

構造物診断用非接触振動測定システム 「Uドップラー」の開発

上半 文昭*

Development of “U-DOPPLER” Non-Contact Vibration Measuring System for Diagnosis of Railway Structures

Fumiaki UEHAN

The non-contact vibration measuring system as termed “U-Doppler” newly developed by RTRI hereby introduced. In the field of monitoring of railway structures, the dynamic characteristics estimated by vibration measurements are applicable to evaluate the structural integrity. If the long-distance remote measurement method with the U-Doppler is adopted, it is possible to improve the efficiency and safety of the measurements, since it is unnecessary to install sensors and cables at locations high above the structures and remove them later. In this report, the author first introduces the outline of U-Doppler. Next, the author verified the accuracy of the U-Doppler with the results of laboratory experiments, the microtremor measurement of rigid-frame viaduct, and the deflection measurements of bridge girders.

キーワード：Uドップラー，非接触測定，振動測定，構造物検査，LDV

1. はじめに

鉄道では、古くから振動測定を利用した構造物検査法の研究¹⁾に取り組んでおり、走行列車²⁾、重錘での打撃による衝撃³⁾、および常時微動⁴⁾などを加振源とする構造物振動を測定し、測定結果から得られる構造物の最大応答、固有振動数、振動モード等を、健全な構造物が有すべき値と比較することによって構造物の健全性を検査する手法が開発されてきた。それらの検査における振動測定作業では、センサやケーブルなどの設置と撤去に多くの時間を要しており、また、高所や軌道近接箇所などの危険箇所へのセンサ類の設置を伴う場合がある。

そこで、著者は構造物の振動測定をより効率良く安全に実施できるようにするために、レーザドップラー速度計（以下、LDV）を改良して、構造物振動を長距離非接触測定することができるシステム「Uドップラー」を開発した。LDVは、運動する物体にレーザ光を照射してその反射光を受光し、ドップラー効果によるレーザ光の周波数変化を利用して、物体のレーザ照射方向1成分の運動速度を非接触で検出するセンサである。主として精密機器などの機械振動の測定に利用されてきたセンサであるが、近年、構造物分野への適用⁵⁾も試みられている。

Uドップラーは、LDVに現場測定用の改良を施したもので、数十m離れた場所から構造物の振動を測定でき、1台で列車通過時の比較的大きな構造物応答から、人為

的な加振によらない平時の極微小な振動である常時微動まで測定可能である。Uドップラーを用いれば、振動測定作業に伴うセンサ類の設置および撤去の手間を大幅に削減できる。また、高所や地震で損傷した構造物の下などの危険箇所での作業量が軽減され、平時および災害後の検査作業の安全性が高まるものと期待できる。

以下では、まずUドップラーの概要を説明し、次に性能の検証を目的として実施した実験結果、高架橋の常時微動測定結果、および列車通過時の橋梁の桁のたわみ測定結果を紹介する。

2. Uドップラーの概要

2.1 概要

Uドップラー（図1）は、LDVに、現場での構造物測定を精度良くかつ効率的に実施するための工夫を施し、さらに、データの収録および解析機能も一体化した「構造物診断用非接触振動測定システム」である。システムはセンサとデータレコーダで構成されている。センサからレーザ光を照射することによって構造物上の任意点の振動を測定し、結果をデータレコーダで保存、表示、解析することができる。

センサは、表1、図2に示す通り、最大100m程度（反射シール使用時）の測定距離、広い計測範囲（周波数：DC～600Hz、振幅：数nm～数cm程度）を有している。反射シールは、再帰反射性（光を入射方向に反射）を有する材料を用いたシールである。また、現場での使いや

* 鉄道力学研究部（構造力学）

特集：鉄道力学

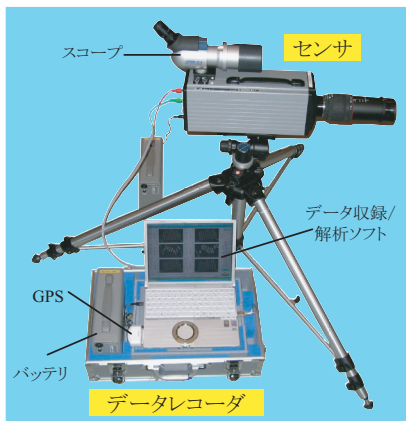


図1 Uドップラー外観

表1 Uドップラーセンサの主な仕様

	仕様
サイズ・重量	113 (W) × 141 (H) × 351 (D) mm, 約 5.5 kg
電源	専用バッテリー駆動式 (DC16 V, 約 8時間)
レーザ光量	安全規格クラス2 (He-Ne ガスレーザ)
測定速度範囲	0.2 μm/s ~ 100mm/s (2レンジ切り替え)
応答周波数範囲	DC ~ 600Hz
測定距離	約 1 ~ 100m (反射シール使用時, 環境条件による)
速度H.P.F	DC, 0.2Hz, 2Hz

すさを考慮して、装置構成の単純化、取り扱いの容易な安全規格クラス2レーザの使用、バッテリーによる駆動(連続約8時間)、遠方の測定点に正確にレーザ光を照射するためのスコープの採用などの工夫を施した。

データレコーダには、現場でのデータの収録、確認と分析、および報告書作成時のデータ整理などを実施できる専用のデータ収録/解析ソフト(図3)をインストールした。データレコーダは8ch仕様で、Uドップラーセンサを2台(任意信号用の空きchを利用すれば3台)接続して、無補正LDVによる検出速度、内蔵センサによる補正用信号、センサ本体の揺れや傾きの影響を補正した後の速度(または変位)、および、各データのフーリエスペクトルをリアルタイムで確認しながらデータを収録できる。解析ソフトを用いれば、収録データにスペクトル解析、微積分、フィルタ処理、基線補正などの演算を施すことができ、測定現場で構造物の固有振動数やたわみ量などを確認できる。

2.2 内蔵センサを用いた補正技術

2.2.1 LDVの速度検出手法

ある一定の周波数成分を持つレーザ光を、ある速度で移動している物体に照射すると、移動物体の持つ速度成分に比例して反射光の周波数が変化する。物体に照射するレーザ光(入射光)の周波数を f_0 、物体の速度を v 、照射するレーザ光の波長を λ_0 、入射光と物体の移動方向とがなす角度を θ とすると、物体からの反射光の周波数 f_r は次式で表される。

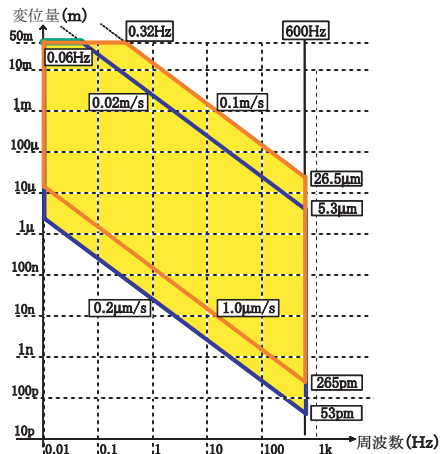


図2 Uドップラー(光学センサ)の計測範囲図

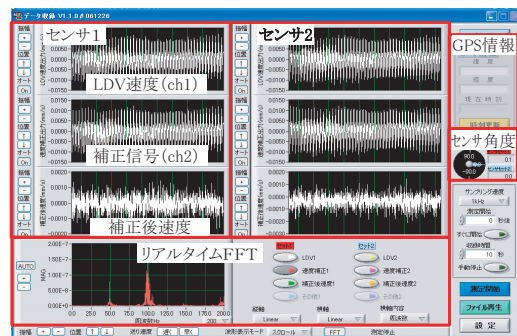


図3 データ収録ソフトメイン画面

$$f_r = \frac{\lambda_0 \cdot f_0 + v \cdot \cos\theta}{\lambda_0 \cdot f_0 - v \cdot \cos\theta} \cdot f_0 \quad (1)$$

よって、入射光に対する反射光の周波数の変化量 f_D は、

$$f_D = f_r - f_0 = \frac{2v \cdot \cos\theta \cdot f_0}{\lambda_0 \cdot f_0 - v \cdot \cos\theta} \quad (2)$$

ここで、 $\lambda_0 \cdot f_0 \gg v \cdot \cos\theta$ であるので、ドップラー周波数 f_D は、次式で近似される。

$$f_D \approx 2v \cdot \cos\theta / \lambda_0 \quad (3)$$

LDVで使用されるレーザ光の波長 λ_0 はきわめて安定しているため、ドップラー周波数 f_D とターゲットの移動速度 v は比例関係にある。レーザ光の照射方向と物体の移動方向とのなす角 θ が得られれば、ドップラー周波数 f_D から、物体の移動速度 v を求めることができる。

2.2.2 Uドップラーの速度検出手法

LDVはセンサと測定対象間の相対速度を検出するので、測定記録にはLDV本体の振動成分も含まれることになる。屋外で微小な構造物振動を測定する場合には、LDVと三脚からなる系の固有振動や地盤に入力される各種ノイズ振動および風等の外乱の影響を無視することができない。特に地震等災害後の損傷度検査に適用する場合には、復旧工事等による高いノイズレベル下で計測を行う必要があり、その影響が深刻である。

そこで、Uドップラーでは、LDVの光学センサとは別

途、Uドップラーセンサ筐体内に測定対象の振動周波数領域においてLDVと等価な感度および位相特性を有する接触型の振動センサを内蔵して振動速度を記録し、その記録を用いてUドップラーセンサ本体の揺れの影響を補正する技術⁶⁾を導入した(図4)。

構造物上のある測定点をその振動方向と角度 θ だけずれた位置からLDVで測定し、その記録をLDV本体に取り付けた微動センサの記録で補正するには、まずLDVの速度記録から測定対象の振動方向と角度 θ をなす方向のLDV本体の振動の影響を除去し、次に(3)式より、 $\cos\theta$ で除すれば良い。Uドップラーは本体の水平面に対する傾斜角も常時測定しており、構造物の振動方向とレーザー照射方向が一致しない場合も記録データの振幅を自動的に補正できる。時刻 t におけるLDVの速度記録を $V_L(t)$ 、筐体に内蔵した振動センサの速度記録を $V_S(t)$ とすれば、振動方向と角度 θ ずれた位置から測定した場合の測定対象の絶対速度 $V(t)$ は次式で求められる。

$$V(t) = (V_L(t) + V_S(t)) / \cos\theta \quad (4)$$

この内蔵センサを用いた補正技術の適用により、Uドップラーは大型の土木構造物各部の振動を、非接触センサ本体にノイズ振動が発生しやすい屋外環境において、振幅の非常に小さな常時微動に至るまで、測定箇所センサを取り付けた場合と同様の振動記録を、地上から非接触で測定することができる。

3. 実験による性能検証

3.1 概要

実験により、Uドップラーの補正効果、測定角度の影響、最大測定距離について確認した。1方向に正弦波振動する物体を測定対象とし、補正効果については、現場測定時に問題となる2種類のノイズ振動の除去効果を確認するとともに、Uドップラーセンサに横方向および斜め方向の振動が加わった場合の補正効果についても確認した。測定角度については、レーザー照射方向と物体の運動方向のなす角度を大きくした場合の測定性能を確認した。最大測定距離は、仕様最大値である反射シール使用時100m程度を満たしているかどうかを確認した。

3.2 実験装置

測定対象およびUドップラーセンサの両方を加振した状態での測定を実施するために2台の小型振動台を用いた実験装置を室内に構成した(図5)。振動台としてサンエス社製の永久磁石振動加振器を使用し、小型のSSV-105(最大加振力98.0N)上に測定対象を、大型のSSV-125(最大加振力490N)上にUドップラーセンサを設置し、電力増幅器SVA-ST-30を介して、2chの電圧信号を

出力可能なTektronix社製の信号発生器AFG3022で両加振器を制御した。Uドップラーセンサで測定対象の振動を200Hzサンプリングで計測し、Uドップラーのデータレコーダで収録した。センサと測定対象間の距離は約4.5mとし、測定対象には反射シールを貼付した。なお、3.3.3の最大測定距離の確認実験のみ、屋外でUドップラーセンサを三脚上に設置して実施した。

3.3 測定内容および結果

3.3.1 補正効果の確認

(1) 過渡的で大振幅な振動の除去効果

従来、LDVなどの非接触センサで常時微動などの微小な振動を測定する場合、強風や大型車両通過による地盤振動などによって、センサに測定対象の振動レベルより大きな振動が加わり、測定精度が低下することがあった。このような状況を模擬した加振実験を実施した。

図6に、測定対象を正弦波加振(5.0Hz, 2.0mm/sec)した状態で、Uドップラーセンサに同図(a)に示す周波数10Hz, 最大振幅20mm/secの振動を与えた際の測定結果を示す。測定対象およびUドップラーはレーザー照射方向と同一方向に加振した。(b)無補正は、内蔵センサによる補正を行わない場合の記録であり、従来のLDVによる測定結果に相当する。(b)無補正がセンサの加振の影響を受けて大きく乱れているのに対して、補正後の(c)Uドップラーの記録は、測定対象の振動だけを検出できて

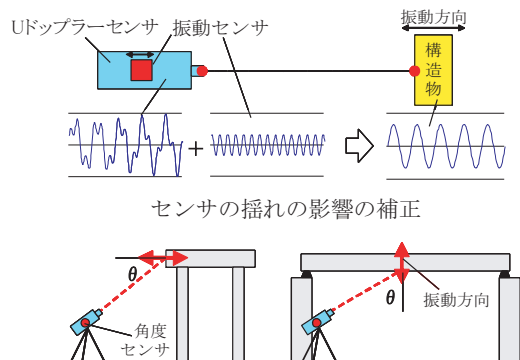


図4 内蔵センサを用いた補正技術

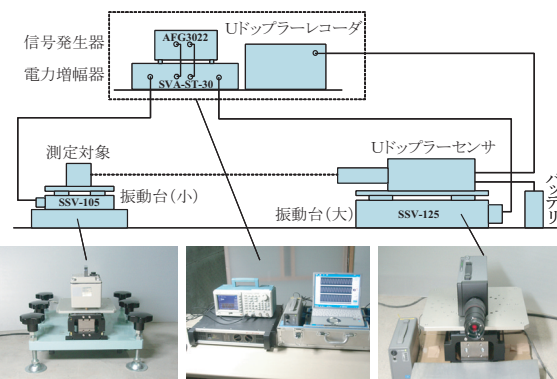


図5 室内実験装置

特集：鉄道力学

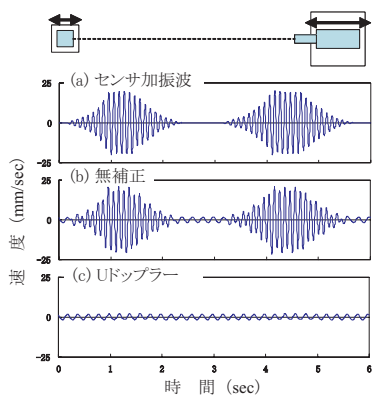


図6 過渡的で大振幅な加振の影響

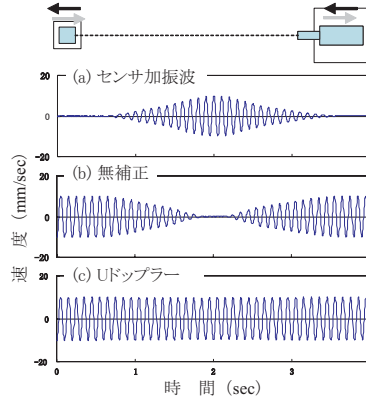


図7 同周波数（同位相）加振の影響

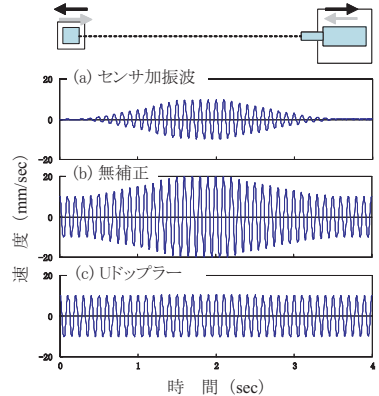


図8 同周波数（逆位相）加振の影響

おり、内蔵センサによる補正の効果が確認された。

(2) 測定対象と同周波数の振動の除去効果

従来、LDVなどの非接触センサで列車通過時の構造物振動を測定対象近傍から測定する場合、構造物振動の伝達によりセンサに構造物振動と同周波数の振動が加わり、測定精度が低下することがあった。このような状況を模擬した実験を実施した。

図7、図8に、測定対象を正弦波加振

(10Hz, 10mm/sec) した状態で、Uドップラーセンサに同図(a)の周波数10Hz、最大振幅10mm/secの振動を与えた際の測定結果を示す。測定対象およびUドップラーはレーザ照射方向と同一方向に加振した。図7は測定対象とセンサの振動が同位相、図8は逆位相の結果である。

Uドップラーセンサの加振振幅が大きくなるにつれて、(b)無補正の記録の振幅は、図7では小さくなり、図8では大きくなっているが、何れの図においても(c)Uドップラーの記録は測定対象の振動だけを検出できており、Uドップラーの補正技術は、測定対象とUドップラーセンサが同じ周波数成分を持って振動する場合にも有効であることが確認された。

(3) センサの横／斜め方向に作用する振動の除去効果

Uドップラーセンサをレーザ照射方向と異なる方向に加振した場合の補正効果を確認した。

まず図9に、測定対象をレーザ照射方向に正弦波加振(10Hz, 10mm/sec)し、Uドップラーセンサをレーザ照射方向に対して垂直な方向に正弦波加振(10Hz, 10mm/sec)した際の測定結果を示す。本ケースでは、同図(c)Uドップラーの記録のみならず、(b)無補正の記録も測定対象の振動を正しく検出できている。次に、図10にUドップラーセンサをレーザ照射方向に対して45°傾いた方向に正弦波加振(10Hz, 10mm/sec)した際の測定結

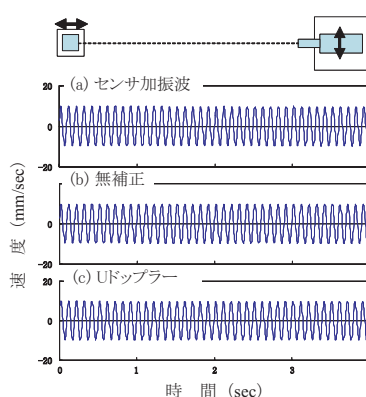


図9 横方向加振の影響

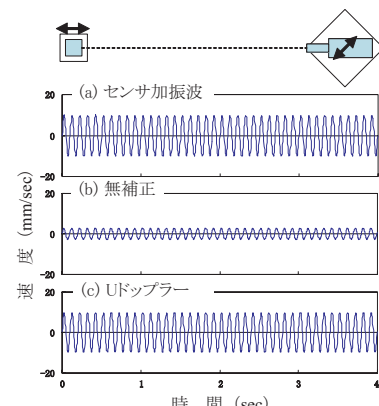


図10 斜め方向加振の影響

果を示す。この場合は、Uドップラーセンサがレーザ照射方向の振動成分を有しており、同成分の位相が測定対象と一致していたため(b)無補正の振幅が小さくなっているが、(c)Uドップラーの記録は測定対象の振動を正しく検出している。これらの結果から、Uドップラーの補正技術は、センサ本体にレーザ照射方向以外の振動成分が発生した場合にも有効であることが確認された。

3.3.2 測定角度の確認

Uドップラーセンサを固定し、測定対象をこれまで同様にSSV-105で正弦波加振(周波数5.0Hz, 振幅10mm/sec)し、SSV-105の設置角度を変更することにより、測定対象の振動方向とレーザ照射方向とがなす角度 θ を 0° から 80° まで順次変化させて測定を実施した。

測定結果を、振幅を $\theta = 0^\circ$ の際の振幅で正規化した時系列波形として図11に示す。何れの測定角度においても測定対象の周波数を正確に検出できた。振幅(未補正)は測定角度の増大に伴って $\cos\theta$ 倍になっており、(4)式で振幅を補正可能であることが確認された。

3.3.3 最大測定距離の確認

測定対象を周波数5Hz, 振幅0.05mmの正弦波で加振し、晴天時に屋外で100m離れた地点からUドップラーで測定したところ、図12に示す通り、周波数、振幅ともに正しく検出できることを確認した。

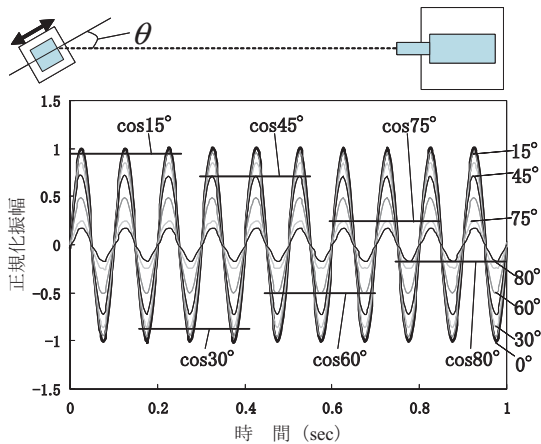


図 11 測定角度による変化

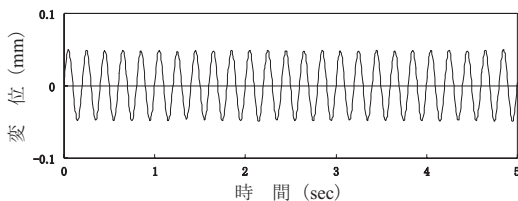


図 12 測定距離 100m での測定結果

4. RC ラーメン高架橋の常時微動測定

振幅が非常に小さい常時微動を屋外で測定する場合には、三脚上に設置したUドップラーセンサ本体の揺れの振幅が構造物の揺れを上回ることも多く、その補正が不可欠である（図13）。Uドップラーの補正技術が常時微動測定に有効であることを示す事例として、RC ラーメン高架橋の常時微動測定結果例⁶⁾を図14に示す。

無補正の記録でセンサ本体の振動の影響による10～20Hzの高周波成分が卓越しているのに対して、補正後の結果は、高架橋に設置した微動センサの記録（構造物振動の真値）と非常に近く、高架橋の1次固有振動数（3.6Hz）も推定可能であった。

このUドップラーによる常時微動の非接触測定手法を用いれば、高架橋の振動特性を非接触で同定できる。

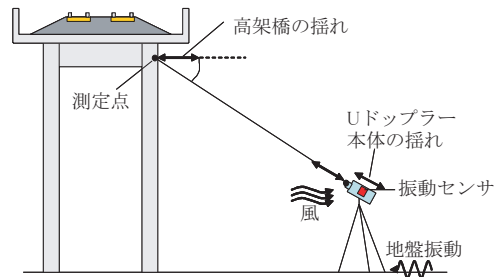


図 13 高架橋の常時微動測定

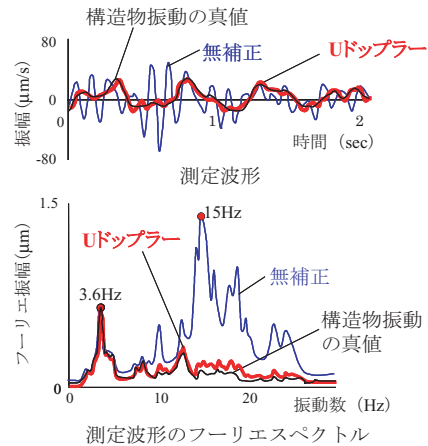


図 14 高架橋の常時微動測定結果例

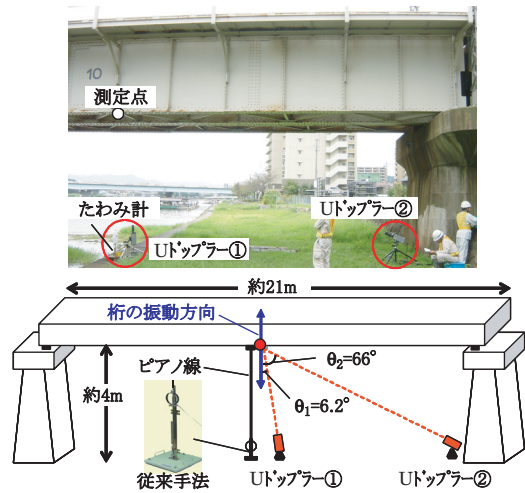


図 15 桁たわみの測定方法

5. 鉄道橋梁の桁のたわみ測定

5.1 桁のたわみ測定

従来、桁のたわみは桁に取り付けたピアノ線を介して地上に設置した変位計で測定してきたが、桁下が河川や交通量の多い道路の場合、実施が困難であった。たわみ測定の作業を効率化し、また、これまで実施が難しかった場所での測定を容易にするために、Uドップラーの適用を検討した。

5.2 測定方法

スパン約21m、桁下高さ約4mの在来線の鋼上路桁を対象として列車通過時の桁たわみを測定した（図15）。Uドップラーセンサを①測定点直下付近と②橋脚付近の2

箇所に設置して測定を実施した。比較のため、ピアノ線とリング式たわみ計を用いた従来手法による測定も同時に実施した。測定箇所には、反射シールを貼付した。サンプリング周波数は200Hzで、ハイパスフィルタを用いずに測定し、Uドップラーが記録した速度波形を簡易な基線補正を行った上で積分して変位波形を求めた⁷⁾。

5.3 結果と考察

図16に列車（普通列車、10両編成、時速94km）通過時の従来手法および2台のUドップラー（反射シール使用）によるたわみの測定結果を示す。波形の形状と最大たわみ（2.8mm）は実用範囲内で十分に一致した。桁の振

特集：鉄道力学

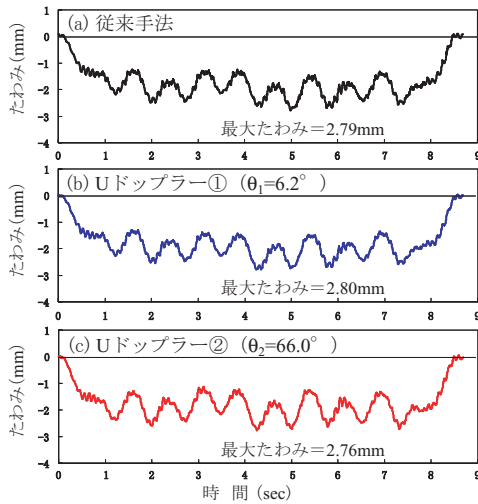


図 16 従来手法と U ドップラーの測定結果の比較

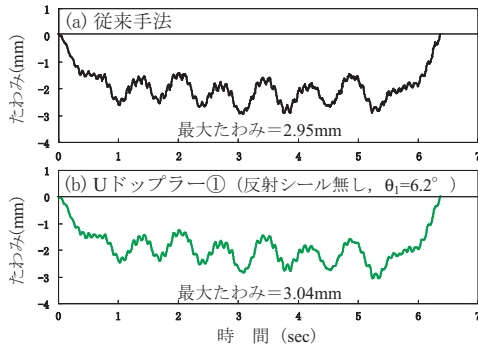


図 17 反射シール無しでの測定結果

動方向とレーザ照射方向が大きな角度(本事例では 66°)をなす橋脚付近に設置した U ドップラーを用いてもスパン中央のたわみを測定可能であることを確認した。

図 17 に列車(快速列車, 8 両編成, 時速 99km) 通過時の従来手法および U ドップラーの反射シール無しでの測定結果を示す。測定点表面は白色系の塗装面である。受光不足によるノイズの累積で, 記録波形の後半で, 波形の形状が若干乱れたが, 最大たわみはほぼ一致した。

過去の測定事例においても, 測定距離が短い場合, 測定角度が小さい場合, 測定対象の表面状態が再帰反射に適している場合は, 反射シール無しでも測定を実施できることを確認している。しかし, 測定精度の低下を見逃す危険があるので, そのような場合にも反射シールを使用して測定を実施している。反射シールは安価で使い捨てが可能であり, 竿などを利用して足場や高所作業車を用いずに高所に貼付することもできる⁸⁾。また, 竿などでの貼付が難しい箇所の反射性向上手段として, 反射塗料入りペイント弾と発射機からなる反射ターゲット形成装置(図 18)も開発中であり, 別途ご報告したい。

6. おわりに

構造物診断用非接触振動測定システム「U ドップラー」を

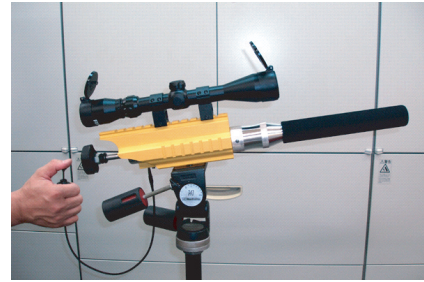


図 18 発射機型反射ターゲット形成装置(開発中)

開発し, 実験および現地測定により, その測定性能を検証した。実験により, 内蔵センサによる補正技術が U ドップラーセンサに生じる各種ノイズ振動の影響の除去に有効であること, 測定角度が 80° に至っても測定対象の周波数および振幅を検出可能であること, 測定距離 100m での測定が可能であることが確認された。また, 現地測定により, U ドップラーが, 常時微動測定による高架橋の固有振動数の推定や, 橋桁のたわみ測定に適用可能であることが確認された。

これまで, 高架橋の線路直交方向の固有振動数推定や桁の鉛直たわみ測定など, 1 方向の振動が明確に卓越する対象の検査への適用に取り組んできたが, 今後は複数の U ドップラーセンサを用いた多次元測定にも取り組み, より高度な検査への適用拡大を検討したい。

謝 辞

本システムの開発にご協力いただいた内藤浩志氏を始めとするグラフテック株式会社各位, 現地測定にご協力いただいた JR 西日本各位に深甚の謝意を表す。

文 献

- 1) 鈴木武夫: 振動による橋脚の健全性の判定法, 土木学会第 6 回年次学術講演会概要, p. 18, 1950
- 2) グラフィックリポート・橋梁診断システム (BMC システム), RRR, Vol.50. No.9, pp. 21-24, 1993
- 3) 西村昭彦, 棚村史郎: 既設橋梁橋脚の健全度判定に関する研究, 鉄道総研報告, Vol. 3, No. 8, 1989
- 4) 中村豊: 総合地震防災システムの研究, 土木学会論文集, No. 531/I-34, pp. 1-33, 1996
- 5) 依田秀則, 阿部雅人, 藤野陽三, 貝戸清之: レーザドップラ速度計を用いた実験的モード解析, 第 54 回年次学術講演会概要集 (CD-ROM), 1999
- 6) 上半文昭, 目黒公郎: 鉄道構造物の振動診断を目的とした非接触微動測定法の開発, 土木学会地震工学論文集, Vol.27 (CD-ROM), 2003
- 7) 上半文昭: 鉄道橋梁の桁たわみの非接触測定法に関する基礎検討, 土木学会第 61 回年次学術講演会概要集 (CD-ROM), 2006.9
- 8) 上半文昭: 構造物の振動を非接触で測る, RRR, Vol.64, No.4, pp. 22-25, 2007