

# 鉄道橋検査を目的とした遠隔非接触測定技術の開発

上半 文昭\*

Development of Remote Non-contact Vibration Measurement Technology for the Inspection of Railway Bridge

Fumiaki UEHAN

Remote non-contact measuring systems for the health monitoring of railway bridges were newly developed by RTRI. In this report, U-Doppler II which is a new model of a non-contact vibration measurement system intended to be used at railway companies is introduced first. A method for efficiently estimating the natural frequencies and the tensile forces of cable stayed bridge cables was proposed using long-distance U-Doppler which was developed for the inspection of long-span bridges and continuous rigid-frame viaducts. Furthermore, an unmanned aerial vehicle (UAV) for structural inspection was developed that can run under the structure surface by a continuous track to shoot harmful alteration areas.

キーワード：非接触測定，U ドップラー，UAV，長大橋，常時微動，変状調査

## 1. はじめに

度重なる自然災害や社会インフラの老朽化などの課題を抱えるわが国では、鉄道においてもこれを支える構造物の検査技術の高度化が必須の課題となっている。そこで鉄道総研では、構造物検査に非接触測定技術を適用することによって、高所作業や線路内への立ち入り作業を省略し、検査作業を安全化、効率化するための技術開発に取り組んできた。これまで、レーザを用いた遠隔位置からの非接触振動測定技術を検査業務に適用した検査手法の開発や技術の普及を進めるとともに、無人航空機 (UAV: Unmanned Aerial Vehicle) 等の新技術活用の検討を進めてきた。

本報告では、まず、鉄道総研が開発した非接触振動測定技術<sup>1)</sup>と構造物検査用 UAV<sup>2)</sup>について概要を説明する。次に、非接触振動測定技術の長大橋の検査への応用例、ならびに、UAV の橋りょう変状調査への適用例を紹介し、従来手法による測定結果との比較により、測定結果の妥当性を検証する。

## 2. 遠隔非接触測定システムの開発

### 2.1 構造物診断用非接触振動測定システムの開発

対象物の振動を非接触で測定する装置として、レーザドップラー速度計 (LDV: Laser Doppler Velocimeter) に着目し、同センサに屋外での大型構造物測定に適用するための改良を施して、図 1 (a) に示す構造物診断用の非接触振動測定システム<sup>1)</sup>を開発した。後述する自己振動の補正技術が同システムの主たる特長であるため、同システムを、外乱の影響を受けない LDV という意味

\* 鉄道力学研究部 構造力学研究室

を込めて「U ドップラー (Undisturbed laser DOPPLER velocimeter)」と呼ぶこととした。

LDV の速度検出手法を説明する。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  $\lambda_0$ 、入射光と物体の移動方向とがなす角度を  $\theta$  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。

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

よって、入射光に対する反射光の周波数の変化量 (ドップラー周波数)  $f_D$  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、 $f_D$  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  $\lambda_0$  は安定しているため、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  $\theta$  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。

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。

そこで、U ドップラーでは、LDV の光学センサとは

特集：鉄道力学

別に、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持つ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手法を導入した。

構造物上のある測定点をその振動方向と角度  $\theta$  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  $\theta$  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、 $\cos\theta$  で除する。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  $V_L(t)$ 、LDV 本体に取り付けた微動センサの速度記録を  $V_S(t)$  とすれば、振動方向と角度  $\theta$  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。

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

U ドップラーはこの内蔵センサを用いた自己振動の補正技術の適用により、大型の土木構造物各部の振動を、非接触センサ本体がノイズ振動を受けやすい屋外環境においても、構造物上を列車が通過する際の大きな振動(振幅数 10mm/s ~ 数 100mm/s) から、平時の極微小な振動(暗振動)である常時微動(振幅数  $\mu\text{m/s}$  ~ 数 100 $\mu\text{m/s}$  程度)に至るまで、測定箇所にセンサを取り付けた場合と同様



(a) Uドップラー I (b) Uドップラー II

図1 非接触振動測定システム「U ドップラー」

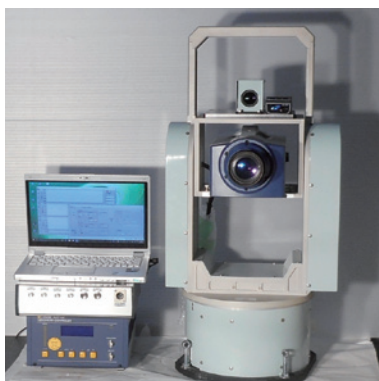


図2 スキャニング機能付き長距離型 U ドップラー

の振動記録を地上から非接触で測定することができる。

2007 年に開発した「U ドップラー I」は、既に様々な対象の検査・調査等に活用されているが、2016 年には後継機種としてワイドレンジ化、小型軽量化、無線通信化などの改良を施した図 1(b) に示す「U ドップラー II」<sup>2)</sup> を開発した。また、より高度な検査手法の開発に向けて、不可視光 LDV を適用して非接触測定距離を延長するとともに測量や自動視準の機能を付加した、スキャニング機能付き長距離型 U ドップラー (図 2) を現在開発中である。

2.2 構造物検査用 UAV

近年、マルチコプターなどの UAV の利活用が飛躍的に進歩している。UAV は人が容易に近づけない高所や危険箇所の外観情報の収集に有効であり、先に述べたレーザ振動測定と同様に構造物検査の安全化、効率化への寄与が期待できることから、筆者らもその活用を検討してきた。

図 3 (a) は 2010 年に開発した遠隔制御式の反射ターゲット形成装置<sup>3)</sup> で、遠方に位置する対象物にラジコンヘリコプターで接近して再帰反射塗料を吹き付けることでレーザ計測用の反射ターゲットを遠隔設置する装置である。図 3 (b) はマルチコプターにステレオビデオカメラ<sup>3)</sup> を搭載した空撮測量用 UAV である。地上からの測量が難しい高所や遠方の対象物を多方向からステレオ空撮し、外観の映像だけでなく、左右のカメラの間隔と視差を利用して三角測量の原理で被写体の三次元形状を取得することができる。

図 4 は機体上部に無限軌道を搭載した「付着走行用 UAV」である<sup>2)</sup>。橋りょうの桁下面などの検査への適用を目的としたもので、寸法は縦 800mm × 横 800mm × 高さ 350mm である。変状等を撮影する記録用カメラ 1 台と、測定対象に高い位置精度で接近するために飛行方向(前方)および記録カメラ撮影方向の画像を地上のモニタに送信する 2 台の無線カメラが搭載されている。この付着走行用 UAV は橋りょうの桁の下面に付着して電動の無限軌道で走行するため、構造物上の任意位置に高い位置精度で接近して近接画像を取得できる。一般的な UAV は、線路への侵入・墜落の危険性を完全に除去する



(a) 反射ターゲット形成装置 (b) 空撮測量用 UAV

図3 これまでの UAV の活用事例



図4 構造物検査用 UAV

ことが困難であるが、この付着走行用 UAV は、気流の乱れや GPS 信号の途絶が生じやすい橋りょうの桁下部においても、付着して無限軌道走行することにより操縦不能に陥ることなく安定して検査を実施できる利点がある。

### 3. U ドップラーによる長大橋の振動特性調査

#### 3.1 鉄道 PC 斜張橋の検査

遠隔非接触振動測定技術の長大橋検査への応用事例<sup>4)</sup>を示す。

鉄道橋における PC 斜張橋の採用実績はまだ少なく、斜材のリラクゼーションや各部材の疲労など、その経年特性の定期的な検査が必要である。しかしながら、PC 斜張橋は一般に長大かつ多数の部材で構成されることから、検査・状態監視作業の効率化・高度化が重要な課題である。そこで、斜材の張力推定ならびに主桁の動的たわみ測定への遠隔非接触測定技術の適用を試みた。図5に示すように、従来は個々の斜材に加速度計を取り付けてハンマー加振して調べてきた斜材張力の遠隔位置からの常時微動測定による推定、ならびに主桁にピアノ線を取り付けて実施してきた動的たわみ測定のノンターゲット（反射材等の使用無し）での非接触測定を試み、過去に実施された従来手法による測定結果と比較した。

#### 3.2 測定対象橋りょう

対象橋りょう（図6）は、H型主塔からの2面吊り11段のハープ型マルチケーブルで支間長133.9mの主桁を支持する構造のPC斜張橋である。主桁と主塔は剛結、桁端は単純支持されている。1996年に完成し、1997年から供用されている新幹線鉄道で初めてのPC斜張橋である。

斜材ならびに主桁の測定は2016年1月（日中）に長距離型Uドップラーを用いて実施した。図6中に橋りょう上の測定箇所を、図7に長距離型Uドップラーの設置位置を示す。長距離型Uドップラーと測定対象間の非接触測定距離は10～150m程度であり、斜材および主桁下面に反射材等を設置することなくノンターゲットでの測定を実施した。

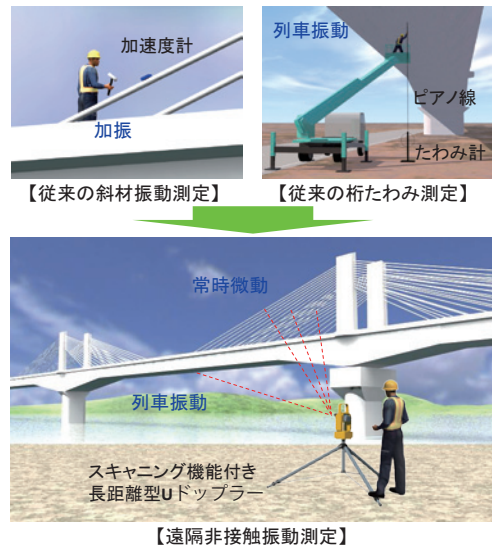


図5 長大橋振動測定への遠隔非接触測定の適用

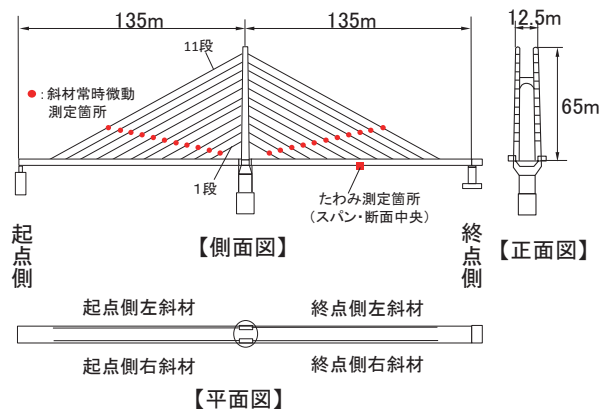


図6 対象橋りょうと測定箇所

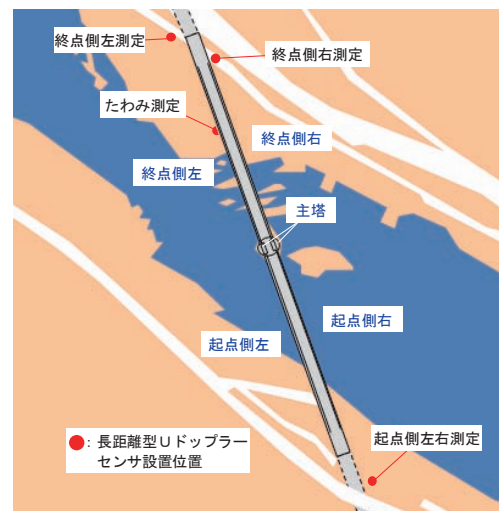


図7 Uドップラーセンサ設置位置

### 3.3 測定結果

#### 3.3.1 斜材の張力推定結果

図8に斜材の常時微動の測定波形例、図9に常時微動のフーリエスペクトル例を示す。最大速度振幅0.3mm/

特集：鉄道力学

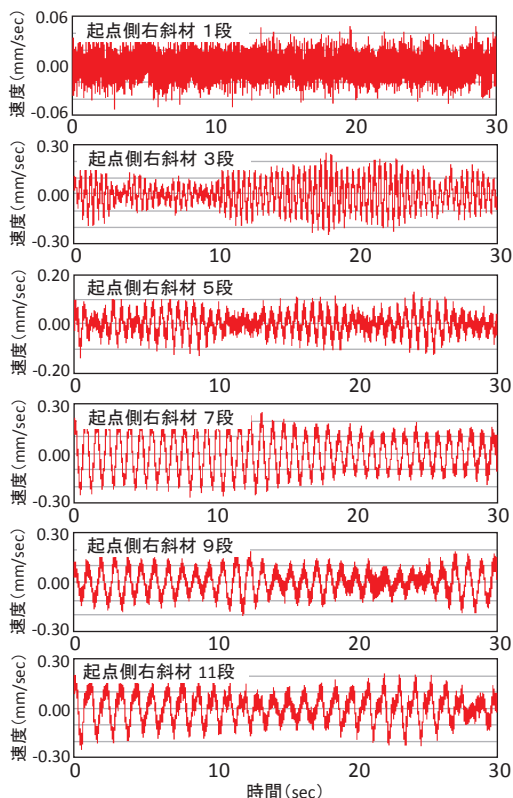


図8 斜材常時微動の測定波形例

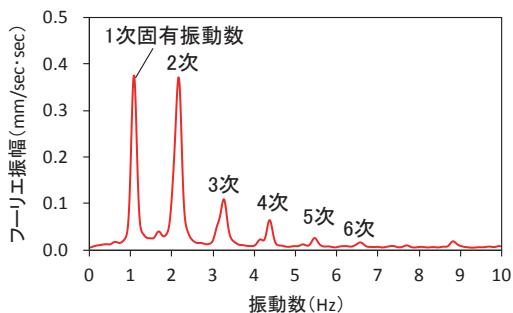


図9 斜材常時微動の周波数特性（起点側右斜材9段）

sec以下の微小な振動が測定できており、斜材が長くなる程、振動周期が長くなる傾向も確認できる。フーリエスペクトルには、一次（基本）振動数とその整数倍の高次振動数の卓越が確認できる。弦の基本振動数の $n$ 倍振動の固有振動数 $\nu_n$ は、弦の長さを $l$ 、線密度を $\rho$ 、張力を $T$ とすると式(5)で示され、基本振動数の整数( $n$ )倍の値を示す。測定結果も同様の傾向を示しており、斜材の振動特性を適切に捉えているものと考えられる。

$$\nu_n = \frac{n}{2l} \sqrt{\frac{T}{\rho}} \quad (5)$$

図10に常時微動から推定した全斜材の固有振動数を2008年12月（夜間）に実施されたハンマー打撃と加速度計による調査結果と併せて示す。両者の十分な一致が確認でき、2008年の測定結果に対する固有振動数の低下は平均0.54%であった。

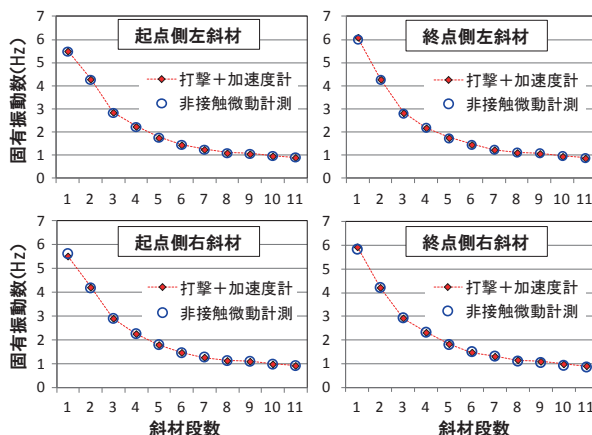


図10 斜材固有振動数の推定結果

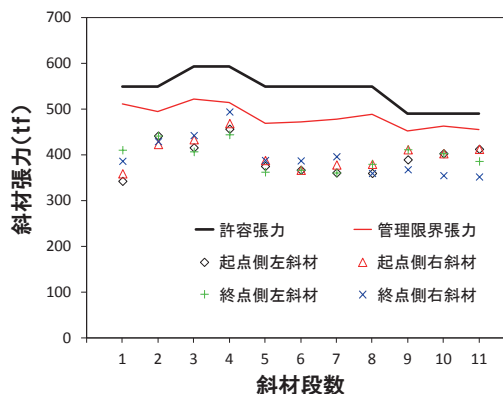


図11 斜材張力の推定結果

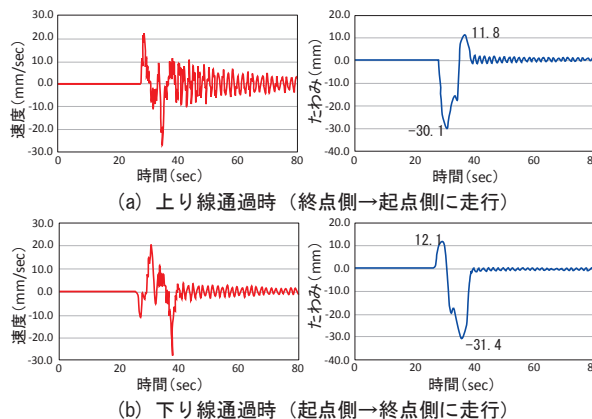


図12 列車通過時の主桁の動的たわみの測定結果

図11に固有振動数から求めた各斜材の張力を示す。式(5)より、張力は固有振動数の2乗に比例する。張力は、橋りょう建設時の斜材の張力調整値と固有振動数に基づいて設定された特性値（比例定数）に本計測で得られた固有振動数の2乗値を乗じることにより簡易に推定した。全ての斜材の張力が、建設時に算定された許容張力<sup>5)</sup>から列車荷重分を差し引いた管理限界張力値以下であることが確認できた。

3.3.2 主桁の動的たわみ測定結果

図12に列車通過時の終点側主桁の動的たわみの非接触測定結果例を示す。Uドップラーは速度計であり、測

定記録を積分することにより、変位であるたわみ波形が算出される。列車が終点側から起点側に向けて走行する際には、まず下方に約30mmたわみ、走行列車が起点側に移動して起点側を下方に押し下げるにつれて起点側の桁が上方に12mm程度押し上げられている。列車が起点側から終点側に向けて走行する際にはその逆の変化を示している。対象橋りょうでは、1997年から2005年に従来手法によるたわみ測定が複数回実施されており、各測定における下方へのたわみ量の平均値が29.8～31.1mm<sup>5)</sup>と報告されている。主桁の動的たわみ量は供用開始時から大きく変化していないものと推定される。

#### 4. 構造物検査用 UAV による変状調査

##### 4.1 変状調査への UAV の応用

構造物検査用 UAV による橋りょうの外観変状調査を実施した。

2016年2月に鉄道総研宮崎実験線の実橋りょうを対象として現地試験を実施した。調査対象のRC橋りょう(図13)は、経年により桁下面に汚れや変状が多数発生している。桁下面のコンクリートの変状箇所、地上からの視認が難しい桁端部の狭隘部を付着走行により撮影した。また、現状の変状検出性能の調査を目的として、桁下面に貼り付けたクラックスケール(コンクリート表面に生じたひび割れの幅を調べるための定規)の撮影試験を実施した。その際、比較のため、構造物検査用 UAV を桁下面に付着走行させず、空中でホバリングした状態での空撮も実施した。

##### 4.2 変状箇所の撮影結果

まず、構造物検査用 UAV を用いれば桁下面を無限軌道で自在に移動でき、機体の目視および地上に無線送信される画像情報を参考にして撮影対象物に高い位置精度で接近できることが確認できた。

図14に変状箇所の撮影状況および撮影画像を示す。撮影画像は記録用カメラのものである。コンクリートの



(a) 変状箇所の撮影状況



(b) 撮影画像(記録用カメラ)

図14 桁下面変状調査



(a) 狭隘部撮影状況



(b) 撮影画像(無線カメラ送信画像)

図15 狭隘部調査



図13 調査対象橋りょう

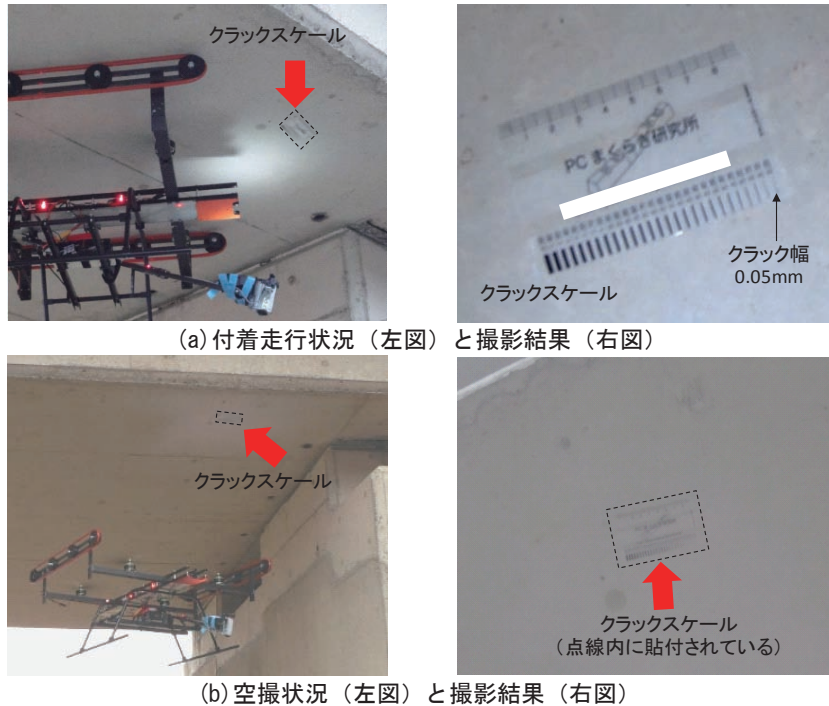


図 16 付着走行と空撮によるクラック検出性能の比較実験

破りが剥落し、鉄筋が露出・発錆している状況を詳細に捉えることができた。

図 15 に狭隘部の撮影状況および撮影画像を示す。撮影画像は地上モニタに映し出された無線カメラの送信映像である。支承部間の空洞内部の状況を撮影でき、鳥害による内部の汚損が確認できた。

#### 4.3 付着走行と空撮によるクラック検出性能の比較

図 16 に橋りょう下面に貼付したクラックスケールの撮影試験状況および撮影画像を示す。比較用の空撮は、構造物検査用 UAV を出来る限りクラックスケールに接近飛行させて行った。その結果、同等のカメラ条件の場合、空撮より付着走行撮影の方が確実に鮮明にクラックスケールを捉えることができ、本実験条件下では、幅 0.05mm のクラックも検出可能であることが確認できた。

### 5. おわりに

鉄道総研が開発した遠隔非接触測定技術を紹介し、最近の検討事例として、長距離型 U ドップラーによる長大橋の振動測定結果ならびに構造物検査用 UAV による橋りょう桁下部の変状調査結果を示した。

- (1) 長距離型 U ドップラーを用いれば、反射材等を設置することなく長大橋の部材の常時微動や列車通過時振動を測定でき、従来測定手法による結果との比較から測定結果の妥当性が確認できた。
- (2) 橋りょう桁下面を付着走行できる構造物検査用 UAV を用いれば、変状箇所が高い位置精度で接近して撮

影することができ、同一カメラ条件の場合、従来の空撮よりも詳細に変状を把握できることを示した。

現在、長距離型 U ドップラーによる構造物部材の自動認識・自動視準化、構造物検査用 UAV の小型化および搭載検査機器の開発を進めているので、別途報告したい。

### 謝 辞

現地試験にご協力いただいた(株)東日本旅客鉄道長野支社、長野土木技術センター各位に深甚なる謝意を表す。なお、本研究の一部は、国土交通省の鉄道技術開発費補助金を受けて実施した。

### 文 献

- 1) 上半文昭：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，鉄道総研報告，Vol.21, No.12, pp.17-22, 2007
- 2) 上半文昭：構造物を遠隔非接触計測で診断する，RRR, Vol.74, No.2, pp.24-27, 2017
- 3) 上半文昭：遠隔非接触計測による岩盤斜面の安定性評価システム，検査技術，Vol.20, No.6, pp.6-11, 2015
- 4) 上半文昭，松尾賢，小林泰一郎，竹村禎修：遠隔非接触測定による鉄道 PC 斜張橋の振動特性調査，土木学会第 71 回年次学術講演会，I-074, pp.147-148, 2016
- 5) 田中淳一，小松朗，秋山あかね：北陸新幹線 PC 斜張橋の経年特性，土木学会第 65 回年次学術講演会，IV -360, pp.719-720, 2010