

CCD非接触振動測定器(ユレツール)の性能確認試験

Performance Experiment of “YURETOOL”
-Vibration Measurement Instrument by CCD System

田中正明* 木村隆一* 脇田良夫**

Masaaki Tanaka, Ryuichi Kimura, Yoshio Wakita

当社では平成10年度より、画像処理の原理を応用した非接触振動測定器の開発を行い、平成13年度に製品化を実現した。本測定器ではCCDカメラで振動する物体を撮影することにより、固有振動数の検出や振幅の測定が可能となる。測定対象物に加速度計などのセンサ類を取付ける必要がないため、対象物の条件によりセンサ類の取付けが困難な場合や、センサ類の取付けによって対象物の振動に悪影響を与えてしまうような場合の振動測定には、大変有利であると考えられる。本報では、この非接触振動測定器に対して実施した性能確認試験について報告する。

A non-contacting vibration measurement instrument, in which the principle of image processing is applied, has been developed by our company since 1998, and became a commercial product in 2001. In this measuring instrument, detection of frequency of proper oscillation and amplitude are possible by monitoring and photographing a vibrating object using CCD camera. Since it is not necessary to attach sensors, such as an accelerometer, vibration measurement is possible in the cases of that the attachment of sensors is difficult or has a bad influence on vibration of a subject.

This paper reports the performance examination of this non-contacting vibration measurement instrument.

1. はじめに

構造物や機械類の振動測定においては、加速度計やひずみ計などのセンサ類を直接対象物に取付ける方法が一般的に行われている¹⁾。本測定器では非接触の状態では振動を測定できるため、下記のような利点があると考えられる。

1) 測定対象物に近づくのが困難、あるいは危険な場合など、立地条件の制約でセンサ類の取付けが不可能な場合においても、対象物に触れることなく測定することができる。

2) 微小な振動を測定するなど、センサ類を取付けることによって測定対象物の振動が変化してしまうような場合でも、対象物の振動を乱さずに測定することができる。

3) CCDカメラに望遠レンズやマクロレンズを取付けることにより、対象物の条件に即した測定が可能である。

4) センサ類の取付けや配線の作業が省略できるため、測定作業の省力化を図ることができる。

本稿では、本測定器に対して実施した性能確認試験の結果について報告する。

2. CCD非接触振動測定器(ユレツール)の概要

2.1 システム構成

CCD非接触振動測定器(以下、ユレツールと称する)のシステム構成を図1に示す。CCDカメラは2台まで取付けができ、それぞれのカメラにて別々の着目点の振動測定が可能である。測定データの保存および高速フーリエ変換処理(以下、FFTと称する)は測定器本体にて実

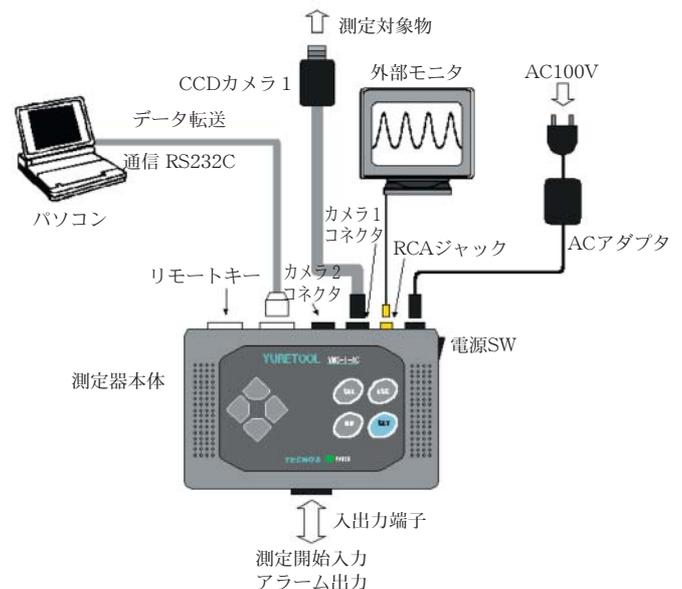


図1 ユレツールのシステム構成

Fig. 1 System configuration of “YURETOOL”

施できるため、図中のパソコンは測定後のデータ転送用であり、測定作業時には不要である。

ユレツールの主な機器仕様を表1に示す。サンプリング周波数を最大333Hzまで大きく設定できるため、原理的には最大約160Hzまでの振動が測定可能である。

2.2 ユレツールによる振動測定の原理

本測定器による振動測定の原理を図2に示す。振動を測定する対象物をCCDカメラにて図中(a)のように撮影する。本測定器では、画像上における測定対象物と背景の輝度の違いを利用して測定の着

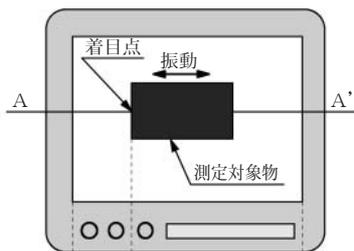
* 鉄構事業部 技術総括部

** テクノス株式会社 開発部

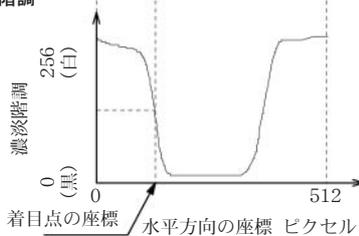
表1 ユレツールの機器仕様
Table 1 Specifications of "YURETOOL"

本体	質量	本体約1.5kg
	寸法	横190×縦130×高60mm
	ビデオ信号出力	RCAコネクタ
	通信方法	RS232C(D-SUB9ピン)
	通信データ内容	測定パラメータ/測定データ/画像データ
入力電圧(専用ACアダプタ)		AC90~240V 50/60Hz
CCDカメラ	マウント	Cマウント
	有効画素数	512(水平)×480(垂直)
	階調	白黒256階調
	シャッター速度	1/30~1/1000秒
測定	サンプリング周波数	10、25、50、100、200、333 Hz
	サンプリング数	128、256、512、1,024、2,048個
	周波数範囲	0~160 Hz
	測定分解能	0.01Hz単位

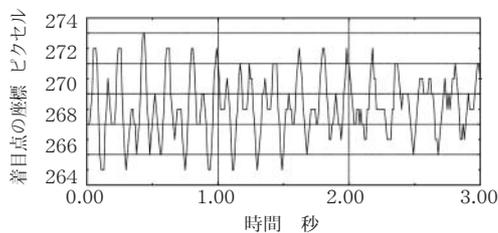
(a) モニタ画面



(b) A-A' 線上の濃淡階調の変化



(c) 着目点の座標の時刻歴変位



(d) FFT 解析結果

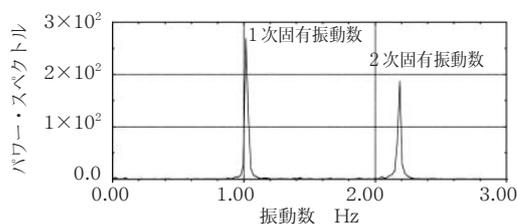


図2 ユレツールの測定原理
Fig. 2 Measurement principle of "YURETOOL"

目点を設定するので、測定対象物に基本的にはターゲットなどを取付ける必要がない。ただし、測定対象物と背景の輝度が同程度である場合は、測定対象物の輝度を変えるようなターゲットを貼付けるか、あるいは背景の輝度を変えるような工夫が必要である。

振動を測定する方向に平行に、かつ測定対象物を通る位置に設定したA-A'線上の画素の濃淡階調を検出すると、図中(b)のようなグラフになる。測定対象物と背景の輝度の差により濃淡階調の変化が発生するので、この変化量が最大となる点を着目点として認識する。着目点の座標はA-A'方向の画素番号により記録され、測定対象物の振動により刻々と変化する座標を、サンプリング周期ごとに記録することにより、図中(c)のような変位の時刻歴波形を得ることができる。

この時刻歴波形はあくまでも画像上での着目点の変位であるが、FFTによって図中(d)のように得られるスペクトル領域での振動特性は、実際の測定対象物のそれと同様のものと考えられる。また、測定対象物と同じ視準距離に存在する、長さが既知の対象物をあらかじめ視準することにより、画像上の長さを実際の長さのキャリブレーションを実施して、振幅を算出することが可能である。

3. 性能確認試験の概要

3.1 試験の目的

ユレツールの振動測定性能を確認するために、以下の3種類の試験を室内にて実施した。

- 1) 加振器測定試験
- 2) 板バネ測定試験
- 3) カメラ振動下での測定試験

いずれの試験においても、既存の代表的な非接触タイプの測定器であるレーザー変位計による計測も実施し、両者の性能比較を試みた。使用したレーザー変位計のシステム構成および機器仕様をそれぞれ、図3および表2に示す。

それぞれの試験における測定対象物の振動条件と、ユレトールおよびレーザー変位計の測定条件を表3に示す。なお、ユレトールのCCDカメラには焦点距離12.5mm~75mmのズームレンズを使用し、測定対象に合わせて適宜焦点距離を調整した。また、ユレトールによる変位の測定を行うために、測定対象物とほぼ同一の視準距離となる箇所にスケールを配置して、画像上の変位と実際の変位のキャリブレーションを行った。

以下に、3種類の性能確認試験の試験要領を記述する。

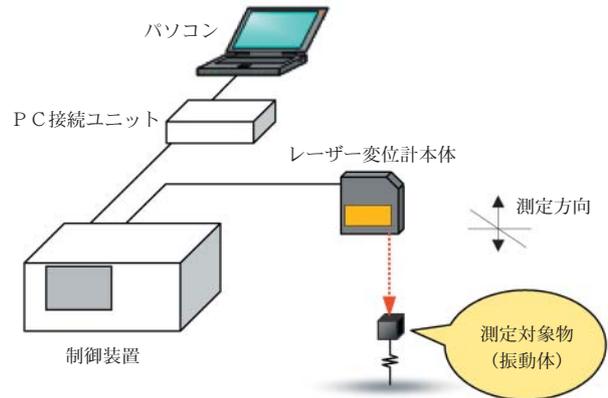


図3 レーザー変位計のシステム構成
Fig. 3 System configuration of laser displacement gauge

表2 レーザー変位計の機器仕様
Table 2 Specifications of laser displacement gauge

本体質量	測定部 コントローラ	約250g 約6.8kg
	測定範囲	± 8 mm
	作動距離	50mm
	変位データ出力・入力制御	RS232C/GB-IB
	定格電源電圧	AC100~240V ± 10% 50/60Hz
半導体 レーザー光源	波長	670nm
	出力	最大1.9mW、平均950 μ W
	パルス幅	10 μ s
測定	サンプリング周波数	50kHz以下
	応答周波数	20kHz
	応答時間	100 μ s
	安定度(± 5 度)	± 0.03% of F.S.
	分解能	0.5 μ m
	直線性	± 0.05% of F.S.
	最小スポット径	45×20 μ m

表3 測定対象物の振動条件および測定条件
Table 3 Vibration conditions of target and measuring parameters

	測定対象物の振動条件		測定条件					
			ユレトール			レーザー変位計	ユレトール/レーザー変位計共通	
	振動数 Hz	振幅 mm	視準距離 mm	50画素相当の 画像視野 mm	1画素相当の 画像視野 mm	作動距離 mm	サンプリング ^{注1)} 周波数 Hz	サンプリング数 個
加振器測定試験	約40	約±0.8	1,500	76	0.152	約50	100	1,024
板バネ測定試験	約10	約±0.7~0.0	500	32	0.064			
CCDカメラ振動下での測定試験	約18	約±0.75	1,200	88	0.176			

注1) 加振器測定試験では、比較のためにサンプリング周波数を200Hzとした測定も実施した。

3.2 加振器測定試験

振幅および振動数の基本的な検出性能を確認するために、図4に示すような加振器を用いた測定試験を実施した。加振器の振動方向は上下方向であり、振動数を自由に設定できるものである。

本試験における振動測定の要領を図5に示す。ユレトールのCCDカメラは、三脚にて視準方向がほぼ水平となるように設置した。一方、レーザー変位計は測定対象の振動方向にレーザーを照射する必要があるため、固定器具にて鉛直下向きに設置した。

加振器の振動部分には黒色であるため、レーザー変位計による測定時には、レーザーの反射率を確保するために白色のシールを貼付けた。ユレトールによる計測では、加振器の振動部分自体をターゲットとし、背景に白色のパネルを立てることでターゲットと背景の輝度の差が大きくなるようにした。

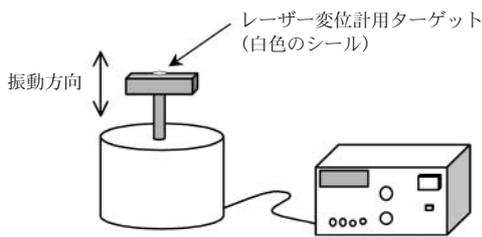
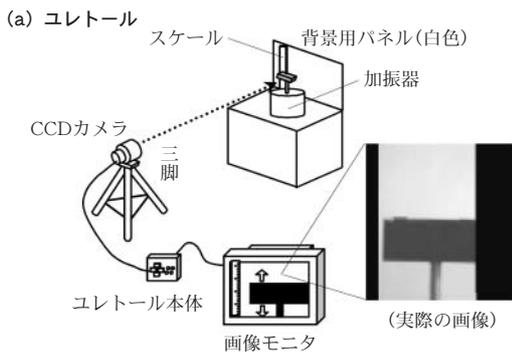


図4 加振器の概要
Fig. 4 Illustration of exciter



(b) レーザー変位計

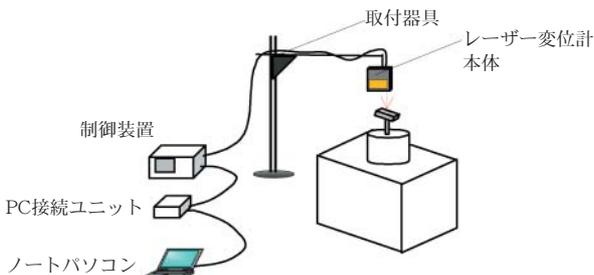


図5 加振器測定試験の要領
Fig. 5 Outline of test measuring exciter

3.3 板バネ測定試験

今回試験を行った2つの測定器(ユレトールおよびレーザー変位計)の測定結果を詳細に比較するためには、周波数領域での比較のみならず、時刻歴変位波形の比較を行う必要がある。しかしながら、両測定器と加振器の組み合わせでは、それぞれの機器の仕様の違いから、両測定器による振動測定結果の同期性を確保することが困難であった。

そこで、図6に示すようなプラスチック製の板バネを製作し、両測定器による測定試験を実施した。本試験の概要を図7に示す。板バネは人力により強制的に初期変位を与えた後に解放されて減衰振動するものであり、解放直前から計測を開始することにより、両測定器による測定結果の時刻歴変位波形の同期が可能となる。

また、板バネは減衰により徐々に振幅が小さくなるので、両測定器によりどのくらい微小な振幅まで測定可能であるか、比較を実施した。

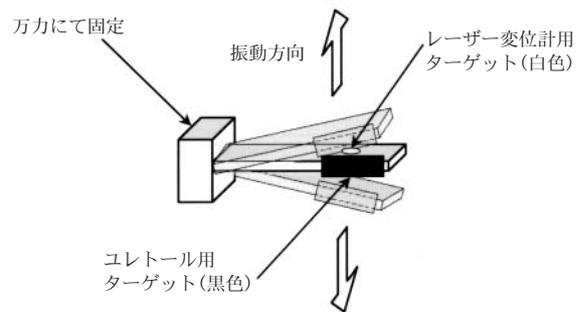
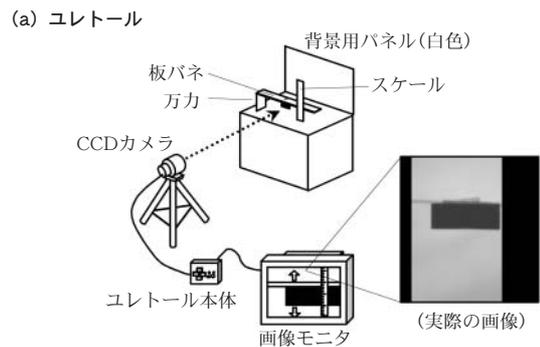


図6 板バネの概要
Fig. 6 Illustration of board spring



(b) レーザー変位計

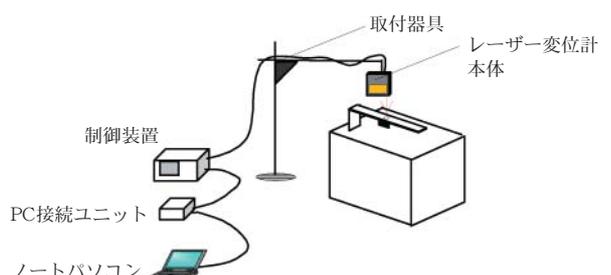


図7 板バネ測定試験の要領
Fig. 7 Outline of test measuring board spring

3.4 CCDカメラ振動下での測定試験

ユレトールではCCDカメラを用いて振動測定を実施するため、屋外において測定を行う場合、測定環境が変化しにくい屋内での測定とは異なり、風などの外力によって三脚やカメラ自身が振動してしまい、測定結果に悪影響を及ぼす可能性がある。

ユレトールでは同一画像内の異なる2点の振動測定を同時に実施することができるため、測定対象物とは別の不動点をもう1点の測定箇所とすることにより、カメラ自身の振動による成分をキャンセルすることが可能である。これら2点の振動測定結果には、カメラ自身の振動による成分がどちらにも同様に含まれているので、測定結果の時刻歴変位データにおいて、同一時間の2点の測定結果を差し引きすることにより、この成分を消去することができ、純粋に測定対象物の振動のみを抽出することが可能となる。

本試験では図8に示す要領で、カメラを取付けた三脚を約5Hzの周期にて人力加振しながらの振動測定を実施した。測定対象物としては、加振器測定試験と同じ加振器を使用した。

なお、レーザー変位計は本体を振動させない状態で測定を行い、ユレトールによる測定結果から抽出した測定対象物自体の振動波形との比較を実施した。

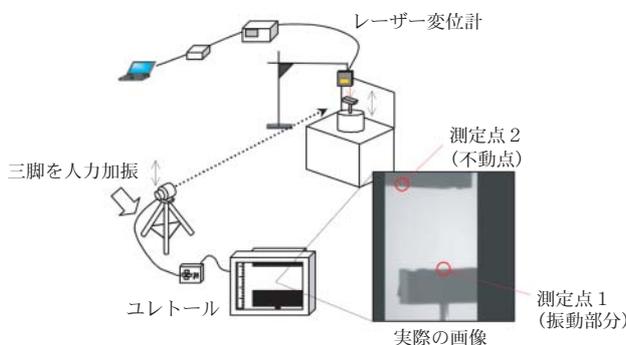


図8 CCDカメラ振動下での測定試験の要領

Fig. 8 Outline of test measuring with CCD camera vibrating

4. 性能確認試験の結果および考察

4.1 加振器測定試験

図9に、加振器を40Hzにて振動させたときの、ユレトールおよびレーザー変位計による測定結果の時刻歴変位を示す。本試験においては、前述のように両測定器の仕様の違いから、測定結果の同期を行うことができなかった。それゆえ、図9の(a)、(b)はそれぞれ無作為に1秒間の時刻歴変位波形を抽出して示しており、両者は同一時間のものでないことに注意されたい。

両者の波形はよく類似しており、測定時間(10.24秒間)中の最大片側振幅を比較すると、レーザー変位計では0.804mmであるのに対してユレトールでは0.791mmと、約2%程度の誤差となっている。

加振器によってほぼ一定振幅の振動を発生させている

にも関わらず、時刻歴波形のピークにばらつきがみられるが、これは40Hzで振動しているターゲットの測定に対して、サンプリング周波数を100Hzに設定したためと思われる。実際、サンプリング周波数を200Hzにて同様の測定を実施したところ、図10に示すように波形のばらつきは大幅に低減された。

次に、それぞれの測定器による10.24秒間の測定結果に対してFFTによる振動数分析を実施した。その結果は図11に示すとおり、どちらの測定結果からもターゲットの振動数は39.55Hzと判断できるものであった。今回適用した測定条件(サンプリング周波数100Hz、サンプル数1,024個)では、FFTによる振動数の分解能は0.09766Hzであるため、両者の誤差は最大でも0.1Hz程度であると考えられる。なお、今回使用した加振器は振動数の設定は数値制御ではなく、ボリュームつまみによる手動設定方式であるため、厳密に40Hzの振動が得られているとは考えにくい。両測定器による測定結果が非常によく一致していることから、この測定結果は実際のターゲットの振動数を精度よく検出していると思われる。

4.2 板バネ測定試験

本試験にて得られたターゲットの時刻歴変位波形を図12に示す。両測定器による測定結果の同期に際しては、板バネに与えた初期変位が解放されて最初に変位が±0mmとなる瞬間を同時刻とみなし、時間軸上の0秒に補正する処理を実施した。

両測定器による時刻歴変位波形がどの程度一致しているか、波形を拡大表示して比較を行った。図13の(a)に、板バネの振幅が約1.0mmの時点の時刻歴波形を示す。両者の波形は非常によく一致しており、0.60秒付近の振幅を比較するとその誤差は約0.05mmとなっている。次に、図13の(b)に振幅が約0.1mmの時点の波形を示す。振幅で比較すると両者の誤差はほとんどない結果となっているが、波形に時間軸方向のずれが0.01秒程度生じていることが分かる。このずれが発生した原因については、定かではない。

次に、本試験の測定結果に対してFFTによる振動数分析を実施した結果を図14に示す。FFTは0秒~10.24秒間のデータ(サンプル数1,024個)を使用して行った。両測定器のFFT結果を比較すると、スペクトル強度に若干の差異はあるものの、卓越振動数はいずれも10.35Hzという結果となった。

4.3 カメラ振動下での測定試験

本試験の測定結果の時刻歴変位を図15に示す。ユレトールによる測定では、前述したように加振器のターゲットと不動点の2箇所を測定対象としている。図中の(a)、(b)にターゲット、不動点をそれぞれ測定した結果を示す。不動点の測定では、測定対象は振動していないので、時刻歴波形に生じている変位はカメラ自身の振

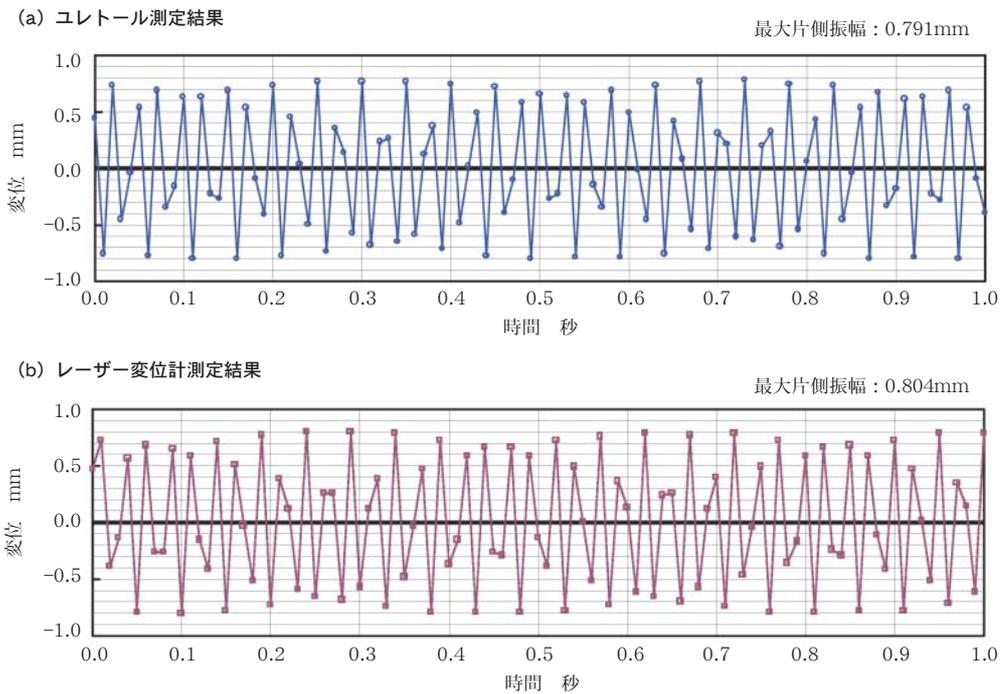


図9 加振器測定試験の時刻歴変位(サンプリング周波数100Hz)
Fig. 9 Time history of displacement in test result measuring exciter (sampling rate 100Hz)

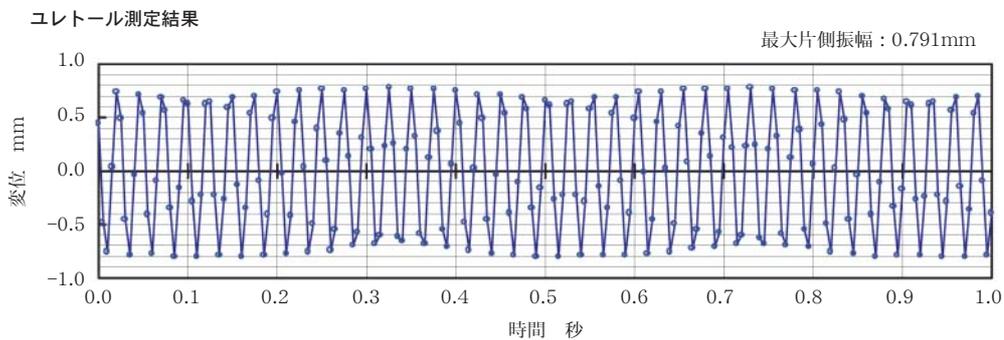


図10 加振器測定試験の時刻歴変位(サンプリング周波数200Hz)
Fig. 10 Time history of displacement in test result measuring exciter (by "YURETOOL", sampling rate 200Hz)

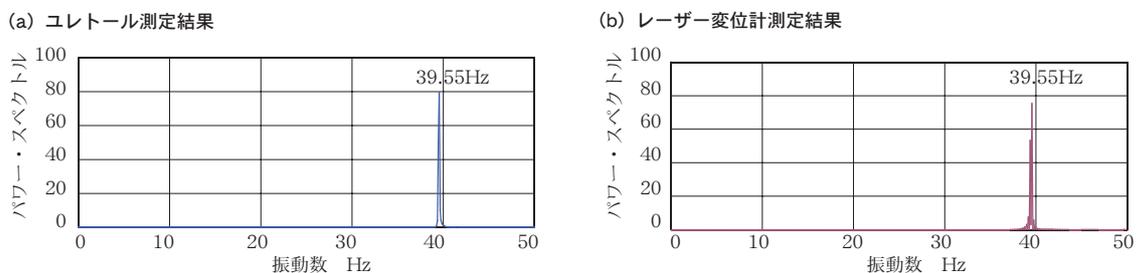


図11 加振器測定試験の振動数分析結果
Fig. 11 Pitch analysis result of test measuring exciter

動に起因するものである。この振動成分は加振器のターゲットを測定した(a)の波形にも同様に含まれているものと考えられるので、同一時間のデータ同士で(a)-(b)という処理を行うことにより、カメラ自身の振動をキャンセルして純粋にターゲットの振動のみを抽出すること

ができる。図中の(c)にその結果を示す。この波形と(d)に示すレーザー変位計による測定結果を比較すると、測定結果同士の同期ができないため、同一の時間同士の比較は不可能であるが、両者の波形はほぼ同様な特徴を示している。表示している2秒間の最大片側振幅を比

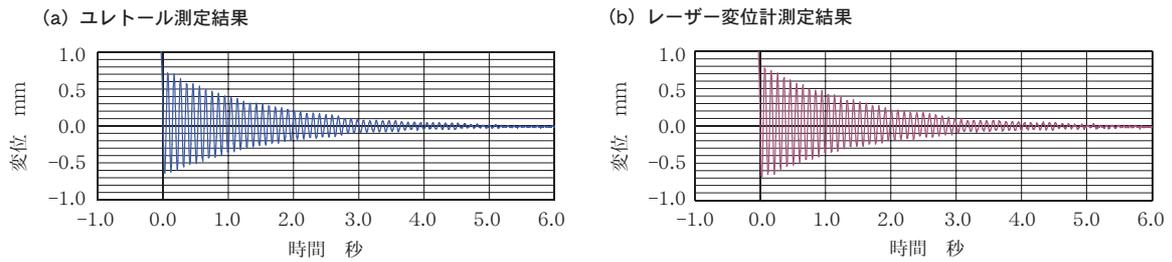


図12 板バネ測定試験の時刻歴変位
Fig. 12 Time history of displacement in test result measuring board spring

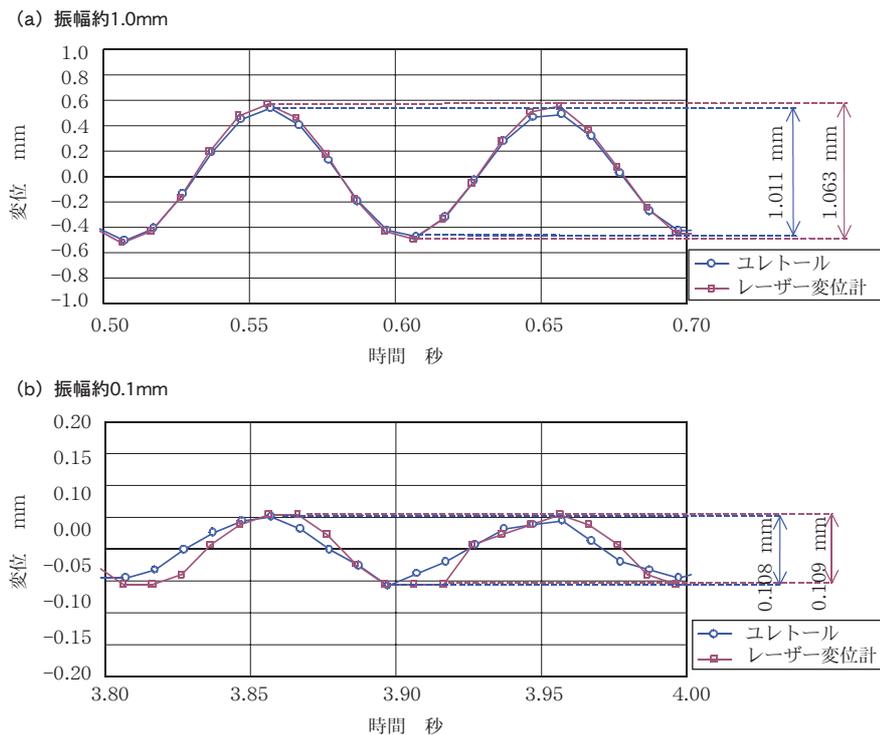


図13 板バネ測定試験の時刻歴変位(拡大図)
Fig. 13 Time history of displacement in test result measuring board spring (enlargement)

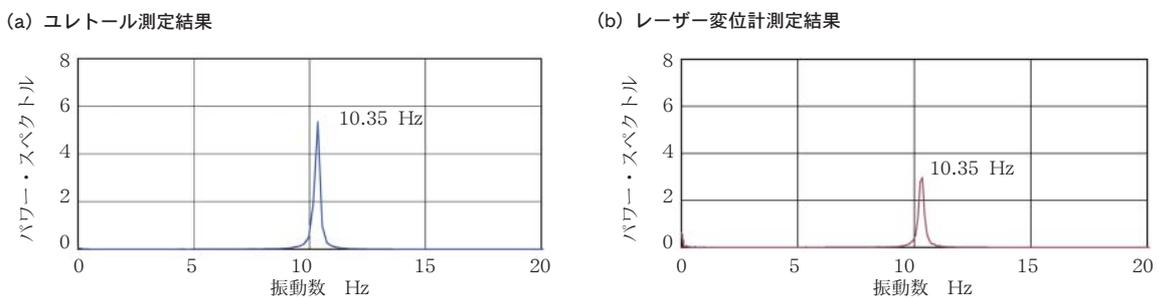


図14 板バネ測定試験の振動数分析結果
Fig. 14 Pitch analysis result of test measuring board spring

較すると、ユレトールが0.810mmとなり、レーザー変位計の0.781mmに対する誤差は約4%となっている。

図16の(a)～(d)に、それぞれ図15の(a)～(d)の波形に対してFFTによる振動数分析を実施した結果を示す。(b)の図から、外力によるカメラ自身の振動は約4.59Hzであると考えられる。(a)の測定結果はターゲット自身

の卓越振動数(17.77Hz)に加えてカメラ自身の振動数が含まれた形となっているが、(a)～(b)によって算出した(c)のグラフではこれがキャンセルされていることが分かる。また、(d)のレーザー変位計による測定結果と比較しても、全く同一の卓越振動数が検出できていることが分かる。

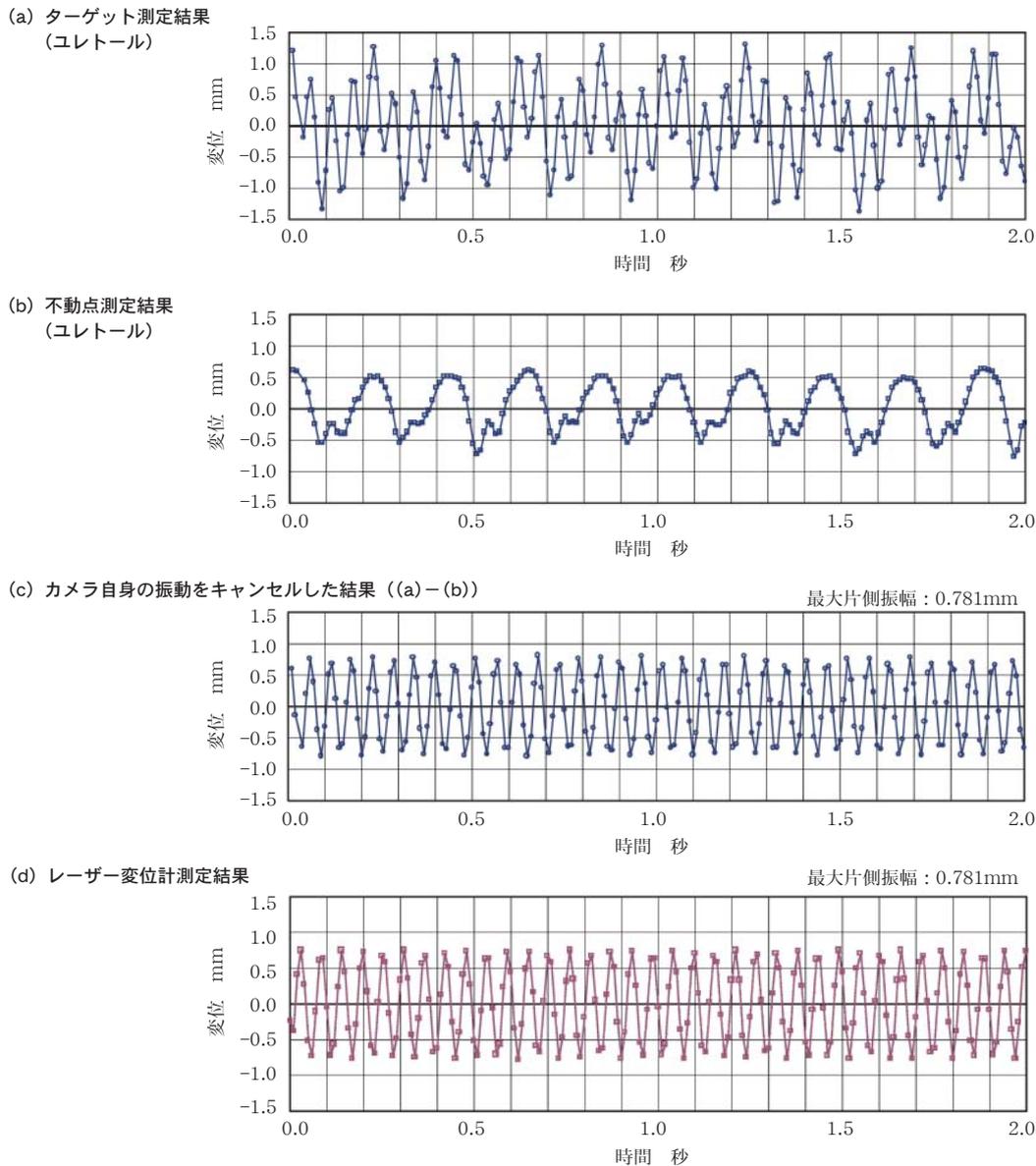


図15 カメラ振動下での測定試験の時刻歴変位

Fig. 15 Time history of displacement in test result measuring with CCD camera vibrating

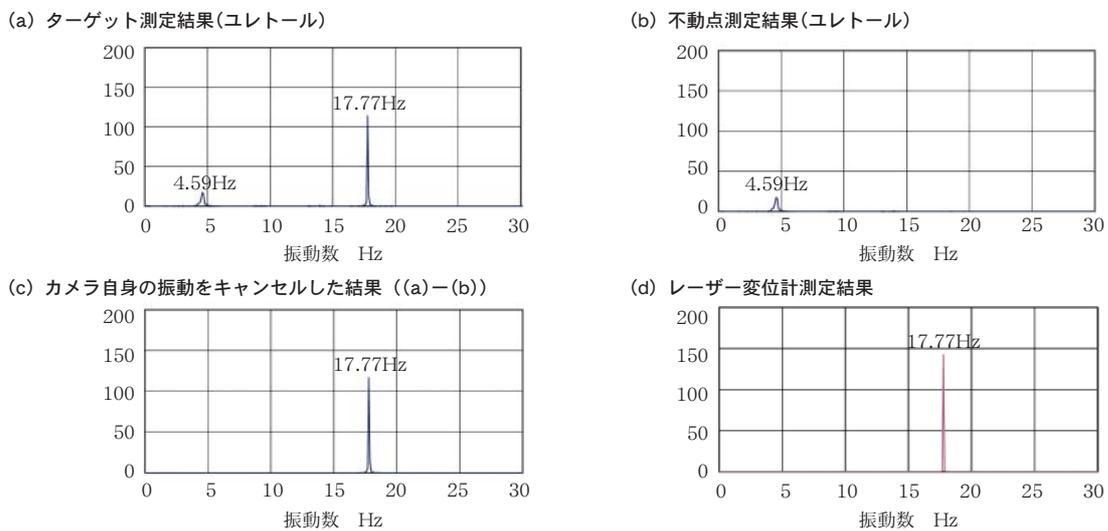


図16 カメラ振動下での測定試験の振動数分析結果

Fig. 16 Pitch analysis result of test measuring with CCD camera vibrating

5. おわりに

今回試験を実施した測定条件の下での比較では、ユレトールによる測定結果は既存のレーザー変位計による測定結果とほぼ同等の精度を有するものであった。ただし、今回の試験では限られた条件下での測定しか実施していないため、今後は振動数・振幅などの測定対象物の振動条件や、視準距離・明るさなどの測定環境をパラメータにした性能確認も実施していきたい。

また、ユレトールでは測定対象物と不動点の2箇所を同時に測定することで、CCDカメラや三脚の振動による成分をキャンセルし、純粋に対象物の振動のみを抽出できることを確認した。この手法により測定の安定性、信頼性が向上すると思われる。さらに、この手法を応用することにより、相対振動成分の測定も可能となる。例えば、振動する橋梁の上の照明柱の振動測定において、橋梁に対する照明柱の相対的な振動成分の抽出を実施することで、照明柱そのものの振動を検証することが可能である。

なお、CCD非接触振動測定器「ユレトール」の開発は、(株)栗本鐵工所、(株)入江製作所、テクノス(株)の3社共同体制で実施している。

参考文献

- 1) 橋梁振動研究会：橋梁振動の計測と解析、技報堂出版、(1993.10)

執筆者

田中正明

Masaaki Tanaka

平成4年入社

鋼橋の設計・計画を経て

鋼橋に関する研究・開発に従事

技術士(建設部門)



木村隆一

Ryuichi Kimura

平成9年入社

鋼橋に関するシステム設計

および研究・開発に従事



脇田良夫

Yoshio Wakita

テクノス株式会社開発部課長

画像処理応用システム

および各種制御用

ボードに関する研究・開発に従事



用語解説

PRTR(Pollutant Release and Transfer Register)

環境汚染物質の排出・移動登録のこと。1999年にOECD(経済協力開発機構)が加盟各国に導入を勧告し、日本では「特定化学物質の環境等への排出量の把握等および管理の改善に関する法律」として1999年7月に法制化、2001年4月から制度が動き出した。

この法律では、国が対象となる物質(発がん性慢性毒性など人の健康や環境・動植物に対して悪影響を与える可能性のある物質で生産量の多いもの)を指定、政令で定められた対象事業所(5トン以上の対象物質を扱っている事業所)はその物質の排出量、移動量を都道府県に届ける義務があり、これによって地域住民の関心が高まり、事業者が監視されることにより自主管理を進めることが期待される。これからは環境汚染物質として指定された化学物質を取り扱う事業者は、大気、水域などの排出先ごとにその化学物質の数量把握を行い、その結果によりリスク評価とリスク低減の取組みが求められる。