

鋼橋支点部アオリモニタリング装置の開発



石澤 俊希*1



今井 勉*2



滝澤 彰宏*3

Development of the monitoring device for clattering at the support of railway steel bridges

Toshiki ISHIZAWA*1, Tsutomu IMAI*2, and Akihiro TAKIZAWA*3

*1 Assistant Chief Researcher, Civil Structure Maintenance Technology Unit of Research and Development Center of JR EAST Group

*2 Division Senior Manager, Civil Structure Maintenance Technology Unit of Research and Development Center of JR East Group

*3 Manager, Civil Structure Maintenance Technology Unit of Research and Development Center of JR East Group

Abstract

Most of the damages of steel railway bridges occur in the support, and it is important for maintenance management to detect the clattering at the support, which causes cracks and bolt loosening. In this study, in order to develop the device that measures the amount of the clattering, we investigated the suitable acceleration sensor and the method for estimating the amount of the clattering and created a prototype monitoring device.

●**Keywords:** Steel bridge, Clattering, Monitoring, Acceleration sensor

*1 JR東日本研究開発センター 土木技術メンテナンスユニット 副主幹研究員
*2 JR東日本研究開発センター 土木技術メンテナンスユニット ユニットリーダー
*3 JR東日本研究開発センター 土木技術メンテナンスユニット マネージャー

1. 緒言

鋼鉄道橋の変状の大半は支点部で発生しており、亀裂やボルト弛緩等に代表される支点部変状の原因となるアオリを早期に発見し、進行状況を把握することは鋼鉄道橋の維持管理において重要である(木下他、2010、岩岸他、2013)。アオリとは、沓座モルタルの劣化や、橋台の沈下、ソールプレートの摩耗等により、桁と支承の間や支承と沓座の間に隙間が生じて列車通過時に支点部が上下に動く現象である。

当社では、橋りょう検査を2年に1回の頻度で実施しているが、アオリの確認は列車通過時に行う必要があるため、時間と労力を要している。また、検査間隔が2年と長いため、検査時に異常がなくても次の検査までにアオリが進行する場合もある。そこで、アオリの進行を簡易に効率的に監視できるモニタリング手法の開発が望まれており、振動発電を活用した研究(吉田他、2014、森井他、2016、2018)やアオリを定性的に捉える検討(栗林他、2014、和泉、栗林、2014)がなされてきた。

本研究では、加速度センサを用いてアオリ量をモニタリングする装置(図1)の開発を目的として、加速度センサの選定、加速度波形の処理方法、ならびにアオリ量の推定手法について検討してきた。本稿では、その概要を報告するとともに、検討手法を実装した鋼橋支点部アオリモニタリング装置(以後、アオリモニタリング装置と略す)を試作して現地計測を実施したのであわせて報告する。

なお、本研究では変位計を使用する手法も検討したが、変位計の場合は不動点と計測点の間隔を測定する方法となり、介在物の混入や固定部の緩み等による計測不良が懸念されたため、加速度センサを選定した。

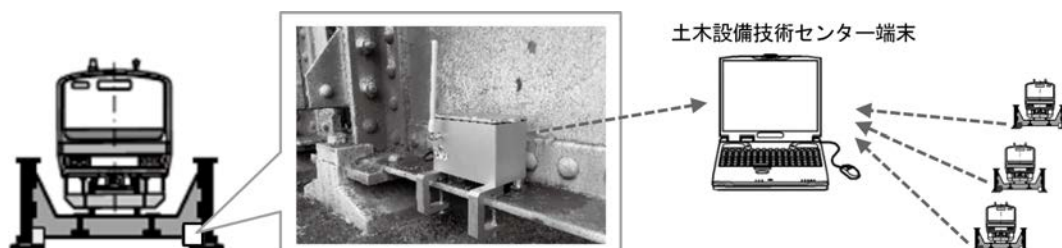


図1 加速度センサを用いた鋼橋支点部アオリモニタリング装置のイメージ

2. アオリ挙動と卓越振動数

営業列車 (M荷重) の車輪間隔を図2に、列車通過時のアオリ挙動 (変位波形) とそのスペクトルを図3に示す。最大の車輪間隔 11.7mに着目し、図3では橋りょうの支間長 11.7m未満と 11.7m以上の2ケースのアオリ挙動を示す。両方とも3つの卓越振動数 (図中の▼) が確認でき、特に1Hz程度の成分が大きい。

なお、支間長 11.7m未満の場合、車輪が桁に載らない時があるためアオリ量が0に戻る状態があり、1Hz未満の低周波成分は少ない。一方、支間長 11.7m以上の場合、車輪が常に桁に載っているためアオリ量が0に戻らず低周波成分が多い。したがって、支間長 11.7m以上の場合、アオリ量を精度よく推定するために1Hz程度以下の低周波成分を考慮する必要がある。

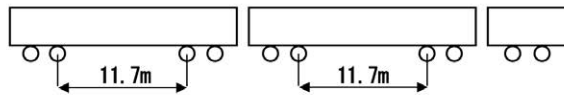


図2 営業列車 (M荷重) の車輪間隔

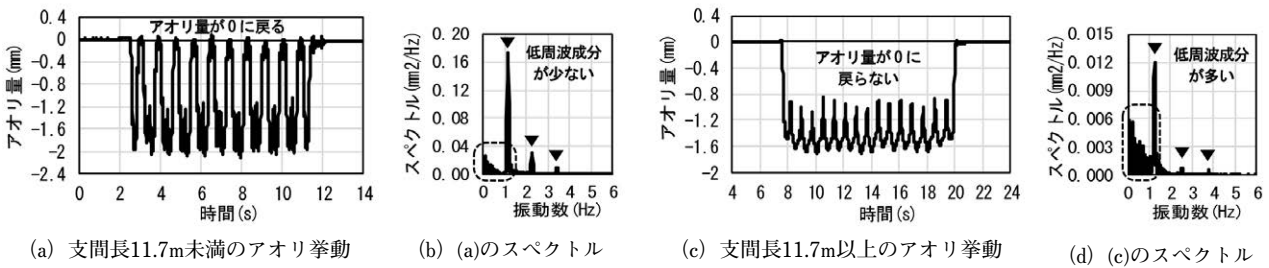


図3 支間長毎のアオリ挙動とスペクトル

3. 加速度センサの選定

3・1 検討方針

市販されている複数の加速度センサについて、メーカーヒアリングやカタログ等を用いた市場調査により、アオリ検知を目的とした加速度センサとしての性能を比較して3種類のセンサを選定する (1次選定)。次に、3種類のセンサを実橋りょうに設置し、加速度の計測結果と変位計によるアオリの計測結果の相関性を比較して、アオリ検知の検討に用いるセンサを1つ選定する (2次選定)。

3・2 1次選定

表1に、市場調査を実施した加速度センサの比較表を示す。本研究では、現場に長期間設置する装置の開発を目的としているため、長期的に安定した計測結果が得られるよう、耐久性が高く、温度依存性が小さい水晶発振式 (以後、水晶式と略す)、圧電式、静電容量式 (以後、静電式と略す) の3種類を選定した。

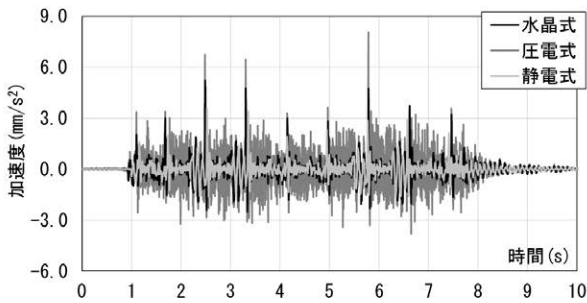
表1 加速度センサの比較表 (1次選定)

	水晶発振式	圧電式	静電容量式	サーボ式	歪ゲージ式	抵抗式	光ファイバ
帯域 (Hz)	DC~数百	1~数十 k	DC~数 k	DC~数百	DC~数 k	DC~数 k	DC~数百
使用温度 (°C)	-40~85	-50~160	-40~125	-20~60	-15~65	-25~75	-20~70
耐久性	◎	◎	◎	○	○	◎	◎
温度依存性	◎	○	◎	○	△	△	△
消費電力	△ 20mA	○ 数mA	○ 数百μA	△ 数十mA	△ 数十mA	○ 数百μA	△ 数百mA
コスト (円/個)	△ 十数万	○ 数万	◎ 数千	△ 30万	○ 数万	◎ 数千	× 数十万
1次選定	○	○	○	-	-	-	-

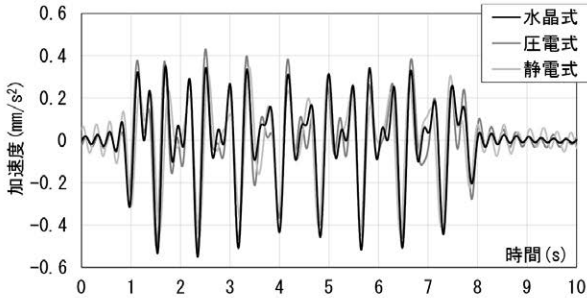
3・3 2次選定

アオリが生じている3橋において、それぞれアオリが大きい1支点とアオリが小さい1支点到3・2で選定した3種類の加速度センサを設置し、計測結果からセンサとしての性能とアオリ検知に対する適応性を検討した。

図4にアオリ量2.9mm(変位計による計測結果)の支点の加速度波形の生データおよび低周波数帯でバンドパスフィルタ処理(以後、BPF処理と略す。詳細な検討は4・3に示す)した加速度波形を示す。(a)の生データはノイズが多く、振幅に違いがみられるが、(b)のBPF処置した加速度波形を比較すると、全てほぼ同様な波形となることが確認できた。次に、図5にアオリ量0.2mm(変位計による計測結果)の支点の加速度波形を示す。BPF処置した加速度波形をみると、加速度振幅は圧電式が大きく、水晶式と静電式が小さかった。なお、加速度スペクトルを比較したところ、アオリ量2.9mmでは、全てのセンサにおいて車輪間隔による3つの卓越振動数が確認できたが、アオリ量0.2mmでは、図6に示すように、水晶式のみで3つの卓越振動数が確認できた。ここで、3つの卓越振動数とは、表2に示す加振間隔と列車速度から算出される値であり、列車速度80km/hの場合は1.1Hz、2.2Hz、3.3Hzの3成分となる。なお、加振間隔は、実橋での計測結果やFEMによる走行解析シミュレーションから算定された値であり、支間長や構造形式によらず、概ね表2に示す値となる。

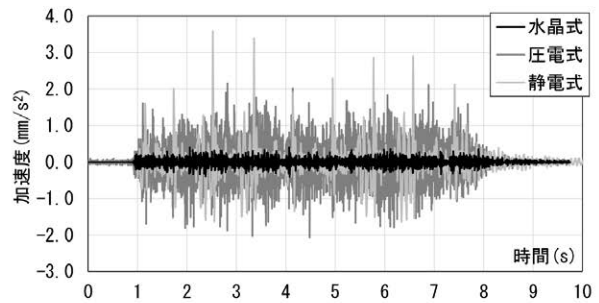


(a) 加速度波形の生データ

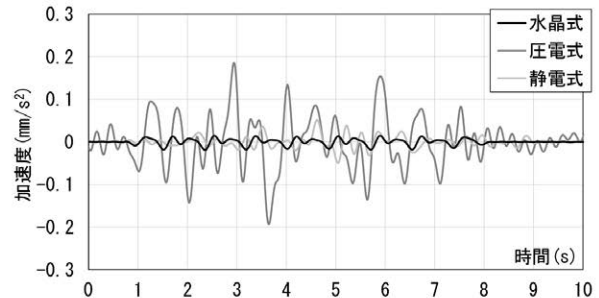


(b) BPF処理した加速度波形

図4 アオリ量2.9mmの支点の加速度波形



(a) 加速度波形の生データ



(b) BPF処理した加速度波形

図5 アオリ量0.2mmの支点の加速度波形

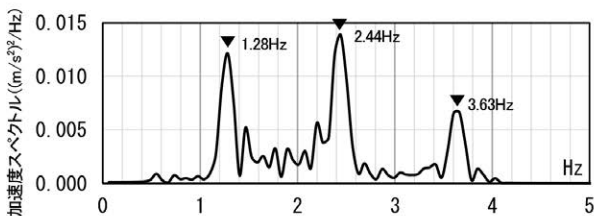


図6 アオリ量0.2mmの水晶式の加速度スペクトル

表2 列車速度と卓越振動数の関係

加振間隔	卓越振動数	
	列車速度 80km/h	90km/h
19.69m	$80 \div 19.69 \div 3.6(\text{単位換算}) = 1.1\text{Hz}$	1.3Hz
10.25m	$80 \div 10.25 \div 3.6(\text{単位換算}) = 2.2\text{Hz}$	2.4Hz
6.74m	$80 \div 6.74 \div 3.6(\text{単位換算}) = 3.3\text{Hz}$	3.7Hz

以上より、アオリが大きい場合は、全てのセンサで3つの卓越振動数を捉えることができるが、アオリが小さい場合は、水晶式のみが3つの卓越振動数を明瞭に捉えることができ、小さな加速度を計測できることが分かった。したがって、加速度センサの性能としては、アオリの大きさにかかわらず、振動を精度よく捉えられる水晶式が優れると考えた。

さらに、アオリ検知に対する加速度センサの適応性については、以下の12種類の指標により検討した。①最大加速度、②最小加速度、③加速度全振幅、④最大速度(1回積分)、⑤最小速度(1回積分)、⑥速度全振幅(1回積分)、⑦最大変位(2回積分)、⑧最小変位(2回積分)、⑨変位全振幅(2回積分)、⑩加速度のRMS(二乗平均平方根)、⑪加速度の等価ピーク($\text{RMS} \times \sqrt{2}$ = ピーク値より)、⑫加速度のFFT面積。なお、速度や変位の算出にあたっては図7に示すように積分する前にBPF処理を実施した。また各指標の算出は、図7の破線で囲んだ波形を用いた。

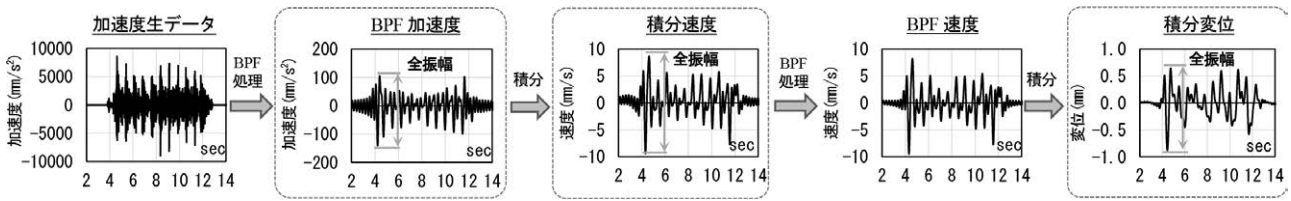


図7 速度・変位の算出方法

図8に3種類の加速度センサにおける各指標の決定係数を示す。全ての指標で水晶式の決定係数が1に近く、アオリ量と相関性が強いことが確認できた。次に図9に結果の一例として、水晶式における速度全振幅と実測アオリ量の関係を示す(ここでは、後述の検討によってアオリ量の指標として選定される速度全振幅の結果を示す)。アオリ量と速度全振幅の相関性が高いことが確認できるが、アオリ量が3mm程度の部分で若干のばらつきがみられた。なお、相関式から離れている支点Aの2点のデータは、貨物列車の通過時の計測結果であった。

以上より、アオリ量を精度よく推定するには、水晶式が最も適していると考えられた。

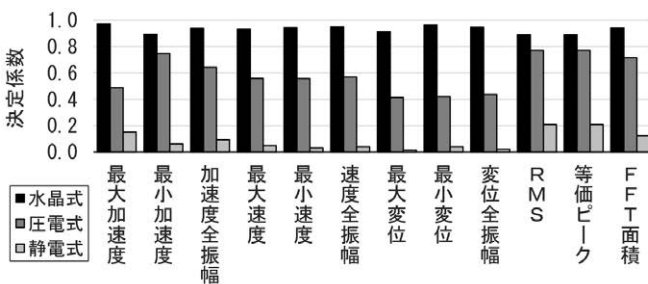


図8 各指標の決定係数(加速度センサの比較)

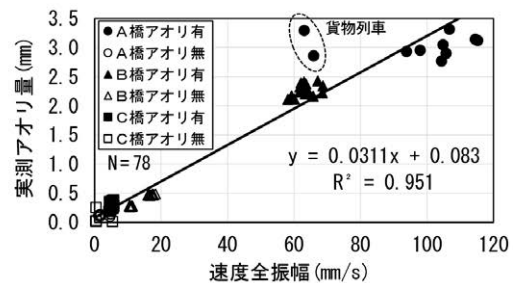


図9 水晶式の数値全振幅の整理結果

4. 加速度波形の処理方法とアオリ量の推定手法

4.1 検討方針

アオリが発生している20橋を対象に、支点部にライナープレートを挿入してアオリ量の変化前後の加速度およびアオリ量を計測し、アオリを推定する加速度の波形処理方法およびアオリ量の推定式等を検討する。なお、加速度センサは前述の検討で選定された水晶式を用いているが、加速度センサの下側に緩衝材を設置して高周波成分をカットするよう改良した。検討にあたっては、まず一般的な指標を対象として、アオリ検知できる可能性がある最適な指標を選定する。次に、その指標を改善してアオリ量の推定精度の向上を検討する。

4.2 現地計測

対象橋りょうにおいて、図10に示すように加速度センサと変位計を設置して列車通過時の加速度と変位を計測した。また、図11に示すように支点部にライナープレートを複数枚挿入してアオリ量を変化させて、その前後で計測を行った。なお、アオリ量としては、沈み込みと浮き上がりの全振幅とし、最大値と最小値の差を用いた。また、貨物列車や複線桁における列車の交差・並走は、営業列車に比べて走行頻度が少ないため対象外とした。



図10 現地計測の状況



図11 支点部へのライナープレートの挿入状況

4・3 BPF処理の検討

加速度センサから得られる加速度波形には多くのノイズが含まれており、アオリ量を精度よく推定するためには、アオリに起因する成分のみを抽出して波形処理する必要がある。そこで、図3(b)(d)や表2に示したように、アオリには3つの卓越振動数があるため、これらを含めた振動数帯を抽出することとした。なお、2.ではアオリ量を精度よく推定するために低周波成分を考慮する必要があることを示したが、0に近い低周波成分には高周波によるノイズが含まれ、積分結果に影響を及ぼすため、抽出範囲の下限値を適切に設定することが重要である。

以上を踏まえて、BPF処理の抽出範囲を複数ケース検討し、最適な抽出範囲を決定した(詳細な結果は製品の情報保護の観点から記述は省略)。なお、振動数が0に近い低周波成分を抽出すると、アオリ量の推定精度が低くなることを確認している。

4・4 加速度の波形処理方法の検討

波形処理方法として、水晶式加速度センサによって得られた加速度波形を低周波数帯でBPF処理し、その加速度波形を積分して速度波形を求め、さらにBPF処理して積分し、変位波形を算定する手法を検討した。図12に、本手法により得られた各指標の決定係数を示す。なお、前述したように、支間長によってアオリ挙動が異なるため、支間長11.7m未満と11.7m以上に分けて指標を算定した。図より、速度全振幅と変位全振幅の決定係数が高いことが確認できる。なお、最小変位の決定係数は比較的高いが、本研究では4・2に記載したようにアオリ量をアオリの全振幅と定義したため、片振幅の最小変位よりも速度全振幅や変位全振幅での評価を優先した。

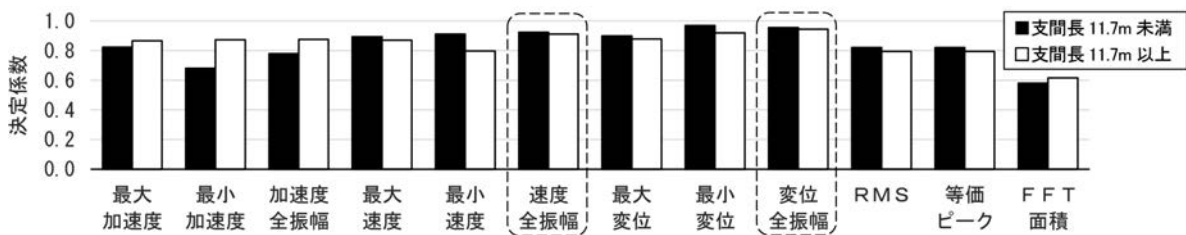


図12 各指標の決定係数

図13に速度全振幅および変位全振幅と実測アオリ量との関係を示す。図中の記号は橋りょう形式を表し、「○」がデッキガーダー、「△」がスルーガーダー、「×」がその他の形式を示す。(c)は精度よくアオリ量を推定できると考えられるが、(a)(b)は実測アオリ量が大きい範囲でばらつきがあり、(d)は実測アオリ量が小さい範囲でばらつきがあった。

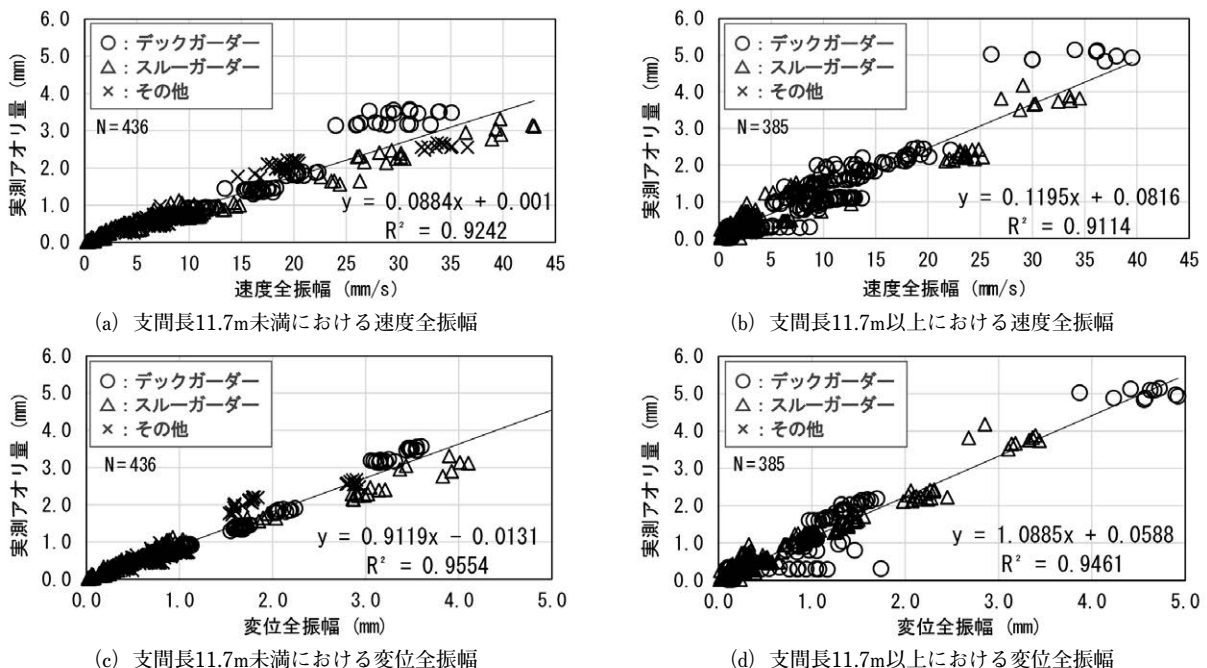


図13 代表的な指標と実測アオリ量の関係

図14に、速度全振幅と変位全振幅の近似式(図13参照)から算定される推定アオリ量と実測アオリ量の比較を示す。図中には45度の実線と±1mmの破線を描いており、45度線に近い程、精度がよいことを示している。(a)の速度全振幅による推定アオリ量は、ある程度の精度はあるものの誤差が1mmを超えるケースが多かった。一方、(b)の変位全振幅による推定アオリ量は精度が高く、誤差は概ね±1mm以内となった。しかしながら、前述したようにアオリが小さい範囲で、誤差が1mmを超えるケースがあった。

ここで、速度全振幅は変位全振幅よりも演算回数が少なく、装置の電池寿命の長期化を見込むことができる。また、速度全振幅は、図13(a)(b)に示すように横軸が「速度」、縦軸が「長さ」の次元であり、異なる次元の値の相関性を検討しているため物理的な根拠がないことから更なる検討の余地がある。そこで、次節では速度全振幅を用いて物理的な意味を持たせた指標を検討する。

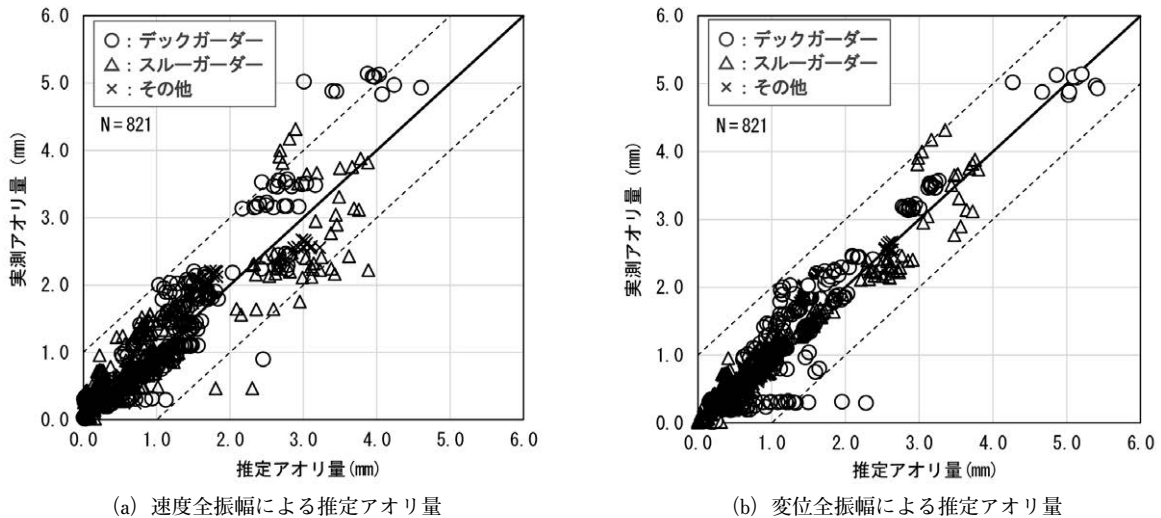


図14 2つの指標による推定アオリ量と実測アオリ量の比較

4・5 速度全振幅を用いた指標の改善

まず、アオリ量とアオリの速度である速度全振幅の物理的な意味について整理する。図15に、整理に用いる記号の説明を示す。アオリ量 δ は、速度と時間の関係から次式となる。

$$\delta = V_{\text{アオリ}} \times \Delta t \tag{1}$$

次に、微小時間 Δt は、列車速度 $V_{\text{列車}}$ に反比例することから次式で表すことができる。

$$\Delta t = K / V_{\text{列車}} \tag{2}$$

ここで、 K は係数を表す。最後に、式(2)を式(1)に代入するとアオリ量 δ は次式となる。

$$\delta = K \times V_{\text{アオリ}} / V_{\text{列車}} \tag{3}$$

したがって、アオリ量 δ は $[V_{\text{アオリ}} / V_{\text{列車}}]$ に比例する1次関数であると考えられ、 $V_{\text{アオリ}}$ は速度全振幅に関連する値であることから、アオリ量 δ は $[\text{速度全振幅} / \text{列車速度} V_{\text{列車}}]$ に比例すると推定される。

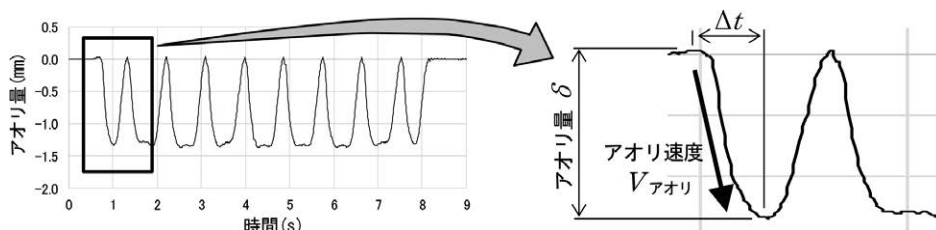


図15 アオリ量と速度全振幅の関係

図16に、新たな指標 [速度全振幅 / 列車速度 $V_{列車}$] と実測アオリ量の関係を示す。新たな指標の決定係数は、図13の速度全振幅や変位全振幅の決定係数よりも1に近く、精度が向上した。図17に、新たな指標による推定アオリ量と実測アオリ量の比較を示す。45度線上に精度よく分布しており、誤差が $\pm 1\text{mm}$ 以内になることが確認でき、[速度全振幅 / 列車速度 $V_{列車}$] は、アオリ量を推定する指標として有用であると考えられる。

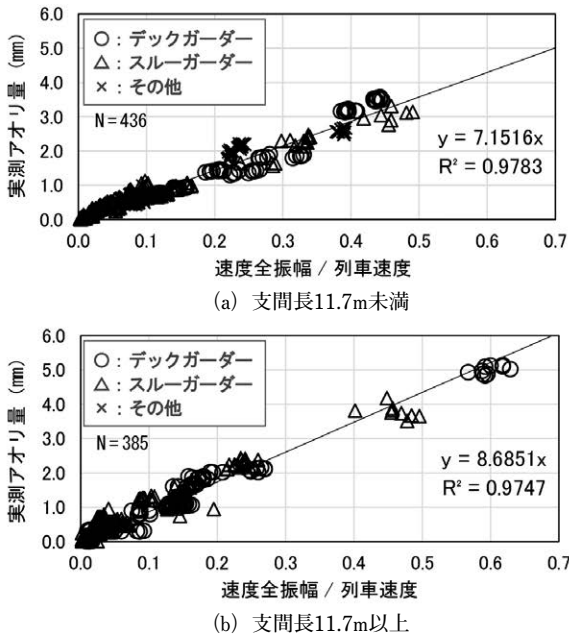


図16 速度全振幅/列車速度と実測アオリ量の関係

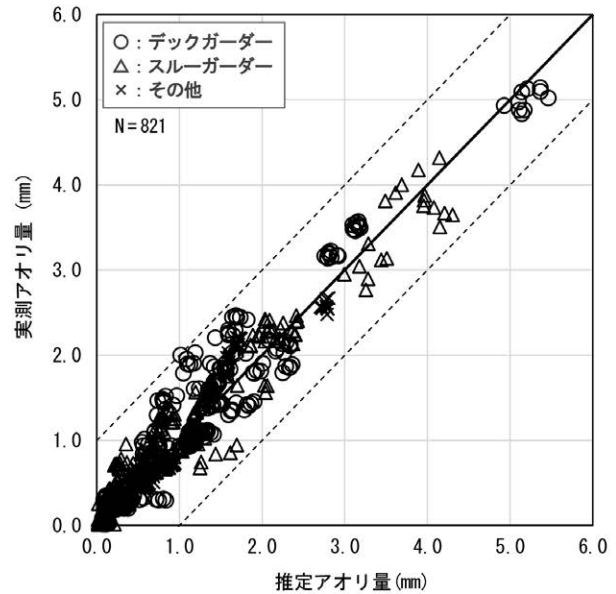


図17 速度全振幅/列車速度による推定アオリ量

5. アオリモニタリング装置の開発

5.1 システム構成

図18にアオリモニタリング装置のシステム構成を示す。アオリが発生している支点部にアオリモニタリング装置を設置して定期的に加速度を計測する。計測頻度は、アオリの大きさや列車本数、線区の重要度等に応じて、設備管理者が監視レベルを定めて適宜設定する。計測時には加速度の他に、時刻や温度、列車通過時間(列車速度の算定に利用)等を記録し、計測後に速度全振幅を演算処理して、クラウドにデータをLPWA(Low Power Wide Area-network:低消費電力・長距離通信)を活用してアップロードする。なお、アップロードするデータは、加速度波形ではなく、速度全振幅等の少量のデータのみとし、消費電力の低減を図る。最後に、クラウドにアップロードされたデータがPCに自動メール送信され、アオリ量を算定してアオリの進行状況を確認できる。

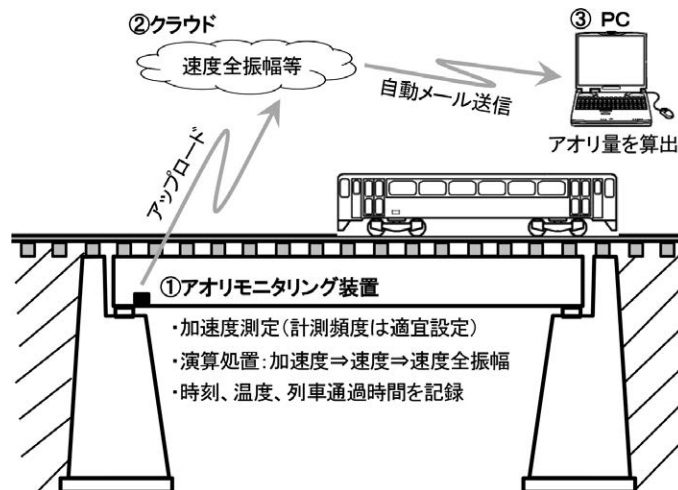


図18 アオリモニタリング装置のシステム構成

5・2 試作機の製作と精度検証

アオリモニタリング装置を試作し、アオリが確認されている7橋において精度検証を実施した。図19にアオリモニタリング装置の試作機を示す。試作機の筐体は、長期屋外設置を考慮してアルミ合金製（表面アルマイト処理）とし防食性を確保した。設置方法としては、強力マグネットによる主桁への接着を基本とした。また安全対策として、ボルト締め機能（移動対策）とワイヤー設置機能（落下対策）を付加した。

図20に試作機による計測結果を示す。計測結果はクラウドを介してメールで受信した速度全振幅を用いて算定した結果である。4・5で検討した手法と同様に誤差は±1mm以内であり、モニタリング装置としては十分な精度を有していると考えられる（既往検査結果より、アオリ量3mm程度以上をAランクと判定するが多い）。

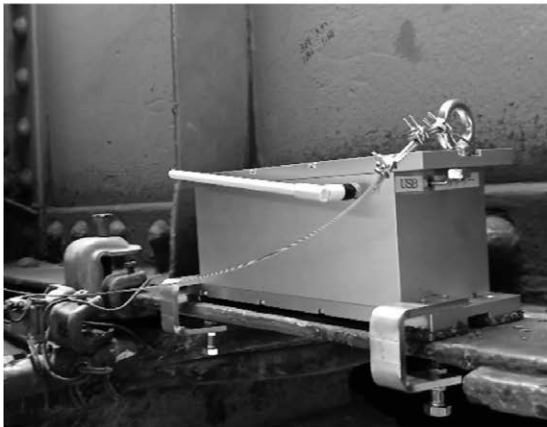


図19 アオリモニタリング装置の試作機

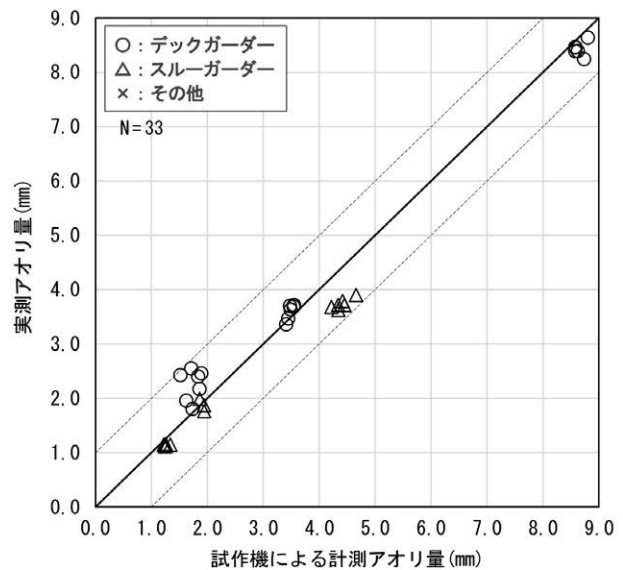


図20 試作機による計測結果

6. 結言

本稿では、橋りょう支点部に設置した加速度センサから得られる値を用いてアオリ量を推定する手法を提案した。また、その手法を搭載したアオリモニタリング装置を試作して、現地検証により精度を確認した。今後は、現場社員の利便性に配慮したインターフェイスについて検討する予定である。

最後に、本研究の現地計測や検討にあたり、JR東日本コンサルタンツ株式会社、セイコーエプソン株式会社、長野計器株式会社の方々には多大なるご協力とご助言をいただきました。心より感謝いたします。

参考文献

- 木下一孝、志子田勝、阿部嘉貴、ライナープレート挿入による簡易的な鋼橋長寿命化措置とその効果の検証、第65回土木学会年次学術講演会、I-194 (2010)
- 岩岸現、小林亜沙子、高橋武志、支点部にアオリが発生した鋼橋の変状と対策について、第40回土木学会関東支部技術研究発表会、第VI部門 (2013)
- 吉田善紀、小林裕介、内村太郎、鋼鉄道橋の振動発電を利用したモニタリングシステムの開発、土木学会論文集A1、Vol.70、No.2 (2014)、pp.282-294
- 森井広樹、中村大輔、齊藤岳季、振動発電を用いたアオリ検知装置の開発、鉄道技術連合シンポジウム講演論文集、第23巻 (2016)
- 森井広樹、齊藤岳季、中村大輔、振動発電を用いた鋼橋アオリ検知装置の実橋計測結果について、第73回土木学会年次学術講演会、CS9-015 (2018)
- 栗林健一、露木寿、堀山功、中尾寿朗、鉄鋼支点沈下のモニタリングシステム構築にむけた検討、第68回土木学会年次学術講演会、VI-070 (2014)
- 和泉大祐、栗林健一、鉄道鋼橋の支点部における異常検知指標の検討、第69回土木学会年次学術講演会、VI-465 (2014)