

高速カメラを用いた低周波振動源検出に関する検討

A Study on Detection of Low-frequency Vibration Sources Using High Speed Camera

辻徳生^{*}, 鍵村俊哉^{**}, 由良慎弥^{***}, 中村秀治^{****}

Tokuo Tuji, Syunya Kagimura, Shinya Yura, Hideharu Nakamura

^{*}工博, 研究員, 産業技術総合研究所 (〒305-8568 茨城県つくば市梅園1-1-1)^{**}工修, 広島大学大学院, 工学研究科 (〒739-8527 広島県東広島市鏡山1-4-1)^{***}広島大学大学院, 工学研究科 (〒739-8527 広島県東広島市鏡山1-4-1)^{****}工博, 広島大学名誉教授, 工学研究科 (〒739-8527 広島県東広島市鏡山1-4-1)

We have been faced with the low-frequency noise problem as one of the environmental problems. It is important to locate a sound source precisely and effectively to decrease the low-frequency noise. Since the field measurement of the low-frequency noise is not easy because of the wind and various disturbances, the new measurement technique to obtain data with high accuracy is necessary. The purpose of this study is to develop a detection system of the low-frequency noise source using hyper-vision technology. It is confirmed that applicability of hyper-vision technology is promising to detect the low-frequency noise source.

Key Words : *high-speed camera, low-frequency noise, hyper-vision technology*

キーワード: 高速カメラ, 低周波騒音, 高速ビジョン技術

1. 背景・目的

環境問題の一つとして, 低周波騒音によって引き起こされる体調不良の問題が認識されている。低周波騒音は車両の走行やこれに伴う橋梁の振動, あるいは河川の流れや水門扉の越流によっても発生し, また, 工場や大型店舗の周辺では回転機器の振動が原因となることもある。低周波騒音は明瞭には聞き取れないことも多く, 住民は原因がよく分からないまま不眠や頭痛, イライラ感などの不調を訴えることになる¹⁾。

これに対し従来より, 低周波音圧レベル計などを用いて騒音源を特定しようとする試みがなされている。すなわち, 騒音源と予想される構造物の壁などにマイクロホンに向けて, 計測した放射音の音圧レベルが或る程度以上大きければ, その壁が騒音源であると特定するのである。工場のように騒音源となり得る機器が多数存在する場合, マイクロホンによる計測結果から騒音源を探索するためのシステムが記載されており, 一般に低周波音の指向性が低いことを考慮して, 計測結果から騒音の到来する方向を推定するための様々な手法が示されている²⁾。

しかしながら, 上記のように対象物からの放射音をマイクロホンで計測する際には, 周囲の音の影響を避けるため, 接近しなければならないが, 橋梁や河川の流れのように十分近づけないことも多い。さらに風による影響

も考慮すれば, そもそもマイクロホンによる計測は騒音源の特定に適したものではないとも考えられる。以上の点に鑑みて, 本論文は野外においてある程度離れた位置からでも騒音源を容易に特定することのできるシステムを提案し, その適用性を明らかにすることを目的としている。

具体的には, 騒音源と思われる対象物にレーザー光を投射し, 形成される輝点を高速カメラで撮影し, その撮像データから対象物の振動状態を検出し, これを解析して表示することにより, その対象物の振動が騒音の原因であるかどうかを判定するものである。

サンプリング定理によれば, 目的信号の情報が失われないために, 少なくとも目的信号の周波数の2倍の周波数で計測する必要があるが, 高周波成分を分離し, 誤差を補償するためには, 更に高い周波数での計測が望ましく, 100 (Hz)以下の低周波騒音源の計測と言えども高速カメラが必要である。そこで本論文では, 文献 10), 11) に示された高速ビジョン技術で開発された高解像度高速カメラを活用し, 併せて, 市販のポータブル高速カメラを活用して, 騒音源の検出への適用性を検討している。

以下, 2 章において低周波騒音源検出システムの概要と計測データの処理方法について述べ, 3 章でその計測性能と限界について明らかにすると共に, 4 章で実際の水圧鉄管を対象とした実環境計測の結果について述べ, 本低周波騒音源検出方法の有効性を明らかにする。

2. 低周波騒音源検出システム

2.1 計測装置

計測装置としては 2 種類の高速カメラ、レーザー光源、カメラとレーザー光源の固定用治具を使用した。これら計測装置の性能の概要を以下に示す。

1) 高解像度高速カメラ(VC：高速ビジョンカメラ)

- ・ 1024×1024 (pixels) 最大 1000 (fps:frame per second)で撮影可能。本計測においては 250(fps)で撮影。
- ・ 焦点距離 50 (mm)で固定。
- ・ 外部電源、外部装置(PC)が必要で計測装置が大がかりになる。

2) ポータブル高速カメラ(HSC：市販の高速カメラ)

- ・ 画素と fps の関係は以下の通り。
1200 (fps) (336×96 pixels), 600(fps) (432×192 pixels),
300 (fps) (512×348 pixels), 30 (fps) (1920×1080 pixels).
本計測においては 300 (fps)で撮影。
- ・ 焦点距離は可変 (7.3～87.6 (mm)：35(mm)フィルム換算 36～432 (mm)相当)。
- ・ 外部電源および外部装置が不必要、持ち運びに便利。

3) レーザー光源

- ・ 波長 635 (nm), 出力電力 15 (mW)のものを用いており、スリットを用いて 19×19 の格子状に分光可能。分光された光の角度は 0.72°。

2.2 計測手順

上記計測装置を使用した計測手順を以下に示す。

- ① 分光したレーザー光を計測対象面に照射し、標点を作り出し、その標点の時刻歴応答を高速カメラを用いて斜め横方向から計測する。
- ② 高速カメラによる画像データを使用し、画像上の標点の(X, Y)座標の値を取出す。取出された(X, Y)座標値から実空間の(x, y, z)座標を求め、パネル面に対して直角方向の変位（以下、垂直変位）を求める¹²⁾。
- ③ ②で求めた複数点の垂直変位の時刻歴波形に対して固有直交関数展開¹³⁾を用いて、寄与率と固有ベクトルを求める。
- ④ 各点の垂直変位と固有振動モードを用い、垂直変位を n 次までの固有振動モードの変位の和に分解し、 n 次固有振動モードの垂直変位を求める。
- ⑤ n 次固有振動モードによる垂直変位の時刻歴波形について高速フーリエ変換を行い、スペクトルを求める。スペクトルピークが表れた振動数を n 次固有振動数とする。

以上の手順で計測対象面の固有振動数を求め、低周波騒音源の検出を行なう。

2.3 3次元座標位置の算出

計測対象面に照射した標点の 3 次元座標の算出方法を文献¹²⁾に従って、以下に示す。

図-1は計測装置と計測対象の位置関係を示す。図-1において、点Aは高速カメラの焦点位置、点Bはレーザーのスリット位置、点Cは高速カメラとレーザーの視線方向の交点、点Dは対象面上の点である。図-1において、 c は高速カメラとレーザー光源間の距離、 α は高速カメラとレーザーのなす角、 β はレーザーと高速カメラのなす角である。また、レーザーとカメラに対し、視線方向に垂直な図中のような仮想面を考える。高速カメラとレーザーは同一平面上に設置し、 c 、 α 、 β の一辺両端角が既知であるので視線方向の点Cが決定され、同一平面上で三角形ABCが決定される。このとき、カメラとレーザー光源の仰角はゼロとする。

高速カメラの画像面座標系における点GのX, Y座標をXL, YL, レーザーの仮想面座標系における点Hの座標をXR, YR とする。高速カメラの画像面上とレーザーの液晶面上における計測対象面上の点Dの位置である点G, Hの座標(XL, YL), (XR, YR) が分かれば、点Cを原点としたときの点Dの座標、すなわち計測対象面の任意の点での座標が求まることになる。したがって、高速カメラの画像面とレーザー光源の仮想面における同一点を正確に決定することができれば、撮影された計測対象面の3次元座標を算出することができる。

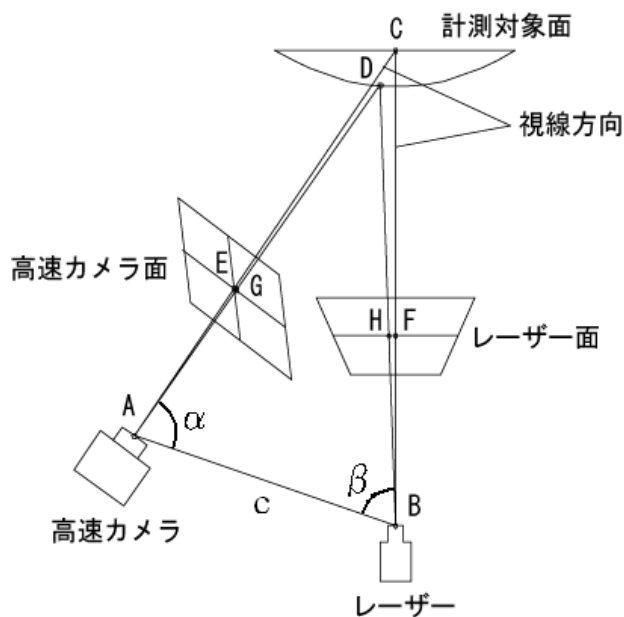


図-1 計測方法と計測装置の位置関係

2.4 固有直交関数展開

周知の通り，固有直交関数展開は構造物の時刻歴変位 $p(x, y, t)$ が与えられたとき，確定的関数 $\phi(x, y)$ への $p(x, y, t)$ の投影が最大となるものを捜す．これは固有値問題に帰着し，

$$\iint R_p(x, y, x', y') \phi(x', y') dx' dy' = \lambda \phi(x, y) \quad (1)$$

となる．ここで，

$R_p(x, y, x', y')$ ：動的変位 $p(x, y, t)$ の空間相関である．

$dx \times dy$ が長方形領域で一様に分布し，M個の点での動的変位が得られている場合，式(1)はマトリクス形式に置き換えることができ，

$$[R_p] \{\phi\} = \lambda \{\phi\} \quad (2)$$

となる．ここで，

$[R_p]$ ：動的変位の空間相関マトリクス

$\lambda, \{\phi\}$ ：空間相関マトリクスの固有値と固有ベクトル

である．

また，元の動的変位の分散に対する m 次の基準座標の分散の比を“寄与率” C_m と定義すれば，

$$C_m = \frac{m \text{ 次 規 準 座 標 } a_m(t) \text{ の 分 散 }}{\text{元 の 動 的 変 位 の 分 散}} \quad (3)$$

$$= \frac{\lambda_m}{\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n}$$

である．

3. 低周波騒音源検出実験

3.1 振動モード計測実験

まず，本計測方法の計測性能と限界について明らかにするため，以下に示す装置を用いて室内実験を行った．

図-2 に本実験で用いたパネル模型とスライダを示す．パネル模型は $450 \times 300 \times 2$ (mm) の PET 樹脂板の両端を $50 \times 320 \times 3$ (mm) の L 字型のジュラルミン材で挟み，更にその L 字型のジュラルミン材を $600 \times 180 \times 3$ (mm) のジュラルミン板に下部で固定したものである．PET 樹脂板の比重は 1.27 で軽量である．

スライダは模型を加振するための装置 (0~50 Hz) で，スライダ自体の質量は 13(kg) (内 2(kg) は可動部) である．また，図-3 に計測装置固定治具を示す．固定治具はレ

ーザー光源と高速カメラ間の距離を 400mm に固定できるようにしたもので， $60 \times 500 \times 5$ (mm) の鋼板を三脚に固定したものである．

図-4 に実験状況図，図-5 に計測装置と計測対象の配置図を示す．高速カメラとレーザー光源は固定用治具に固定し，高速カメラの撮影角度 α ，レーザーの照射角度 β は任意に設定することができる．

実験模型のパネル部分にレーザー光を照射し，高速カメラを用いて 1000 枚程度の画像に標点を撮影した．高速カメラは，2.1 に示した 2 種類の高速カメラを用いた．

加振条件は，

- (1) パネル模型中央部を軽く打撃して，パネルを自由振動させる場合
- (2) スライダによりパネル模型に強制振動(正弦波加振：12, 20, 28Hz)を与える場合

の 2 種類として，各々に対する計測を行った．



図-2 実験模型と加振装置 (スライダ)



図-3 固定用器具



図-4 実験状況

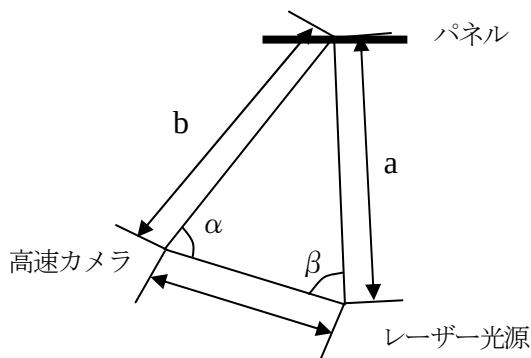


図-5 模型と計測装置の配置図

3.2 計測精度に関する実験結果

(1) 計測可能性に関する検討

高速ビジョンカメラを使用し、自由振動させた場合のパネル中央上部の点のパネル面に対して垂直な方向への変位計測の一例を図-6に示し、1次の固有振動モード及び寄与率を図-7に、スペクトル解析結果(1次～3次固有振動)を図-8に示した。他の打振結果等からも、1次～3次固有振動数が各々、20.5、28.3、52.7Hzであることを確認した。

さらに、パネル面に対し垂直な方向に強制振動させた場合のパネル中央上部の点の垂直方向変位計測の一例を図-9(加振周波数：12、20、28Hz)に、加振周波数における振動モード図及び寄与率(加振周波数：12、20、28Hz)を図-10に、スペクトル解析結果(加振周波数：12、20、28Hz)を図-11に示した。

これらの結果より、パネル模型の垂直変位が十分計測でき、固有振動モードおよび寄与率が計測できること、その固有振動モードの時刻歴波形から固有振動数が求められることがわかる。以上の結果より、本研究で使用した計測装置で低周波騒音源の検出が十分可能なことを確認することができた。

本論文では、加速度計などの他のセンサを用いて精度の検証を行っていないが、文献 11)において加速度計と振動台の情報を用いて画像計測の精度を確認している。

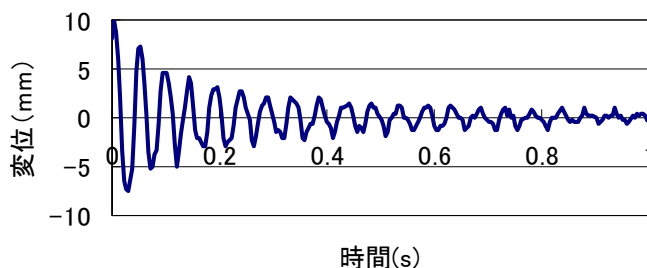


図-6 自由振動時のパネル中央上部の垂直方向変位(VC)

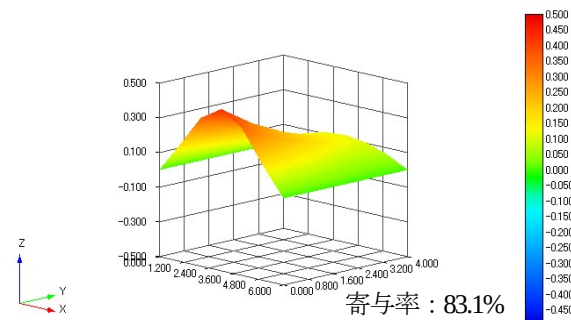


図-7 自由振動時の1次固有振動モードと寄与率(VC)

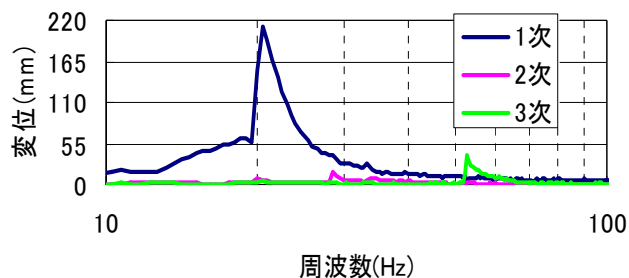


図-8 自由振動時のスペクトル解析結果(VC)

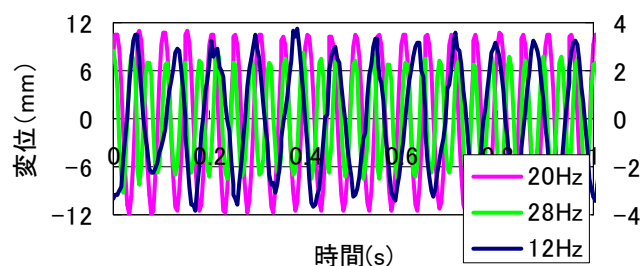


図-9 強制振動時のパネル中央上部の垂直方向変位(VC)

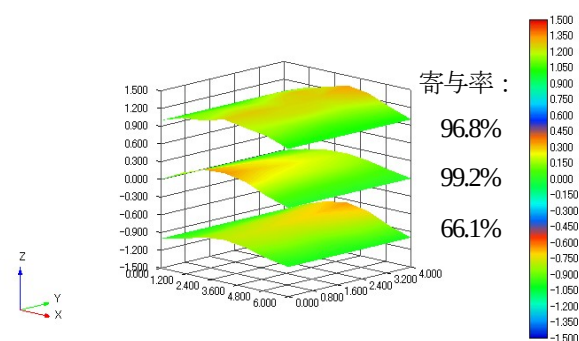


図-10 強制振動時の加振周波数の振動モードと寄与率 (VC) (上から加振周波数 12, 20, 28Hz)

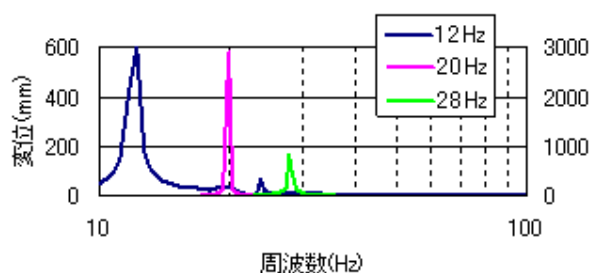


図-11 強制振動時のスペクトル解析結果 (VC)

(2) 計測精度に関する検討

前述の通り、解像度の高い高速カメラ(VC)で原理的に計測可能なことを確認したので、続いて、解像度が相対的に低いポータブル高速カメラ(HSC)を用いて計測精度の検証を行った。画像計測においてノイズは、輝度の量子化誤差、外乱光による画像輝度のばらつきにより引き起こされる。

(1)の室内実験(強制振動)での計測装置とパネル模型との距離、スライダの振幅、スライダの周波数をそれぞれ変化させて、変位と固有周波数の計測精度を確認するための実験を行った。

精度確認に関する実験は 36 ケースで行った(表-1 参照)。精度に関する実験結果のうち、ノイズが最も目立たない計測時の振動波形、スペクトル解析結果を図-12、図-13、ノイズが目立つ計測時の振動波形、スペクトル解析結果を図-14、図-15 に、実験結果をまとめたものを表-1 に示す。表中の SN 比とは、信号の強さとノイズの強さの比で、値が大きいほど雑音の影響が小さいことを表す。

表-1 において、最大全振幅がスライダの全振幅よりも小さい場合があるなど、値が一致していない。これはキャリブレーション誤差が原因であると考えられる。また、図-14 のようにノイズにより振幅が増大するため、最大全振幅がスライダの全振幅よりも大きくなる場合もある。しかし、おおむね一致し、大きなずれはないことが確認できる。計測面と計測装置の距離が近いほど変位の SN 比が大きいこと、また、スライダの全振幅が 1mm の場合に SN 比が小さい場合があることがわかる。

図-12、図-13 より、計測された変位が sin 関数を描いていることがわかり、スペクトルピークもよくで

いることがわかる。また、図-14、図-15 より、計測された変位波形を見れば明らかな通り、ノイズが目立っていることがわかる。しかし、全体的に一定の周期で振動していることもわかる。さらに、スペクトル解析結果からも、スペクトルピークはでており、固有周波数の計測が可能であることがわかる。

以上より、変位計測精度がある程度悪くても、周波数の計測は可能であり、計測対象面と計測装置の距離が 1500(mm)離れ、計測対象面が全振幅 1(mm)で振動している場合の周波数は計測可能であることがわかる。

比較のために、高解像度高速カメラ(VC)による計測で、最もノイズが顕著な振動波形、スペクトル解析結果を図-16、図-17 にしめす。HSC よりも精度が高く振動波形が容易に確認できる。

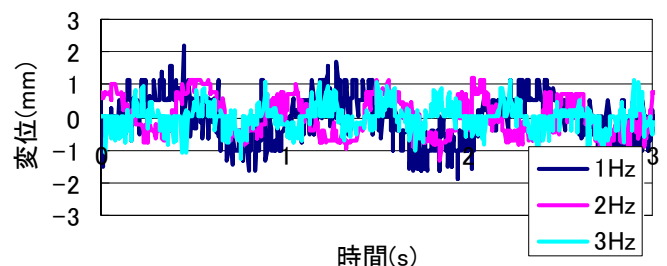


図-14 1500mm-1mm で計測された振幅(HSC)

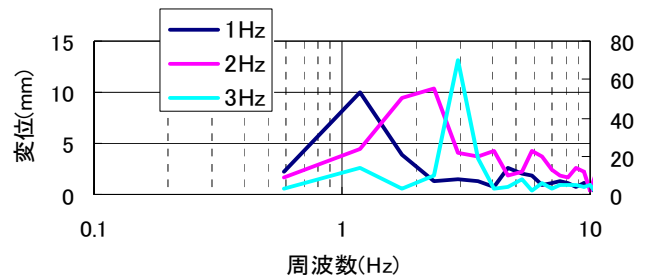


図-15 1500mm-1mm のスペクトル解析結果(HSC)

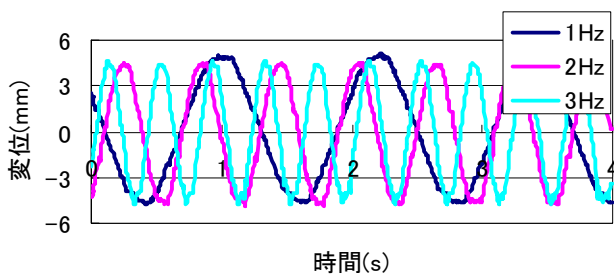


図-12 500mm-10mm で計測された振幅(HSC)

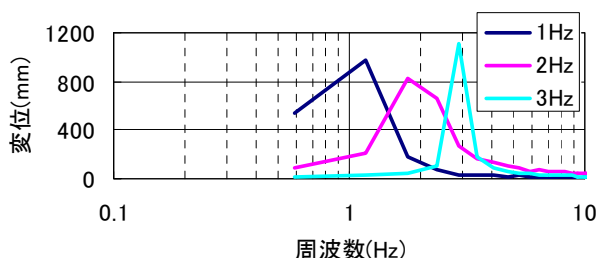


図-13 500mm-10mm のスペクトル解析結果(HSC)

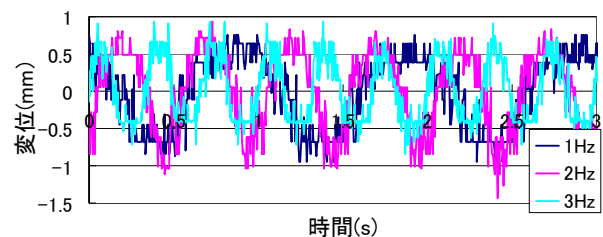


図-16 1500mm-1mm で計測された振幅(VC)

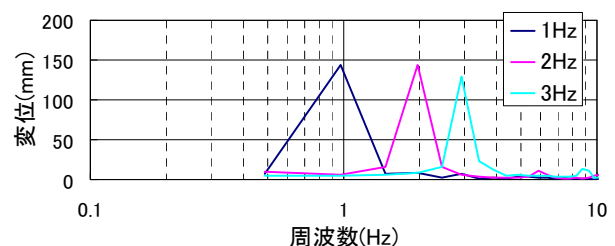


図-17 1500mm-1mm のスペクトル解析結果(VC)

表－1 計測精度に関する実験結果

レーザーと計測面の距離	スライダの全振幅	スライダの周波数	最大全振幅 (mm)	SN比(dB)
500mm	1mm	1Hz	1.177	14.3
500mm	1mm	2Hz	1.279	
500mm	1mm	3Hz	1.092	
500mm	3mm	1Hz	3.005	13.1
500mm	3mm	2Hz	3.019	
500mm	3mm	3Hz	3.194	
500mm	5mm	1Hz	5.081	10.0
500mm	5mm	2Hz	4.862	
500mm	5mm	3Hz	5.048	
500mm	10mm	1Hz	9.856	8.2
500mm	10mm	2Hz	9.323	
500mm	10mm	3Hz	9.464	
1000mm	1mm	1Hz	1.836	1.3
1000mm	1mm	2Hz	1.879	
1000mm	1mm	3Hz	1.783	
1000mm	3mm	1Hz	3.234	7.6
1000mm	3mm	2Hz	3.138	
1000mm	3mm	3Hz	3.087	
1000mm	5mm	1Hz	5.307	5.0
1000mm	5mm	2Hz	7.119	
1000mm	5mm	3Hz	5.221	
1000mm	10mm	1Hz	8.967	4.9
1000mm	10mm	2Hz	9.057	
1000mm	10mm	3Hz	9.227	
1500mm	1mm	1Hz	4.308	-1.8
1500mm	1mm	2Hz	2.563	
1500mm	1mm	3Hz	2.441	
1500mm	3mm	1Hz	4.795	10.5
1500mm	3mm	2Hz	4.310	
1500mm	3mm	3Hz	4.756	
1500mm	5mm	1Hz	6.355	5.5
1500mm	5mm	2Hz	6.811	
1500mm	5mm	3Hz	6.050	
1500mm	10mm	1Hz	11.758	4.9
1500mm	10mm	2Hz	11.373	
1500mm	10mm	3Hz	14.028	

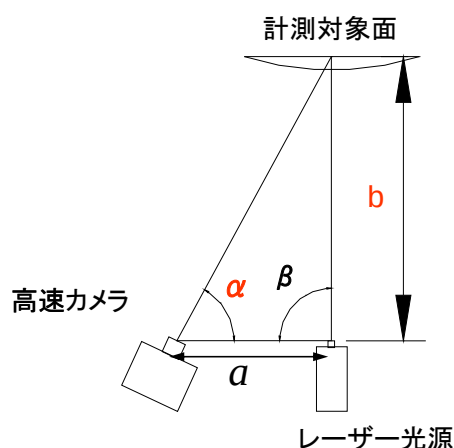
3.3 計測限界に関する実験結果

高解像度高速カメラ（VC）を用いて、本実験では計測対象面と計測機器の位置関係に着目し、図－18 に示す計測対象面とレーザー光源間距離 b を変化させて実験を行った。 b は 500(mm)から 500(mm)間隔で増加させ、高速カメラの撮影角度 α は $45^\circ \sim 85^\circ$ 間で 5° 間隔で変化させた。 β は常に 90° である。スライダに 2(mm)の全振幅を与え、20(Hz)で振動させ、250 (fps)で撮影した場合のそれぞれの場合の計測結果を比較し、計測精度の違いを検証した。

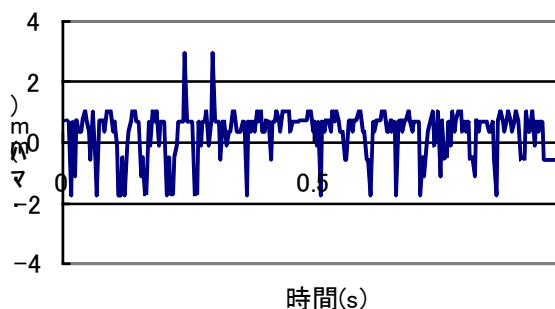
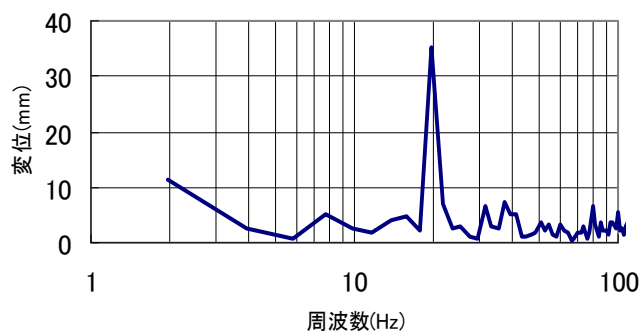
$\alpha=80^\circ$ ， $b=4000(\text{mm})$ の場合のパネル中央上部の点の垂直方向変位の振動波形と振動数のスペクトル分布を図－19、図－20 にそれぞれ示す。振動波形は明確ではないが周期性がみられ、スペクトルピークが 20(Hz)で最も大きくなっているのが、測定可能であるといえる。次に、 $b=4500(\text{mm})$ の場合の振動波形と振動数のスペクトル分

布を図－21、図－22 に示すが、波形は細かく振動しており、スペクトルの値が極端に小さくなり明瞭なピークが見出せないため、振動数は特定不可能である。同様の検討により、 b が 4000(mm)を超えていても固有振動数を特定できた場合もあったが、本実験条件下における計測結果の信頼性は低いと考えられる。それに対して、 $b=4000(\text{mm})$ 未満のケースについては、問題なく振動数を特定できた。

従って、本実験に用いた装置の使用に限り、またレーザー光源は分光させて用いる場合、計測対象までの距離は 4 (m)程度を限界として、振動モードおよび周期は計測可能と考えられる。



図－18 計測装置の位置関係

図－19 $b=4000\text{mm}$ の場合の振動波形図－20 $b=4000\text{mm}$ の場合のスペクトル解析結果

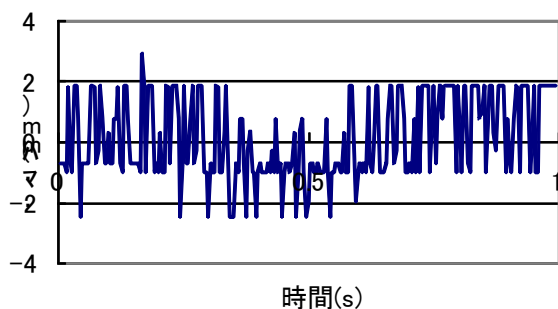


図-21 $b=4500\text{mm}$ の場合の振動波形



図-22 $b=4500\text{mm}$ の場合のスペクトル解析結果

4. 実環境計測

図-23 に示す O 発電所の水圧鉄管を対象として実環境計測を行った。水圧鉄管においては、水車発電機の回転数と水圧鉄管自体のオーバル振動の固有周期が極めて近接したときに、顕著な揺れを生じることがある(図-26)。過去の事例によれば、通常 7~8 (Hz)での振動例が大部分で低周波振動に類するが、鉄管自体の疲労損傷防止の視点で、簡易な実環境計測技術の必要性は高い¹⁴⁾。

本計測では、前記の高速ビジョンカメラ(VC)、ポータブル高速カメラ(HSC)の2種類のカメラと、室内実験に用いたレーザー光源を使用した。計測の際のレーザー光の照射状況を図-24 に示す。

水圧鉄管の計測箇所は、まず目視で振動の確認される断面を抽出し、抽出された同一断面において、

- (1) 上面 (天端)
- (2) 側面
- (3) 下斜め 45°

の3点について行った(図-25)。

2種類の高速カメラにより計測された上面の垂直変位波形を図-27、スペクトル解析結果を図-28、側面の垂直変位波形を図-29、スペクトル解析結果を図-30、下斜め 45° の垂直変位波形を図-31、スペクトル解析結果を図-32 に示す。また、その結果をまとめたものを表-2 に示す。



図-23 O 発電所水圧鉄管の全景



図-24 レーザー光の照射状況

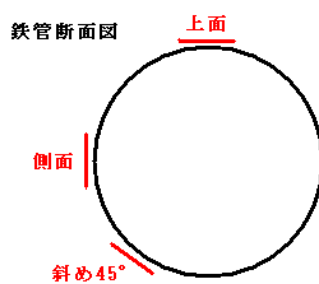


図-25 計測位置

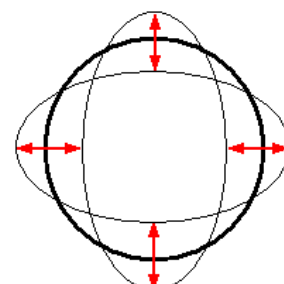


図-26 オーバル振動

図-27~図-32、表-2 より、上面と側面の振動の変位が全振幅で 1(mm)程度ある場合は高速ビジョンカメラ、市販の高速カメラの両カメラとも鉄管の測定面に垂直な方向への振動が十分計測でき、周波数についても求められることがわかった。また、振動変位が全振幅で 0.5mm 以下程度で小さい下斜め 45° の計測では、両カメラとも振動波形に細かなノイズが入っており、寄与率も低く、計測精度が悪いことがわかる。しかし、スペクトルピークは十分でており、周波数は計測可能

であることがわかる．これにより高速カメラについては，いずれのカメラともに低周波振動計測に適用可能といえる．

画像計測においては，空間分解能の限界と外光による輝度の変化や追跡点が一部かけてしまうなどの要因が精度に影響する．特に HSC の計測結果に関しては，VC と比較して空間的な分解能が低く，レーザ光の反射光がかけてしまうなどの要因により，振幅にも不連続なスパイクノイズが出ている．しかし，時間方向で情報量が増えるため，特定の周波数を導き出すことができ，ノイズが多くても周波数を求める事ができる．また，振動モードの結果から測定面内は一様に振動していることが確認できた．振動周波数のピークは，6.84～7.32 の間にあると推定される．周波数分解能により，周波数ピーク値は厳密には一致しない結果となったが，ほぼ同一の値となったことが確認できる．

計測対象の水圧鉄管は上面と側面で全振幅 1～1.5 (mm) 程度，斜め 45° で全振幅 0.5 (mm)程度の変位が生じ，7 (Hz)程度の周波数で振動していることがわかった．上面，側面の振幅が大きく，斜め 45° の振幅が小さいことから，この鋼管は図-26 のようなオーバル振動をしていると推定できる．

なお，実環境計測においては，次のことが言える．

- (1) 直接太陽光が計測対象に当たる場合は，レーザー光による標点の識別が難しくなるので，ワット数の大きな光源を用いるか，日陰にするか，夜間など日の当たらない時間に計測する必要がある．
- (2) 高速カメラについては，外部電源および外部装置が不必要なポータブル型の利点は大きい．

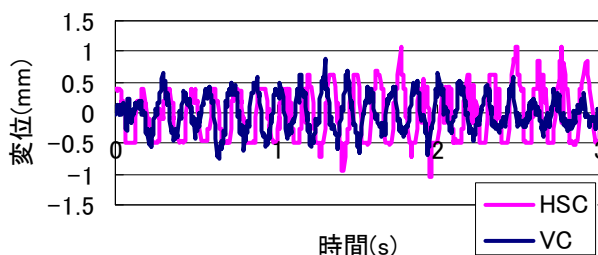


図-27 上面のカメラによる計測変位

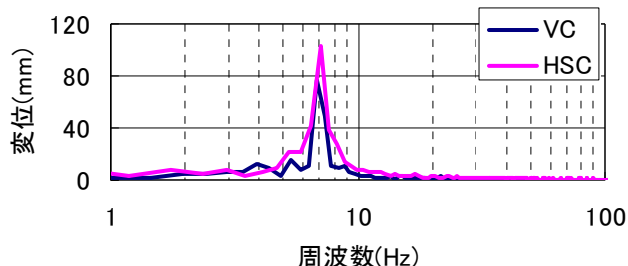


図-28 上面のスペクトル解析結果

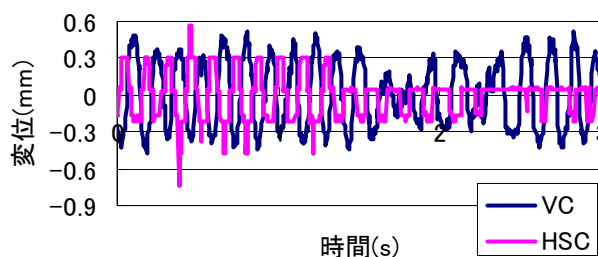


図-29 側面のカメラによる計測変位

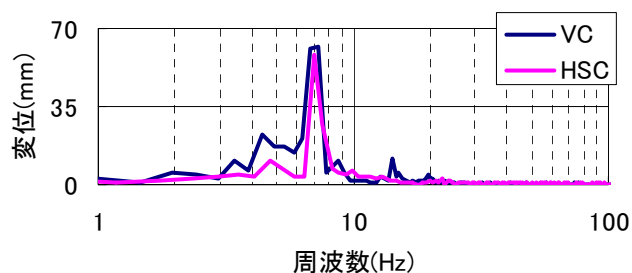


図-30 側面のスペクトル解析結果

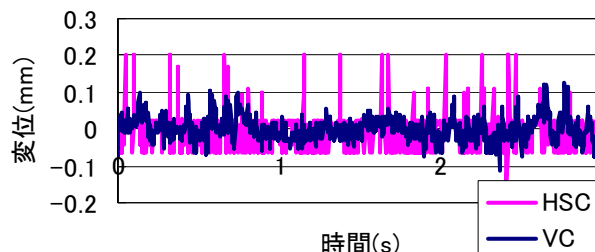


図-31 斜め 45° のカメラによる計測変位

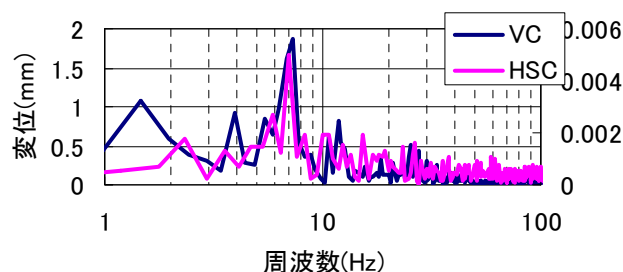


図-32 斜め 45° のスペクトル解析結果

表-2 現場計測結果

	計測面	計測面との距離	最大振幅 (mm)	周波数 (Hz)	寄与率 (%)
V C	上面	1080mm	1.635	6.84	87.2
	側面	674mm	0.999	7.32	92.2
	斜め45°	666mm	0.238	7.32	28.4
H S C	上面	472mm	2.114	7.03	92.8
	側面	550mm	1.301	7.03	73.7
	斜め45°	594mm	0.357	7.03	16.4

5. 結 論

以上、高速カメラを用いた低周波騒音源検出に関する検討を行い、次の結論を得た。

- (1) 高速カメラとレーザー光源を組み合わせた低周波騒音源検出方法を示した。本方法の利点は、周囲の騒音や風などに無関係に低周波騒音源となる物体表面の振動を計測できることである。物体表面を直接計測する方法として、近年レーザ変位計による振動計測についても研究が行われている。それに対する本方法の利点は、レーザー光源を格子状に分光させ、複数のレーザー光標点を同時計測することで、振動周期と共に振動モードまで容易に把握できることである。
- (2) 解像度と高速性に違いのある2種類の高速カメラを使用し、計測精度と計測限界について検討した。
計測装置の性能に依存するところが大きい。本研究で用いたHSCにより、1.5(m)離れた場所から1(mm)の全振幅で振動する計測対象面の周波数の計測が可能であることが解った。また、VCにより最大4(m)離れた計測が可能であるため、実用性も確認できた。
- (3) 更に、既設の水圧鉄管に対する現地計測の検討も行った。1(mm)程度の全振幅で振動する状態に対して、2種類のカメラのいずれにおいても、水圧鉄管の振動周波数をとらえることができた。
- (4) 今後のシステムの改善点としては、高解像度高速カメラ(VC)を使用したリアルタイム画像処理システム¹⁰⁾を導入し、実時間で結果を出力するシステムを開発すること、今回使用したレーザー光源よりも出力の大きなレーザー光源を用いて、計測対象までの距離を10(m)程度まで広げることが挙げられる。市販のポータブルカメラ(HSC)には仕様上同様のリアルタイム画像処理システムを組み込むことはできないが、手軽に計測できることから需要があると考えられ、簡易計測システムを確立することを目指す。

参考文献

- 1) 町田信夫：低周波音の影響，騒音制御，Vol.23, No.5, pp.302-305, 1999
- 2) 井上保雄：低周波音の実態と対策，騒音制御，Vol.23, No.5, pp.311-318, 1999.
- 3) 五郎丸英博：橋の騒音と発生騒音，振動制御，Vol.22, No.5, pp.270-277, 1998.
- 4) 米田昌弘，宮崎正男，藤本 朗，鈴木隆久：既設単純合成桁橋の主桁連続化とそれに伴う低周波空気振動の低減効果，構造工学論文集，Vol.45A, pp.659-669, 1999.
- 5) 麻生稔彦，會田忠義，弘中雅志，鈴木崇文：橋梁伸縮装置から発生する騒音に関する検討，山口大学工学部研究報告，Vol.51, No.1, pp.33-39, 2000.
- 6) 西原 崇，佐藤隆宏，豊田康嗣：洪水吐からの放流に起因した音の特性とその予測法，電力土木，No.317, 2005
- 7) 水門鉄管協会：水門鉄管技術基準，水門扉編，pp.202-204, 1997
- 8) 和田浩之，大脇雅直，山下恭弘：招待論文 音源探査装置の開発とその活用，構造工学論文集，Vol.50A, pp.1373-1379, 2004.
- 9) 日本機械学会：振動・騒音計測技術，1985
- 10) 石井抱，山本健吉：超速ハイパビューマンビジョンとその応用，電子情報通信学会誌，Vol.90, No.10, pp.838-841, 2007.
- 11) 中村秀治，辻徳生，石井抱，佐竹亮一，中山健，本山潤一郎：高速ビジョンを活用した構造物のアクティブ制振技術に関する検討，土木学会論文集A，Vol.64, No.2, pp.542-555, 2008.
- 12) 中村秀治，藤井堅，松下陽三，浅海敬次：標点投影による画像計測法と維持管理のための腐食表面計測への適用について，土木学会論文集F，Vol. 62, No. 3, pp.433-444, 2006.
- 13) 田村幸雄：固有直交関数展開のランダム変動場への応用のすすめ，日本風工学会誌第 65 号，pp.33-40, 1995.
- 14) 中村秀治，山本広祐：既設水圧鉄管の振動事例と固有振動数算定式の提案，土木学会論文集，No.710/I-60, pp.347-360, 2002.

(2009年9月18日受付)