岩盤斜面評価用非接触振動計測システムに関する基礎的検討

上半　文昭*　　村田　　修**　　斎藤　秀樹***　　大塚　康範***

Fundamental Study on the Remote Vibration Measuring System for Evaluating Rock Slope Stability

Fumiaki UEHAN　Osamu MURATA　Hideki SAITO　Yasunori OTSUKA

This paper introduces a fundamental study on the evaluation method of rock slope stability by applying a non-contact vibration measuring system termed as “U-Doppler” that has been developed by the RTRI. Recently, some techniques for rock slope evaluation by means of vibration measurements have been developed. Those techniques apply the vibration characteristics of rock block such as predominant frequency and accumulated amplitude as a risk assessment index of rock block falling; however, involve the dangerous measurement works on a steep rock slope. Adoption of a long-distance remote measurement method enables to improve the efficiency and safety of the measurement works. Then, the authors have found that the U-Doppler worked satisfactorily as one-component geophone, and developed the prototype of 3D measurement system using U-Doppler sensors and wireless LAN.

キーワード：岩盤斜面，Uドップラー，非接触測定，微動測定，安定性評価，LDV

1．はじめに

鉄道沿線の岩盤斜面の崩壊は，ひとたび発生すると列車脱線や長期運休などの大きな被害をもたらす可能性があるため，岩盤斜面中の不安定な岩塊を検出して監視・対策を施す必要がある。しかしながら，岩盤斜面上の不安定岩塊を定量的かつ効率的に検出することは容易ではなく，鉄道沿線の数多くの岩盤斜面を監視するためには膨大なコストが必要である。

これまで岩盤や浮石の安定性評価は地表踏査による目視観察で行われてきたが，近年，写真測量や物理探査などの非破壊検査手法の適用が試みられるようになった。中でも地震計を設置して岩塊の振動特性を調べる手法は，定量的な安定性評価手法として期待されている。転石などの浮石とその基礎地盤部に地震計を設置して振動を計測し，両者の振動特性の違いから落石危険度を評価する手法[1]は，日本道路公団（当時）によってマニュアル化が行われた。また，岩盤斜面中の不安定岩塊を抽出することを目的として，対象岩塊と基盤岩部に地震計を設置し，振動計測を行う手法[2]も土木研究所によってマニュアル化が試みられている。

これらの手法は，定量的な評価手法として有望であるが，危険な急崖斜面上での作業量が多い点が課題である。場合によってはロッククライミングなどで不安定な岩塊に地震計を設置する必要があり，作業の安全性や効率面の問題があり，相当のコストも発生する。

そこで，振動計測による岩盤斜面評価手法の効率化，安全化を目的として，著者らが研究するレーザを用いた遠隔非接触振動計測技術[3]の同手法への適用を検討することにした。研究の第一段階として，岩盤斜面の常時微動を遠隔非接触計測できることを確認し，岩盤斜面計測システムのプロトタイプを開発したのでここに報告する。

2．構造物診断用非接触振動測定システム「Uドップラー」

2.1　Uドップラーの概要

本研究では，岩盤斜面の振動の遠隔非接触計測装置として，振動測定による鉄道構造物検査法のより一層の効率化，安全化に向けて開発した構造物診断用非接触振動測定システム「Uドップラー」[3]を活用する。Uドップラー（図1）は，測定対象にレーザを照射してその反射光を受光し，ドップラー効果による周波数変化から，測定対象の速度を非接触で検出するセンサであるレーザドップラ速度計（以下，LDV）に現場測定用の改良を施したものである。数十m程度離れた場所からの構造物振動測定に用いられており，1台で列車通過時の比較的大きな

*　鉄道力学研究部（構造力学）
**　構造物技術研究部
***　応用地質株式会社（技術研究所）

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（図2，表1）。

2.2　内蔵センサを用いた補正技術

内蔵センサを用いた補正技術[4]が導入されている点が，Uドップラーの主な特長である。LDVはセンサと測定対象間の相対速度を検出する装置であるため，測定記録にはLDV本体の振動成分も含まれる。そのため，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，LDVの光学センサとは別に，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Uドップラーセンサ筐体内に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している（図3(a)）。また，Uドップラーセンサの水平面に対する傾き θ_s を測定する角度センサも内蔵されており，測定対象の振動方向と照射レーザのなす角度の影響の簡易な補正も自動的に行うことができる（図3（b））。時刻 t においてLDVが記録した速度を $V_L(t)$，内蔵した振動センサが記録した速度を $V_s(t)$，入射レーザと測定対象の振動方向のなす角度を θ とするとき，Uドップラーでは，測定対象の絶対速度 $V(t)$ を式(1)で求めている。

$$V(t)=\left(V_L(t)+V_S(t)\right)/\cos\theta \qquad (1)$$

これらの内蔵センサを用いた補正技術の適用により，Uドップラーは大型土木構造物等の振動を，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，測定箇所に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。

このUドップラーを用いて数十～数百m離れた場所から岩盤斜面の常時微動を測定できれば，不安定岩塊のスクリーニング作業や要注意岩盤の定期的な監視などを容易に実施できるようになると期待される。

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	バッテリ駆動式（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	0.2μm/s～100mm/s（2レンジ切り替え）
応答周波数範囲	DC～600 Hz
測定距離	1～100 m程度（反射シール使用時）

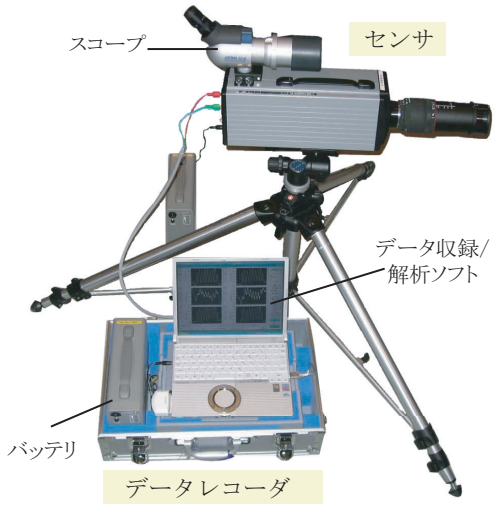


図1　Uドップラー外観

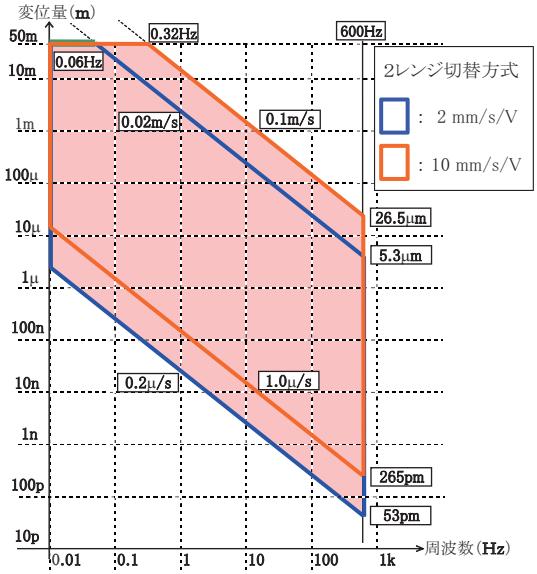


図2　Uドップラー（光学センサ）の計測範囲図

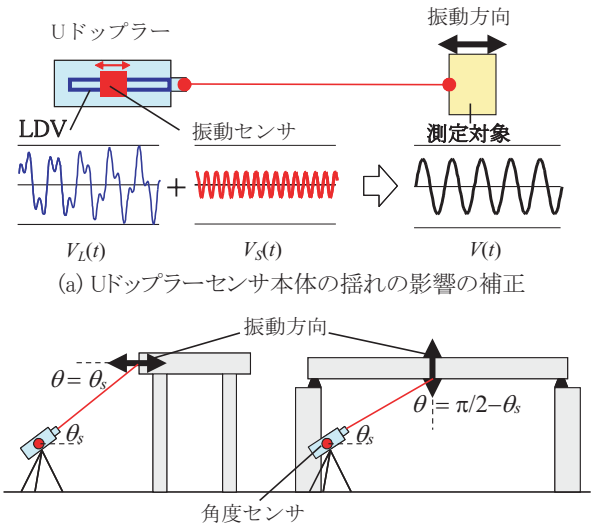


図3　内蔵センサを用いた補正技術

3．岩盤計測用地震計との性能比較基礎実験

Uドップラーによる橋梁等構造物の測定実績は十分にあるが，構造物よりも振動レベルが小さいと予想される岩盤斜面の常時微動の測定実績は無かった。そこでまず，簡単な模型実験を実施して，Uドップラーの測定性能を確認した。

岩盤斜面の常時微動計測に用いられている地震計（ジオフォン）に代えてUドップラーを用いることができるかどうかを確認するために，岩塊を模擬したコンクリートブロックの常時微動計測実験を実施した。図4の要領でコンクリートブロック上にジオフォンを設置し，その近傍に設けた測定点（再帰反射シールを貼付）に約10m離れた場所からレーザを照射して，レーザ照射方向1成分の常時微動を200Hzサンプリングで同時計測した。

両センサの周波数特性が異なるため，感度補正とフィルタ処理により3～30Hzでほぼ同一のゲイン特性となるよう調整し，得られた時系列波形を図5に，同波形のフーリエスペクトルを図6に示す。両者がよく一致しており，本実験条件下において，Uドップラーはジオフォンと同レベルの測定性能を有していることが確認できた。

4．不安定岩塊の現地計測実験

次に，実際の岩盤斜面においてUドップラーセンサ1台による不安定岩塊の常時微動計測を実施し，より長い測定距離での実岩盤斜面の測定性能を検証した。

目視観察により不安定であることが確認され，除去が予定されている岩塊を対象として常時微動の現地計測実験を実施した。図7に示すように，Uドップラーは岩盤斜面下の道路脇に設置した。Uドップラーと岩塊間の直線距離は約200m，鉛直角（仰角）は35.3°であった。図8に示すように岩塊表面には，Uドップラーのターゲットとして反射性能と遠方からの視認性が高い光波測量用反射プリズムを設置した。また，ジオフォンを設置し，常時微動を200Hzサンプリングで同時計測した。

まず，Uドップラー上部に取り付けたスコープを活用すれば，200m遠方の直径5cm程度のターゲットにもレーザを正確に照射できることが確認された。また，Uドップラーの計測記録から，強風や大型車両の走行などによるとみられるノイズの影響が少ない30秒間の波形を選びジオフォンによる同時計測結果と比較したところ両者はよく一致し，Uドップラーを用いて不安定岩塊の卓越振動数（8.1Hz）を推定できることが確認された（図9，図10）．これらの結果から，Uドップラーは不安定岩塊の常時微動等の微小振動の計測装置として活用可能であると考えられる。

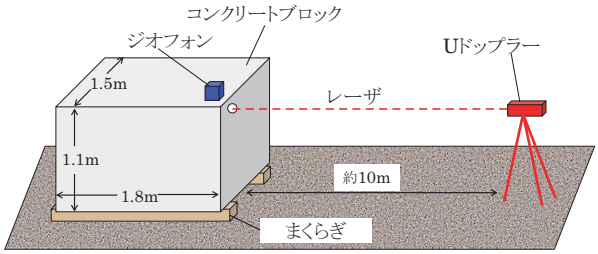


図4　コンクリートブロックの微動計測実験

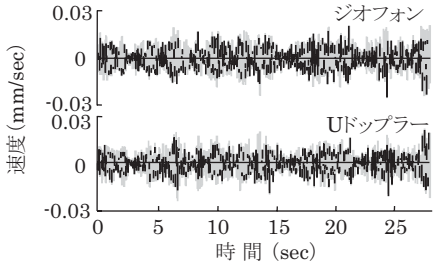


図5　微動の時系列波形の比較（コンクリートブロック）

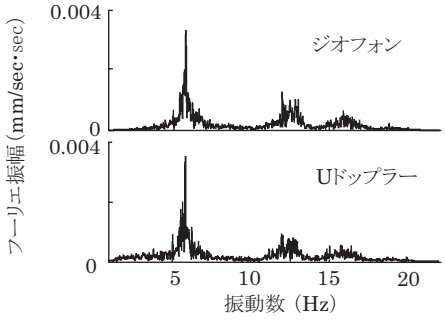


図6　微動のスペクトルの比較（コンクリートブロック）

図7　岩盤斜面の現地計測状況

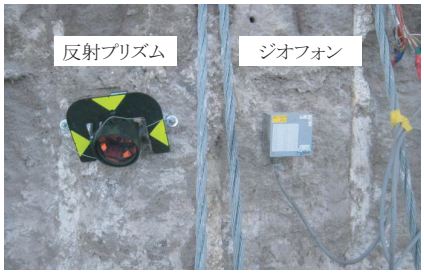


図8　岩塊表面の機器設置状況

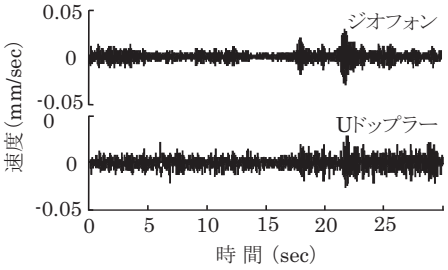


図９　微動の時系列波形の比較（不安定岩塊）

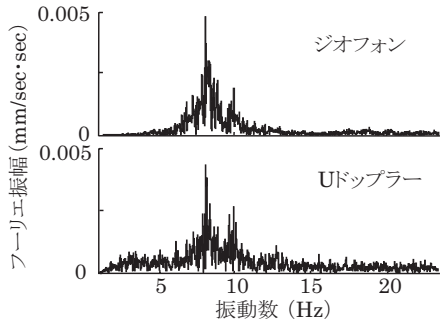


図 10　微動のスペクトルの比較（不安定岩塊）

5．岩盤斜面計測システムの検討

5. 1　岩盤斜面計測システムの基本構成

模型および現地実験の結果から，U ドップラーを不安定岩塊の常時微動等微小振動の計測装置として活用可能であると判断し，次のステップとして，岩盤斜面計測システムの基本構成を検討した。

岩塊の振動の卓越方向は背面亀裂の方向性などと関係している。そのため，岩塊の崩落危険度をより正確に評価するためには岩塊の挙動を3次元で捉えて振動の卓越方向を推定する必要がある。そこで，岩盤斜面計測を目的として，図11に示すように無線によるデータ通信を可能にしたUドップラーセンサ3台を用いた計測システムを構築することにした。

Uドップラーセンサはレーザ照射方向 1 成分の振動計であるが，3 台のセンサを用いて直交する水平方向 2 成分，鉛直方向 1 成分の振動を同時計測すれば測定点の 3 次元挙動を把握することができる。現地では，U ドップラーセンサの配置に制約があり，3 本の照射レーザを座標軸に合わせて直交させることは容易ではないが，異なる3方向から測定を実施して得られた収録データに式(2)による座標変換を施すことによって測定点の3次元挙動を推定できるものと考えられる[5]。

$$\begin{Bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_{x1} & \cos\theta_{y1} & \cos\theta_{z1} \\ \cos\theta_{x2} & \cos\theta_{y2} & \cos\theta_{z2} \\ \cos\theta_{x3} & \cos\theta_{y3} & \cos\theta_{z3} \end{bmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{Bmatrix} \qquad (2)$$

ここで，v_1，v_2，v_3 は図 11 に示す U ドップラー 1 ～ 3 それぞれが記録した速度，θ_{xi}，θ_{yi}，θ_{zi} は U ドップラー i から照射されたレーザが任意に設定した直交座標系の X 軸，Y 軸，Z 軸となす角度であり，v_x，v_y，v_z が岩塊の X 軸，Y 軸，Z 軸方向の速度の推定値である。

得られた岩塊の 3 次元挙動から，岩塊の振動の卓越方向を推定することができる。同方向を対象として，不安定岩塊と安定岩塊の振動特性を比較すれば，既存の評価法[1),2)]を用いて岩塊の安定性を評価することができる。また，同方向を対象として岩塊の振動モードを推定し，岩塊振動に占める並進成分と回転成分それぞれの寄与を分析することによって，岩塊の崩落モードを推定できる可能性があると考えている（図 12）。今後，これらの手法を用いてより的確に岩塊の安定性を評価する手法を提案する計画である。

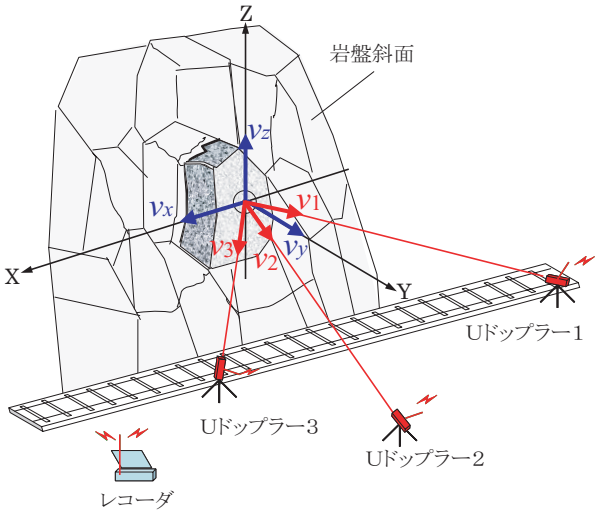


図 11　岩盤斜面用 3 次元計測システムのイメージ

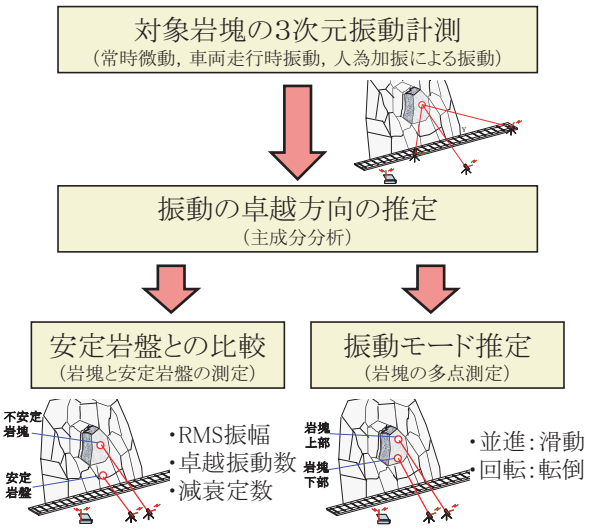


図 12　安定性評価の流れ

5.2　プロトタイプシステムの開発

岩盤斜面の常時微動等を3次元計測できる岩盤斜面計測システムのプロトタイプを開発した（図13）。

同システムは，新たに開発した無線化ユニット（図14）を用いて無線接続した3台のUドップラーセンサを基地局で制御して同時計測できるシステムである。3方向から岩盤斜面の振動を同時計測して得られた各方向成分の波形記録に，式(2)のベクトル演算を施して測定点の3次元挙動を推定し，振動の卓越方向等を推定する機能を有している。通信には無線LANを用いており，センサと基地局間の通信距離は，見通し100～200m程度である。A/D分解能は24bit（有効19bit以上）であり，200Hzサンプリングで Uドップラーセンサ3台（1センサあたり3ch）の同期計測を実施できることを確認した。

また，新たにUドップラー用の距離・方位測定装置（図15）を試作した。同装置の電子コンパス機能を利用すれば，レーザの照射方向を測定現地で正確に把握できる。距離計機能も活用すれば，岩盤斜面上の測定点やセンサの位置の簡易測量を実施できるようになる。

プロトタイプシステムの3次元計測機能の確認を目的として，小型3次元振動台を用いた振動実験を実施した。反射シートを添付した測定対象を振動台上に設置して振動数5Hzで東西方向（E-W）±1.0mm，南北方向（N-S）±0.5mm，上下方向（U-D）±1.25mmの振幅で正弦波加振した。同測定対象を図16に示すような3方向からUドップラーセンサで同時計測した。

得られた振動記録を岩盤斜面計測システムのデータ解析プラグラムで座標変換したところ，図17のような結果が得られ，各方向の振動成分を正しく検出できることが確認された。また，主成分分析により，水平角が北から時計回りに75°，鉛直角30°の成分が卓越することを確認した。

図13　岩盤斜面計測システムのプロトタイプ

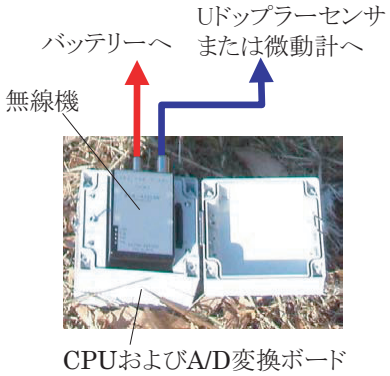


図14　無線化ユニット

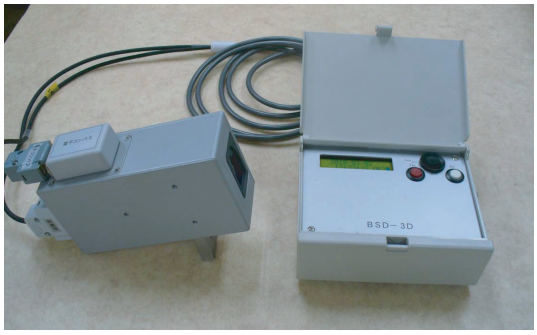


図15　距離・方位測定装置

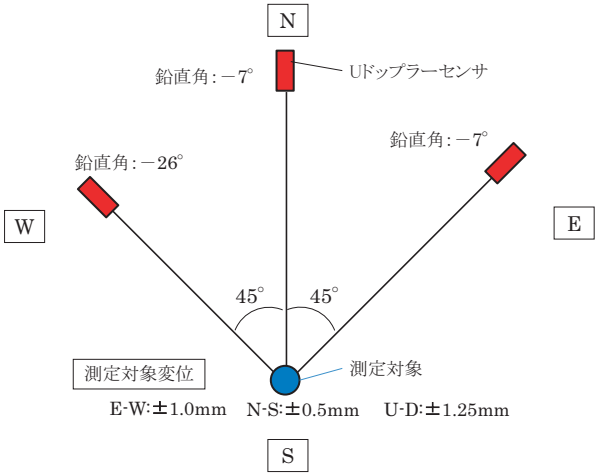


図16　小型振動台を用いた3次元計測実験

6．岩盤表面のレーザ反射性向上手法の検討

Uドップラーは測定対象にレーザを照射してその反射光を受光することによって計測を行う。そのため，測定距離は測定対象表面の状態に左右される。一般に自然岩盤表面のレーザ反射性は低く，現状では遠隔非接触振動計測を実施する場合は反射材を用いたレーザ反射性の向上が不可欠である。

前述の現地計測実験では研究の初期段階であることから，反射性および遠隔地からの視認性に優れた光波測量

用の反射プリズムを用いたが，急崖斜面へのプリズム設置は容易な作業ではない。より簡単な方法として再帰反射塗料を用いた反射ターゲット形成法を検討した。

図 18（a）は，塗料による再帰反射のしくみを示したものである。著者らの用いる再帰反射塗料は，半球部のみにアルミニウムを蒸着した粒径数10μm程度のガラスビーズを含有しており，ビーズ表面での屈折とアルミ層での反射によって，レーザをその入射方向に強く反射することができる。図 18（b）は再帰反射塗料を塗布したコンクリート片に光を照射してマイクロスコープで観察したものである。ビーズには方向性があり，再帰反射に寄与するビーズは50%程度であるが，市販反射シートのJIS 規格 1 級を超える反射輝度を有している。

反射塗料を用いれば不陸のある岩盤表面にも容易に反射ターゲットを形成することができる。図19は棒状の治具を用いた反射ターゲット形成作業例であり，形成されたターゲットを用いて岩盤の常時微動計測を実施できることを現地試験で確認した。また，より遠方への反射ターゲット形成手法として，反射塗料を充填したペイント弾を空気銃で発射し，着弾箇所に反射塗料を付着させる手法[3]も開発済みである。

7．おわりに

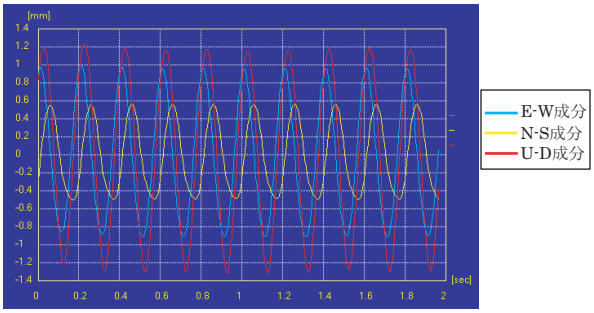
岩盤斜面評価用の非接触振動計測システムの開発に向けた基礎的検討として，岩塊の微動計測実験を実施してUドップラーが岩盤斜面計測用地震計と同等の測定性能を有することを確認するとともに，岩盤斜面計測システムのプロトタイプを開発し，模型実験で 3 次元計測機能を確認した。

今後は，計測システムの現場検証実験，反射ターゲットの遠隔形成装置の開発，不安定岩塊の安定性評価法の検討に取り組む計画である。

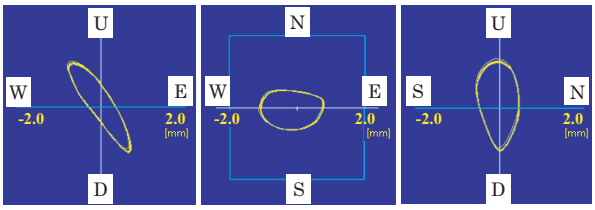
なお，本研究は，鉄道・運輸機構「運輸分野における基礎的研究推進制度」によるものである。

文　献

1）緒方健治，松山裕幸，天野浄行：振動特性を利用した落石危険度の判定，土木学会論文集，749巻，6-61，pp.123-135，2003
2）藤澤和範，浅井健一，永田雅一，石田孝司：不安定岩盤ブロック抽出のための岩盤斜面振動計測マニュアル（案），土木研究所資料，第 4051 号，2007
3）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
4）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
5）宮下剛，石井博典，大竹完治，藤野陽三：レーザードップラ速度計による三次元振動計測システムの構築，第60回土木学会年次学術講演会概要集（CD-ROM），2005

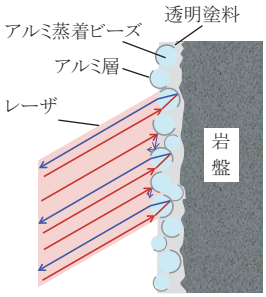


（a）座標変換後の時系列変位波形



（b）座標変換後の変位軌跡

図 17　プロトタイプシステムによる 3 次元計測結果



（a）塗料による再帰反射（側面図）

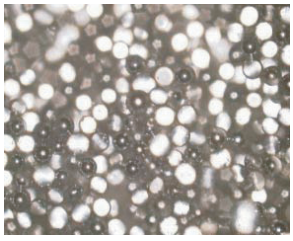

（白色が再帰反射に有効なビーズ）
（b）塗料付着状況（正面図）

図 18　再帰反射塗料

（形成されたターゲット）

図 19　反射ターゲット形成状況