることになる。

$$\theta' = \arctan \frac{\ddot{x}}{(-g - \ddot{y})} + \theta \quad (13a)$$

$$\ddot{x}' = \ddot{x} \cos \theta + (\ddot{y} + g) \cos \left(\theta - \frac{\pi}{2} \right) \quad (13b)$$

θ は微小であると考え、それぞれの式は、

$$\theta' = \frac{-\ddot{x}}{g + \ddot{y}} + \theta \quad (14a)$$

$$\begin{aligned} \ddot{x}' &= \ddot{x} \cos \theta + (\ddot{y} + g) (\sin \theta) \\ &= \ddot{x} + (\ddot{y} + g) \theta \end{aligned} \quad (14b)$$

となる。 $g \gg \ddot{y}$ とすると

$$\theta' = \frac{-\ddot{x}}{g} + \theta \quad (15a)$$

$$\ddot{x}' = \ddot{x} + g \theta \quad (15b)$$

となる。両辺をフーリエ変換すると、

$$\Theta' = \frac{\omega^2 X}{g} + \Theta \quad (16a)$$

$$\ddot{X}' = \ddot{X} + g \Theta \quad (16b)$$

である。

ここで、 ω は角振動数である。

弾性体の振動を考えた場合、任意点 ξ のある時刻 τ における変位 $x(\xi, \tau)$ と傾斜角 $\theta(\xi, \tau)$ はそれぞれの座標関数を $Y(\xi)$, $Z(\xi)$ とし、時間関数 $q(\tau)$ とすれば、以下のように表わすことができる。

$$x(\xi, \tau) = Y(\xi) \cdot q(\tau) \quad (17a)$$

$$\theta(\xi, \tau) = Z(\xi) \cdot q(\tau) \quad (17b)$$

座標関数における固有振動モードを Y_n , Z_n ($n=1, 2, \dots, N$) と考え、ある固有モード k に着目すれば、両者の関係は線形関係であり、

$$\frac{x}{\theta} = \frac{Y_k}{Z_k} = \delta \quad (18)$$

となる。ここで、 δ は座標関数によって決まる係数であり、長さの単位を持つものである。この仮定は弾性体であることに加え、以下のような場合に成り立つと考えられる。

- ・ x, θ が拘束されていないこと
- ・ 荷重の载荷条件が変わらないこと

1 番目の仮定に関しては、支点や剛結点等による拘束がないことを想定しており、センサの設置場所を考慮することで成り立つと考えられるが、2 番目の仮定については、実際の現象において成り立つかは常に考慮が必要である。

式(18)を利用することで式(16)を以下のように変形できる。

$$\Theta' = \left(1 + \frac{\omega^2 \delta}{g} \right) \Theta \quad (19a)$$

$$\ddot{X}' = \left(1 + \frac{g}{\delta \omega^2} \right) \ddot{X} \quad (19b)$$

$$\omega_c = \sqrt{\frac{g}{\delta}} \text{ とすると,}$$

$$\Theta = \frac{\Theta'}{\left\{ 1 + \left(\frac{\omega}{\omega_c} \right)^2 \right\}} \quad (20a)$$

$$\ddot{X} = \frac{\ddot{X}'}{\left\{1 + \left(\frac{\omega_c}{\omega}\right)^2\right\}} \quad (20b)$$

となる. このように, θ' から θ , $\ddot{x}'$ から $\ddot{x}$ を求めることが可能である. また, 同様に,

$$\Theta' = \frac{\ddot{X}}{g} + \frac{\ddot{X}}{\omega^2 \delta} \quad (21a)$$

$$\ddot{X}' = \delta \omega^2 \Theta + g \Theta \quad (21b)$$

となり,

$$\ddot{X} = \frac{\Theta'}{\left(\frac{1}{g} + \frac{1}{\omega^2 \delta}\right)} \quad (22a)$$

$$\Theta = \frac{1}{(\delta \omega^2 + g)} \ddot{X}' \quad (22b)$$

であるから θ' から $\ddot{x}$, $\ddot{x}'$ から θ を求めることも可能である.

参考文献

- 1) 土木学会構造工学委員会：橋梁振動モニタリングガイドライン, 土木学会, 2000.
- 2) 仁平達也, 小林裕介, 仁平達也, 峯岸邦行, 磯野純治, 仲山貴司：鉄道構造物におけるヘルスマニタリングシステムの開発, 検査技術, 2007.11
- 3) 小林裕介, 三木千壽, 佐々木栄一：FBG 光ファイバセンサによる Weigh-In-Motion システムの構築, 応用力学論文集, Vol.6, pp.1009-1016, 2003.
- 4) 島村誠：鉄道防災, 構造物メンテナンスとモニタリング技術, JREA, Vol.53, No.6, 2010.
- 5) 高木伸也, 村越潤, 麓興一郎, 次村秀毅：部材応力の長期測定による鋼橋モニタリングに関する基礎検討, 鋼構造論文集, 第11巻, 第43号, pp.159-169, 2004.
- 6) 貝戸清之, 松岡弘大, 渡辺勉, 曾我部正道, 藤野陽三：走行列車荷重下における鉄道橋桁の動的応答の特性とその利用, 土木学会論文集 F, Vol.66, No.3, pp.382-401, 2010.
- 7) 吉岡勉, 原田政彦, 山口宏樹, 伊藤信：斜材の実損傷による鋼トラス橋の振動特性変化に関する一検討, 構造工学論文集 A, Vol.54A, pp.199-208, 2008.
- 8) 呉智深, 許斌, 原田隆郎：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.
- 9) Boller, C., Chang, F.-K. and Fujino, Y.: *Encyclopedia of Structural Health Monitoring*, John Wiley & Sons Inc., 2009.3
- 10) 国土交通省：土木・建築にかかる設計の基本, <http://www.mlit.go.jp/kisha/kisha02/13/131021/131021.pdf>
- 11) 野中郁次郎, 竹内弘高, 梅本勝博：知識創造企業, 東洋経済新報社, 1996.3
- 12) 藤本隆宏：能力構築競争 日本の自動車産業はなぜ強いのか, 中公新書, 2003.
- 13) 小林潔司：土木工学における実践的研究：課題と方法, 土木技術者実践論文集, Vol.1, pp.143-155, 2010.3
- 14) 倉田成人：ユビキタス・センサネットワークの建築・都市への応用, 電子情報通信学会, 2007.5
- 15) 新谷昌人, 大久保修平, 大竹雄次：衛星重力ミッション用加速度計開発の現状, 精密衛星測位, 衛星重力観測による地球のダイナミクス研究へのブレークスルー集録, Tokyo, 11-12, November 2003, 東京大学地震研究所, pp.178-186, 2004.
- 16) 奥田賢持：強震観測技術の最新動向と NTT 通信ビルでの強震観測, Annual Report No.20, June 2009, NTT, 2009.6
- 17) 中村豊：3 次元 6 自由度振動台による強震動の再現とさまざまな地震計を用いた計測, 震度計の設置促進と震度データの利用高度化に関するシンポジウム, 2007.
- 18) 杉崎光一, 増井洋介, 堀合聡, 阿部雅人, 阿部允, 島村誠：傾斜センサを用いた洗掘モニタリングシステムの開発, 第14回鉄道力学シンポジウム, 2010.7
- 19) 阿部允, 阿部雅人, 杉崎光一：構造物維持管理マネジメントにおけるモニタリングのコンセプト, 第7回構造物の安全性・信頼性に関する国内シンポジウム, 2011.10
- 20) 杉崎光一, 阿部雅人, 興水聡：加速度計と傾斜計を利用した橋脚の地震モニタリング方法の検討, 第15回鉄道工学シンポジウム, 2011.7
- 21) 杉崎光一, 阿部雅人, 岡本陽介, 鈴木修：常時微動による性能評価に基づく橋脚モニタリング方法の検討, 第16回鉄道工学シンポジウム, 2012.7
- 22) 杉崎光一, 阿部雅人, 興水聡：構造ヘルスマニタリングのための慣性センシングによる傾斜・振動計測法 土木学会論文集 A1, Vol.68, No.1, pp.216-225, 2012.
- 23) 堀合聡, 杉崎光一, 阿部雅人, 阿部允, 増井洋介：変位に着目した鋼鉄道橋のモニタリングに関する基礎的研究, 鋼構造年次論文報告集, 第18巻, pp.595-602, 2010.11
- 24) Abe, M., Sugisaki, K., Hori, A., Abe, M. and Shimamura, M.: Bridge pier scour monitoring using tiltmeter and accelerometer, 5th World Conference on Structural Control and Monitoring, Tokyo, 2010.
- 25) Abe, M. and Shimamura, M.: Performance of Railway Bridges during 2011 Tohoku Earthquake, *Journal of Performance of Constructed Facilities*, ASCE, (in press).
- 26) Sugisaki, K., Abe, M., Abe, M. and Shimamura, M.: Development of health monitoring indicators for steel bridges and its implementation to sensing systems, 5th International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management, IABMAS, Philadelphia, Pennsylvania, 2010.
- 27) Suzuki, O., Masui, Y., Abe, M., Samizo, M. and Shimamura, M.: Development of multifunction scour monitoring device for railway bridge piers, part I-concept and back ground, 4th International Conference on Scour and Erosion, Tokyo, 2008.
- 28) Masui, Y., Suzuki, O., Abe, M., Samizo, M., Furukawa, H. and Shimamura, M.: Development of multifunction scour monitoring device for railway bridge piers, part II-results of field testing, 4th International Conference on Scour and Erosion, Tokyo, 2008.

- 29) Suzuki, O., Abe, M., Shimamura, M. and Matsunuma, M.: The health monitoring system for railway bridge piers, 3rd International Conference on Structural Health Monitoring and Intelligent Infrastructure, Vancouver, 2007.
- 30) 伊丹敬之：経営戦略の論理第3版，日本経済新聞出版社，2003.11
- 31) 川村八郎：ピアノ線式たわみ計の動特性試験，鉄研技術研究所速報，No.79, 1979.7
- 32) D.ウォブシャル著，加藤康雄監訳：電子機器の回路設計センサからディスプレイまでのアナログ，デジタル技術，マグローヒルブック，1985.6
- 33) 田中博文，猿木雄三，清水惇，南木聡明，福山幹康：車上測定データを用いた内軌波状摩耗の検出手法，第14回鉄道力学シンポジウム，2010.7
- 34) 松井邦彦：A - D コンバータ活用成功のかぎ—変換のメカニズムと性能の引き出し方，CQ 出版，2010.8
- 35) 藤岡達也，山本修一：低ノイズ加速度計の開発(JA-40GA)，航空電子技法，No.29，2006.3
- 36) 大崎順彦：新・地震動のスペクトル解析入門，鹿島出版会，1994.5
- 37) Dattor, J.: The Implementation of Recursive Digital Filters for High-Fidelity Audio, The AES 7st International Conference, 1989.5
- 38) 阿部雅人，藤野陽三：不規則外力に対する加速度記録からの最大応答変位推定，土木学会論文集 A, Vol. 66, No.3, pp.477-490, 2010.

(2012. 7. 23 受付)

EVALUATION OF MONITORING SYSTEM SPEC FOR INERTIAL MEASUREMENT OF RAILWAY PIER

Koichi SUGISAKI, Masato ABE and Satoru KOSHIMIZU

To improve the reliability of an inspection of civil structures, the expectation for health monitoring of a structure is growing. To develop a practical health monitoring system, it is necessary to build the system in which not only development of evaluation method but implementable sensor system which include AD converter. However, a monitoring system is developed on a seeds basis in many cases, it is difficult for sensor maker to grasp sensor spec the user expects. In this paper, for development of monitoring system, the required item was arranged and the feature of evaluation criteria was arranged using the actual monitoring data measured by the bridge pier of the railway bridge. Moreover, the example of specification was shown about accuracy or durability in terms of external force to assume or evaluation index. Reliable systems development is expected by the high added value with which the user and the maker were united for develop monitoring system.