

「新探査技術による河川堤防管理手法の高度化」

吉岡 裕嗣・橘 菊生・間野 耕司・大戸 正司・船田 征（株式会社パスコ）

序章

我が国の河川堤防は、河川整備基本方針・河川整備計画に基づき順次整備されつつある。しかし、近年の気候変動に伴うゲリラ豪雨等による堤防決壊などの甚大な被害が多発する傾向にある。一方で、河川管理に要する財政が厳しくなっている現状を鑑みると、従来の河川管理手法をより一層効率化することが求められる。

現状では河川計画および管理に必要な資料を得るために定期縦横断測量が行われているが、この測量では距離標をもとに200m間隔の河川断面形状の堤防法肩、法尻、小段といった主要な変化点の横断データしか得ることができない。加えて、以下の項目に対応する河川管理業務も要求されてきている。

- ① 予算の緊縮化にともなう日常の維持管理業務の効率化
- ② 気象変動にともなう豪雨による堤防決壊などの甚大な被害への対処
- ③ 洪水や震災により変状した堤防の早期復元・モニタリングの高度化

測量分野においては、GPS 測量および航空レーザ測量の導入が進んでいるが、広域を対象にした場合には GPS 測量は人的労力がかかる。また、航空レーザ測量は迅速性に劣り、実施するための工程を容易に立てることができないという課題がある。

さらに、測量結果から堤体の変状を定量的に求める技術はまだ確立されていない。

その中、近年公共測量の地形図作成において走行車両に搭載したレーザスキャナを用い

て広域な範囲を、迅速かつ効率的に測量する技術が普及している。本研究開発は、この道路構造物の情報等を取得するために導入が進められている車両搭載型レーザスキャナを河川堤防管理用モニタリングへと高度化させるための技術開発を実施し、新しい河川堤防管理手法を開発するものである。

具体的にレーザの活用による河川堤防の維持管理にあたっては、これまでの「事後的管理」から「予防保全的管理」に転換する「計画的型管理」を実現する戦略的な維持管理の推進が提言されている（社会資本整備審議会河川分科会資料より抜粋）。これを背景にして、「人からリモートセンシング」による効率的な「河道・堤防点検技術の開発」が期待されることを踏まえて、車両走行による「レーザプロファイラ」の技術開発に取り組んだ。

1. 目的

サイクル型維持管理として「河川（維持）管理計画⇒現地の把握・分析・評価⇒対策⇒改善・改良後の把握⇒管理計画の更新」を推進することを目的に、従来の巡視点検を効率的に実施するためのレーザを搭載した車両を走行することにより、高精度、高密度な堤防の3次元数値データと画像といった空間情報データを、容易に、安価に取得し、高度な分析による新たな河川管理手法を導入することが本研究の狙いである。

これらの取り組みは図 1.2 に示す一連の堤防点検作業の中の橙色で囲んだ箇所の効率化を図るものであり、計測データの活用の観点

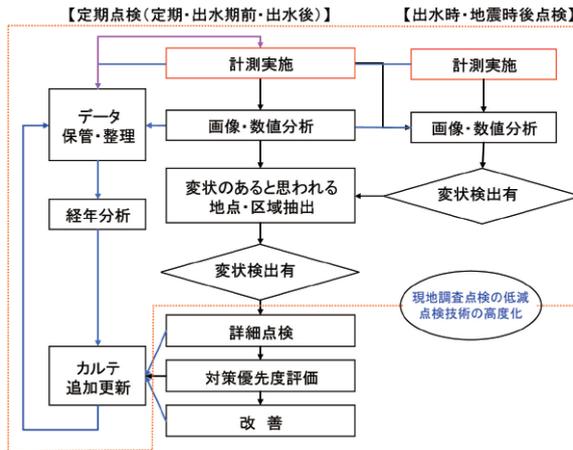


図 1.1 従来の点検に空間情報計測を加えた河川管理の高度化・効率化イメージ

からも次の利点が期待できる。

- ・計測範囲全体を網羅し、対象区間・区域の概査が均一に評価できる。
- ・画像や数値解析による工学的分析・評価が可能となる。
- ・注力ポイントが判読でき、重点点検区間・箇所を検出が可能となる。
- ・出水時・地震時の迅速な対応が可能となる。
- ・データの蓄積によりモニタリング分析が随時実施でき、評価精度の向上が期待できる。

2. 本研究の着眼項目と目標

河川堤防は、堤防天端より概ね 30m 範囲内で法面が形成されている。この範囲の堤防地表面の 3次元データ、デジタル画像をもって、堤防管理に必要な分析・評価を行うことが要求されることを踏まえて、「計測データの取得手法」と「得られたデータの分析・評価手法」に着眼し、本研究開発の目標を併せて設定した。

2.1 計測データ取得における着眼点

(1)一連の連続する河川堤防の区間データの取得方法

目標：堤防天端走行を基本に、法尻走行が可能な計測によるデータを構築する。

(2)経時変化などの分析・評価に求められるデータの密度、データ取得範囲と精度

目標：照射密度は 30 万回/秒レベル、走査範囲は 180 度のスキャナ技術を有すること。堤防の一般・変状・災害モニタリング管理を考慮した±20mmを確保すること。

(3)計測の位置精度の確保

目標：位置・高さ精度は従来の GNSS (全地球測位システム) と同等とし、堤防とその周辺の点群データ、デジタル画像を取得することが可能であること。

2.2 得られたデータの分析・評価における着眼点

(1) 定量的な変状分析

目標：堤防の定量的な変状分析を実現するために、分析技術の構築を行うこと。

(2) 堤防管理手法の簡便化

目標：河川管理の効率化の観点から、「堤防等河川管理施設及び河道の点検要領案」に記載されている巡視点検項目への適用可能性、有効性を検証すること。

(3) 堤防管理の高付加価値化

目標：巡視・点検、日々の現場踏査での目視点検で、見落とす可能性が高い堤防の面的変状など、堤防管理の高度化を目指した分析手法の有効性を検証すること。

3. 研究開発における計測の実施

河川堤防と周辺の地表高並びに画像を取得するために、計測機器選定と計測ルートを設定した。平成 23 年度は相模川、平成 24 年度は円山川を対象として計測を実施し、3次元点群データ並びにデジタル画像を取得し、これらデータの分析を行った。

3.1 計測機器の設定

レーザ (RIEGL 社の VQ-250MMS) の搭載

表 3.1 使用した遠距離レーザー搭載 MMS の仕様

機 器 名		機器仕様・設置数		照射可能距離(m)	走行方向に対する照射方向(m)
垂直計測 MMS	三菱電機株製	Rigl (遠距離レーザー)	×1 台	500	90° (直角)
		Sick (近距離レーザー)	×2 台	70	0° (前方上下)
斜め計測 MMS	(株)ニコン・トリンプル製	Rigl (遠距離レーザー)	×2 台	500	45° (斜め)

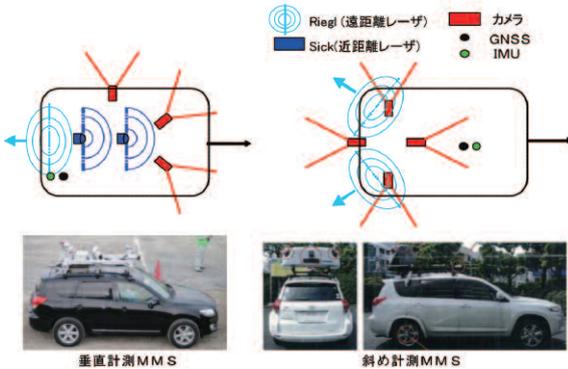


図 3.1 垂直計測 MMS と斜め計測照射 MMS の概要

状況を図 3.1 に、計測機器仕様を表 3.1 に示す。

図 3.1 に示すとおり、左側が走行方向に対して垂直方向に照射する計測手法（以下、垂直計測 MMS と称す）で、右側は斜め 45° 方向に照射する計測手法（以下、斜め計測 MMS と称す）の計測車両である。また、左側の計測車両には、従来の近距離用（SICK 社製）も搭載し、近距離と遠距離照射用のレーザー機器の

特性の比較分析も実施した。

3.2 計測ルート

河川堤防では、一般的に堤防天端は管理通路として利用されており、堤内・外地の法尻部、高水敷には、可能な区間に管理通路が設置されている。MMS の法尻部走行による計測は、全ての有堤区間で対応できるわけではない。従って、本研究では、図 3.2 に示すとおり、堤防天端、法尻からの走行による走行する側の堤防本体に加え、対岸の堤防の照射を試みた。

3.3 各計測機器の検証結果

3.3.1 近距離、遠距離タイプの比較検証

図 3.3 は、遠距離レーザーと近距離レーザー機器仕様により得られたレーザー点群を鳥瞰的に可視化したものである。左側の遠距離タイプ

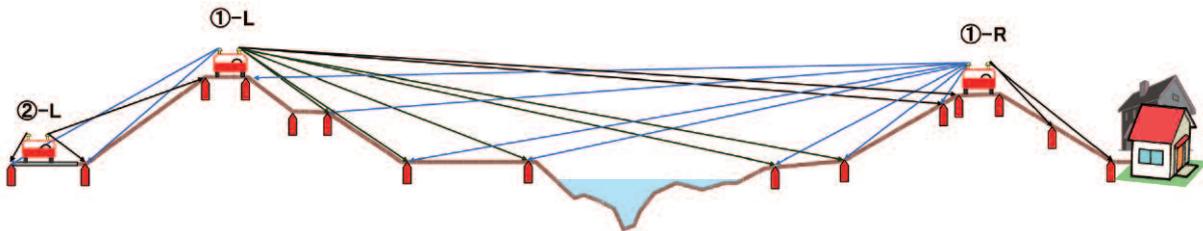


図 3.2 MMS の走行ルート、レーザー照射概念図

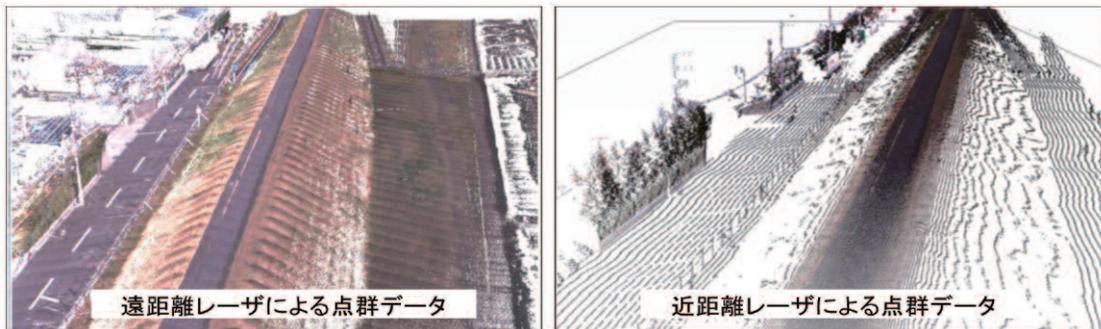


図 3.3 遠距離レーザーと近距離レーザー（照射距離 100m 以下）での取得点群の相違

では、堤防とその周辺の点群が密に取得できている。これに対し、右側の近距離タイプでは、堤防法面、高水敷は、密度が粗くなっていることがわかる。

堤防法面勾配は3割（1：3）勾配が原則で、堤防高が10mの場合、堤防天端から法尻までの距離は30m程度である。堤防全体の形状把握のためには、照射距離30m地点においても十分な点群密度と精度が確保される計測機器の選定が必要である。

従って、当研究では照射距離500m以上で照射密度30万点/秒以上の性能遠距離レーザーキャナを搭載したMMS計測機器をもって、計測技術の開発に取り組むこととした。

3.3.2 レーザの照射距離相関と走行地面状況の違いによる精度検証

図3.4に、走行路線と検証体の設置位置、および設置した検証体を示す。当検証では、As舗装の堤防天端と砂利舗装の堤防堤外地側の法尻を走行することとした。

この結果、図3.5に示すとおり、舗装面を時

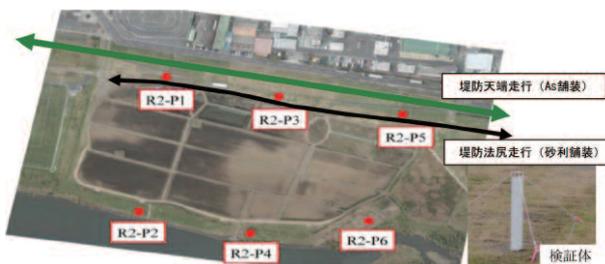


図 3.4 計測実験の場所と検証体

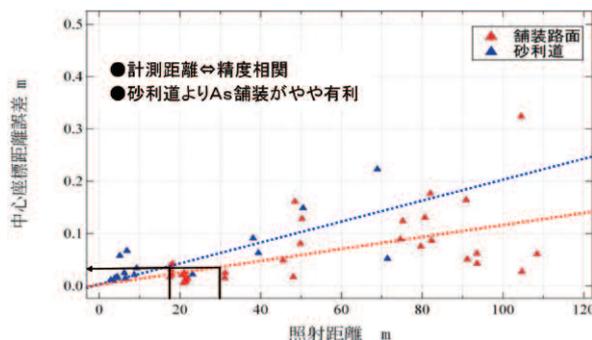


図 3.5 As舗装、砂利道走行計測による照射距離と位置精度の相関

速30km以下の走行で、レーザー照射距離が30mの範囲内の対象物を±20mmの精度で計測することができることを明らかにした。この精度は、堤体で検出できる変状の量を意味しており、GNSSと同じ高い計測精度である。また、砂利道走行では、As舗装走行に比べて精度がやや劣化するが、18mの範囲内の対象物の3次元座標を±20mmの精度で計測することが可能であることも判った。

図3.6に15mmの段差（6段）を有する検証体の計測結果を示す。照射距離30m以内では段差を検出計測できることから、堤防天端からの照射による堤防点群データは、±20mmの精度確保が可能であることを再確認した。

また、図3.7に、堤防天端から遠距離レーザー搭載MMSによって取得されたレーザーデータの内、幅1.0mの点群をバッファ処理により集約したデータを上段に示す。距離相関とし

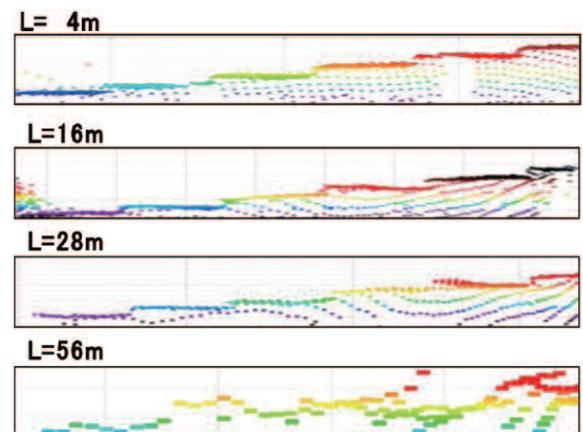


図 3.6 15mmの段差形状検出の距離相関

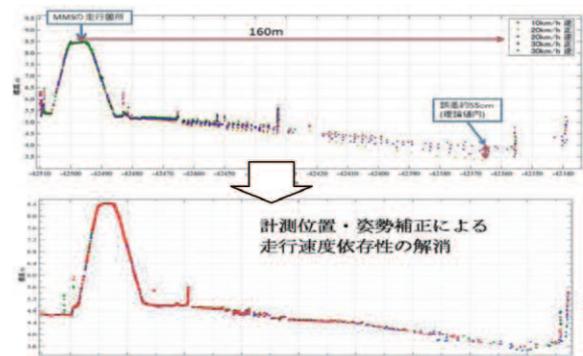


図 3.7 計測データ重ね合わせ処理の例

て、遠い地表面程、点群のばらつきが発生していることがわかる。下段は 160m 離れた高水敷に設置した検証点の位置情報を基に、計測時の回転と併進移動(ロール角および高さ)すなわちレーザ照射時の姿勢の補正を行った断面データである。補正後は遠距離のレーザ点群も正確に重なっていることが分かる。

この技術により、レーザ密度が少ない箇所に対して、複数回の計測の重ね合わせによって精度向上が図れることを実現化することができた。

3.3.3 レーザ点群の点密度の確認

堤体の地物の判別には、レーザ点の密度が重要な要素となる。本研究開発では、遠距離レーザ搭載 MMS を用いて、時速 10km/H、30 km/H で走行を実施した。

天端のレーザの点密度は、時速 10km/H では進行方向 4 cm、横断方向 2 cm 間隔、時速 30km/H では進行方向 10cm、横断方向 4 cm 間隔であ

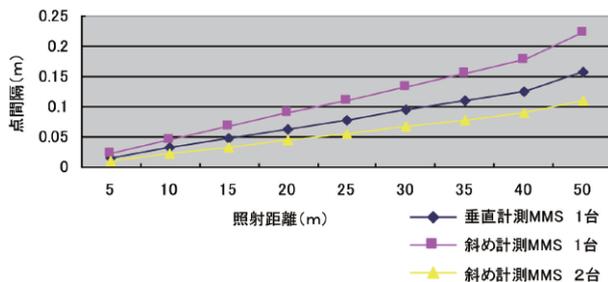


図 3.8 時速 10km/H の場合のレーザ点群の点密度と照射距離相関得点群の相違

った。図 3.8 は、時速 10km/H で走行した場合のレーザ機器から対象物までの距離(垂直距離)と点間隔の相関を示したものである。

検証の結果、30m 離れた場所で点間隔は 0.1m 以下であることを確認した。

3.3.4 計測の位置精度の確保

(1) 固定局の GNSS データの違いによる精度の比較

MMS の車両位置は車両に搭載された GNSS を用いて、車両の計測位置(自己位置)座標を計測する。この場合、現地の既知点に固定局を設置することにより、現地の基準点網との整合を図ることができる。GNSS を用いた計測では、電離層と対流圏における伝搬遅延により、基線距離(固定局と MMS 間の距離)が長くなるにつれ、取得される位置正確度が低下し、キネマテック法による GNSS 計測(RTK: Real Time Kinematic-GNSS)を行う場合、基線距離は 10 キロメートル以内が適切とされている。

また、電離層と対流圏における伝搬遅延の影響を低減する計測手法として、FKP などのネットワーク型 GNSS 計測がある。このネットワーク型 RTK-GNSS 計測は、RTK-GNSS 計測に比べ、基線距離を長く、しかも良好な位置精度を得ることができるという特徴がある。ただし、ネットワーク型 RTK-GNSS 計測

表 3.2 実測点と MMS データの比較

経路名	① FKP				② RTK				③ 新設 RTK				④ 新設FKP			
	解析後 予測誤 差(m)	実測とMMS点群の 位置座標比較			解析後 予測誤 差(m)	実測とMMS点群の 位置座標比較			解析後 予測誤 差(m)	実測とMMS点群の 位置座標比較			解析後 予測誤 差(m)	実測とMMS点群の 位置座標比較		
		最大値 (m)	平均値 (m)	RMSE (m)												
1	8.508	0.500	0.497	0.497	0.009	0.131	0.109	0.110	0.008	0.074	0.050	0.053	0.008	0.090	0.056	0.060
2	8.997	0.480	0.479	0.479	0.008	0.122	0.081	0.087	0.010	0.099	0.059	0.067	0.008	0.089	0.055	0.061
3	10.812	0.046	0.038	0.038	0.009	0.080	0.046	0.050	0.007	0.067	0.047	0.050	0.008	0.069	0.051	0.054
4	2.236	0.152	0.150	0.150	0.008	0.061	0.050	0.050	0.007	0.047	0.041	0.041	0.007	0.059	0.057	0.057
シーン 全体	7.638	0.500	0.291	0.358	0.008	0.131	0.071	0.091	0.008	0.099	0.049	0.054	0.008	0.090	0.055	0.067
平均基線 距離 (km)		39.1				9.5				2.8				2.8		

でも一定以上の基線長を超えると、取得される位置精度も劣化する。

これらの状況を確認するため、本計測では以下の異なる固定局の GNSS データを用いて解析を行い、取得される MMS データの位置精度への影響を検証した。本検証では、以下の4つの固定局の GNSS データを用いて比較を行った。

- ①電子基準点によるネットワーク GNSS データを用いた解析 (FKP) 基線距離：40km
- ②電子基準点の GNSS データを用いた解析 (RTK) 基線距離：10km
- ③新設基準点の GNSS データを用いた解析 (新設 RTK) 基線距離：4 km
- ④新設基準点と電子基準点で得た補正値を用いた解析 (新設 FKP) 基線距離：4 km

①、②では、常時位置情報の配信サービスが行われている電子基準点を固定局として使用した。③では、対象域付近の距離標に基準点測量および水準測量を実施して新設の基準点とし、これを固定局として使用した。また、④においては、対象路線の始点、終点および中間点付近の距離標を新設の基準点とし、この3点と最近傍の電子基準点2点を基に FKP 面補正パラメータを算出し、MMS の位置姿勢の補正を実施した。

(2) 後処理解析結果

MMS で取得された GNSS/IMU 等のデー

タと各種固定局のデータを用いた後処理解析結果を以下に示す。ここでは、後処理解析結果として解析後予測誤差を比較する。解析後予測誤差とは、GNSS データから求められる座標値と、IMU データより得られる慣性量及びオドメトリデータより得られる距離を用いた複合演算で位置姿勢を算出した際に得られる推定誤差値である。表 3.2 に、実測で取得された検証点座標と MMS で取得されたデータの比較結果を示す。この結果から、新設による固定局を独自に設けて解析を行うことにより、MMS データの位置正確度を保つことが可能であることを立証した。

4. 得られたデータの分析・評価

MMS 計測によって得られた堤防とその周辺の点群データが、どの程度有効であるかを分析した。分析にあたり、堤防の地表面点群の生成方法を開発し、亀裂、モグラ穴、変状の検出の可能性について評価を行った。

4.1 定量的な変状分析

(1) 堤防法面勾配・小段や芝の育成による影響と対応策

堤防管理において、出水期前、出水後の点検のために、年1回もしくは2回の除草が実施されている。ここでは、除草の有無で堤防地表面到達度の違いを検証した。

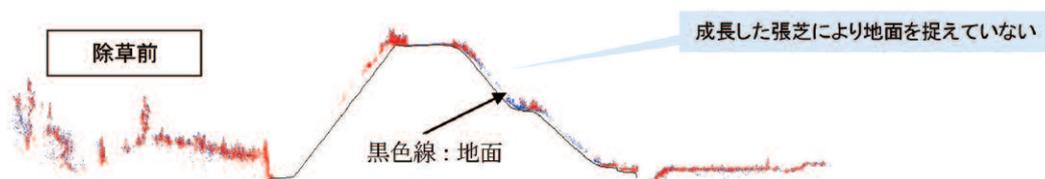


図 4.1 張芝や草の影響



図 4.2 小段の影響

また、堤防法面は1 : 3以上の法面勾配で整備が進められているが、現状で1 : 2勾配と小段にて形成した堤防も少なくないことも踏まえ、除草前、除草後の状態での堤防天端・法面の計測を実施した。

図 4.1 に示すように成長した張芝や草がある場合は、レーザは地表面に到達せず、除草済みでは地表面に到達することがわかった。定期的な堤防点検時の MMS による計測は、除草後に実施することでこの課題を解消することができる。

また、図 4.2 に示すように法勾配が2割勾配の堤防は、天端から小段までの法面は的確

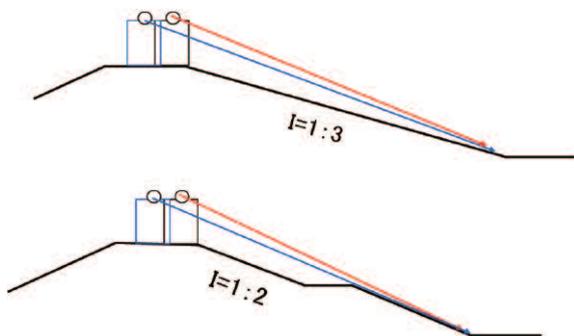


図 4.3 MMS 計測車両の走行位置と堤防法面勾配の違いによる、法面の照射イメージ

に捉えているものの、その下段の法面は照射点群密度が粗くなる。

①堤防法面勾配の違いによるレーザ照射点群の課題と対応

図 4.3 に示すように、堤防天端からの計測では、堤防法面勾配と車体の走行ラインによってレーザの入射角度が変わる。天端からの照射では、堤防法面勾配がきつくなる程、入射角も鋭角になり、計測が不利になる。一方、車体は出来るだけ法面側を走行することが有利となる。

実際に堤防天端より堤防法面を計測した結果を図 4.4、図 4.5 に示す。図 4.4 では、堤内地側走行により、堤防勾配 1 : 2 の小段付法面を照射した。同様に、図 4.5 では、堤外地側の走行で堤内地側の法面 (1 : 3 一枚法) を照射した。白い部分が照射されていないところである。検証結果、明らかに堤防勾配 1 : 2 の小段付法面の点群データは、レーザ照射による点群の欠損部分が多く発生していることがわかった。

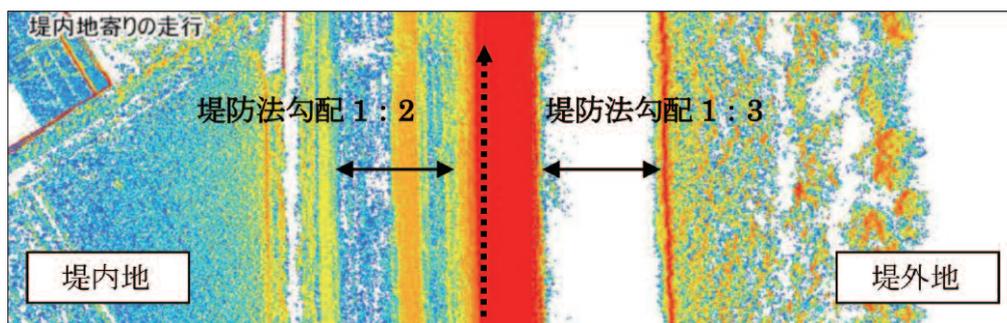


図 4.4 堤内地走行によるレーザ照射点群図

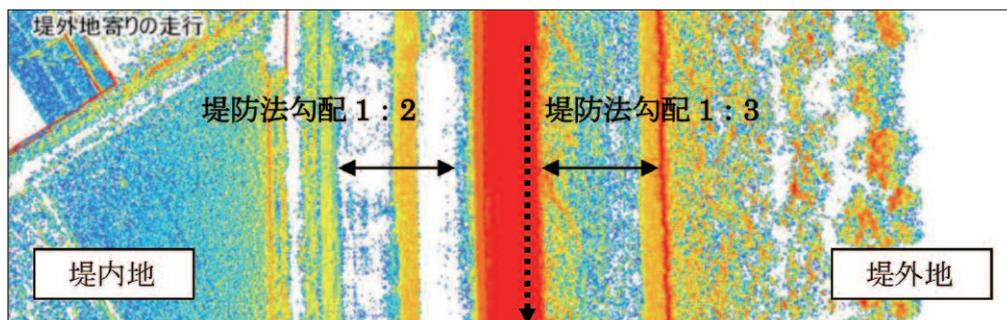


図 4.5 堤外地側走行によるレーザ照射点群図

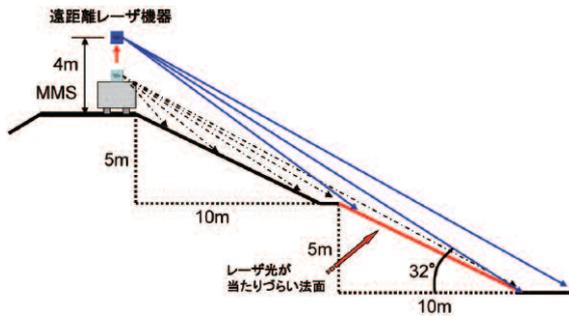


図 4.6 遠距離レーザー搭載 MMS の改良のための計算図

図 4.6 は、法勾配が 2 割勾配で 2 つ法面と小段の堤体の形状を示す。堤防天端上の遠距離レーザー搭載 MMS は、斜め右下の方向にレーザー光を照射している。遠距離レーザー機器を車両のすぐ上に設置した場合は、照射角度が小さいために、小段から下の法面（赤色の斜面）にはレーザー光が当たりづらいことがわかる。これに対して、遠距離レーザーの位置を上げることにより、法面全体が見通せることになる。図 4.6 に示すとおり、天端から高さを 4 m にすれば、法尻に 32° の角度で当たり、法面が膨らんでいても十分にデータを取得できることになる。よって、法尻で 32 度になるよ

うな、MMS 車両の高さを含めてレーザー機器の位置を地上から 4 m の高さになるように改良する必要であることが判った。

②法面芝の育成の影響

除草の有無の状態でもレーザー照射した場合の比較検証を実測値との差分で行った。この際、点群を抽出するバッファの幅は 30cm、60cm、90cm の 3 ケースに設定した。

垂直計測 MMS による計測で得られた各断面の平均較差を示す図 4.7 に示すとおり、除草無しの状態（50cm～80cm の草丈の植生の繁茂状態）では、地表面より 40cm 上部までしか到達しないことがわかった。除草済の状態（5 cm～15cm の草丈の状態）では、地表面から 5 cm まで到達することがわかった。

点群を抽出するバッファの幅は、30cm、60cm、90cm のうち、一番幅の広い 90cm のケースがいずれも堤防法面の地表高に近い値を示したことから、堤防線形が直線であれば、できるだけバッファ幅を大きく設定し、堤防法面地表高を評価することが望ましいことがわかった。

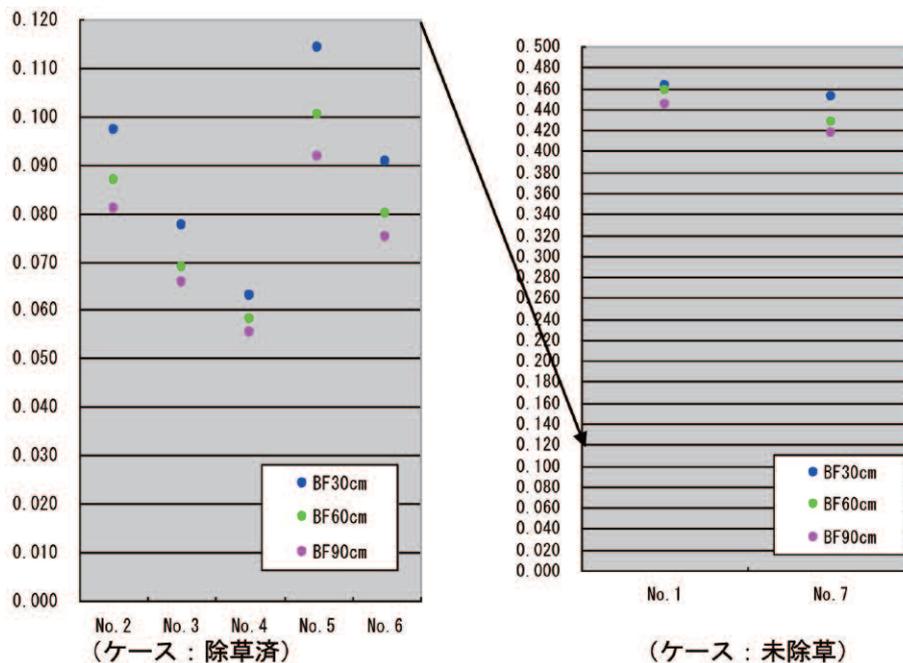


図 4.7 除草の有無による地表面到達度の較差比較図

(2) 堤防3次元データの生成手法

前述したように、堤防法面は除草後でも芝が5cm~10cm程度繁茂した状態で計測しなければならないため、芝草と地表面直接照射した点群が混在した状態で点群データが生成される。

従って、堤防の地表面を評価する技術開発を本研究で行った。

①断面の作成

堤防形状の算定は断面ごとに行い、最終的にこれを結んだ3次元形状を求めた。断面は1.0m間隔とし、断面から±0.5mの範囲の点群から形状を求めた。断面の幅は、中心軸から±30.0mとした。なお、中心軸の平面位置は、始点と終点座標を直線で結んだ線分の midpoint とした。

②フィルタリング

以下に示すフィルタリング処理により、堤防形状を求めるための点(代表点)を求める。手順は、次のとおり。

- i) 二つの走査線に囲まれた微小角度 $\Delta\theta$ の範囲で、中心に最も近い点を求める。
- ii) この点から堤防から離れる方向での Δr の範囲で点群を絞り込む。
- iii) 得られた点群の座標について単純平均を求め、これを代表点の座標とする。

③形状作成

フィルタリングで求められた代表点の内、走査線をまたぐ二つの代表点を直線で結び、この直線と走査線の交点を、堤防形状を表す点と見なした。形状算定の結果を図4.8に示す。

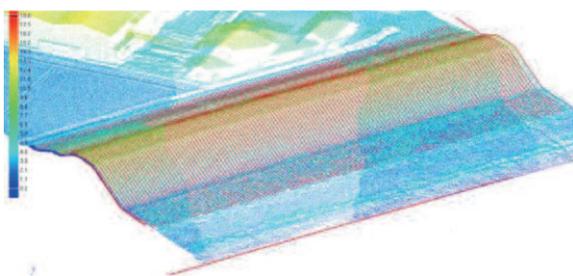


図4.8 構築した堤防3次元データ

4.2 堤防の変状区間、箇所の抽出技術

堤防変位実態分析として、2つの計測時期の異なる点群データを用いた差分解析や、別途収集する植生データを活用した堤防浸潤線の判読分析を行う。また、堤防の変位が現れた区間について、土質性状を踏まえた堤防変位解析を実施し、各種計測結果との相関について検証する。堤体沈下観測データが入手できた場合は、その結果も反映し、今回の計測技術の堤防変状管理への活用の可能性について検証した。

(1) 過去のデータ差分による堤防の変状検出技術

①面的な変状検出

堤防を1.0m間隔の横断面に区切り、断面から±0.5mの範囲の点群から断面の形状を求め、堤防の3次元形状データを生成する技術を構築した。これにより遠距離レーザー搭載MMSの異なる2時期の計測データをもとに、図4.9に示す差分解析結果から、任意の量の変状を面的に抽出することを可能にした。

②堤防改修後のモニタリング分析

堤防は、計画高水位(H.W.L.)に対応した築堤盛土や、浸透流対策や軟弱地盤対策のための堤防補強、災害発生時の復旧などの改修・改良が施されている。改修・改良後の堤防の沈下・変状、周辺の地盤への影響などのモニタリングは重要な河川管理要素であり、その効率化・高度化が今後要求される。

本研究では、近年に堤防補強工で軟弱地盤対策(鋼矢板)を行った区間を対象に、経年

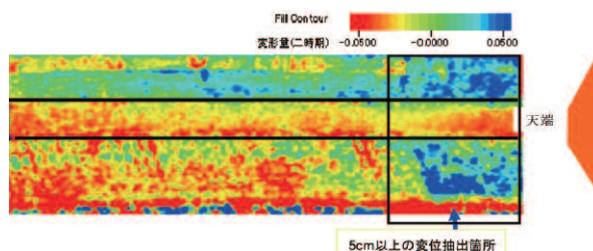


図4.9 次元形状の差分解析による法面変位の抽出結果

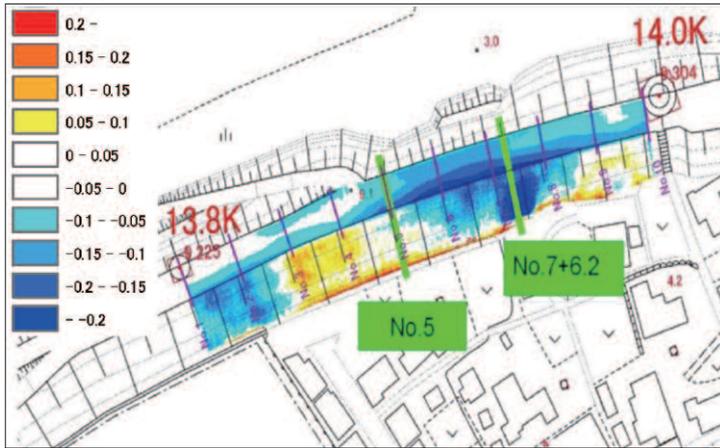


図 4.10 堤防完成時と4年経過後の地表高差分図

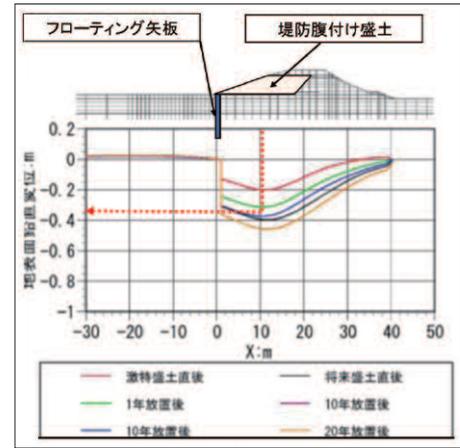


図 4.11 沈下予測図

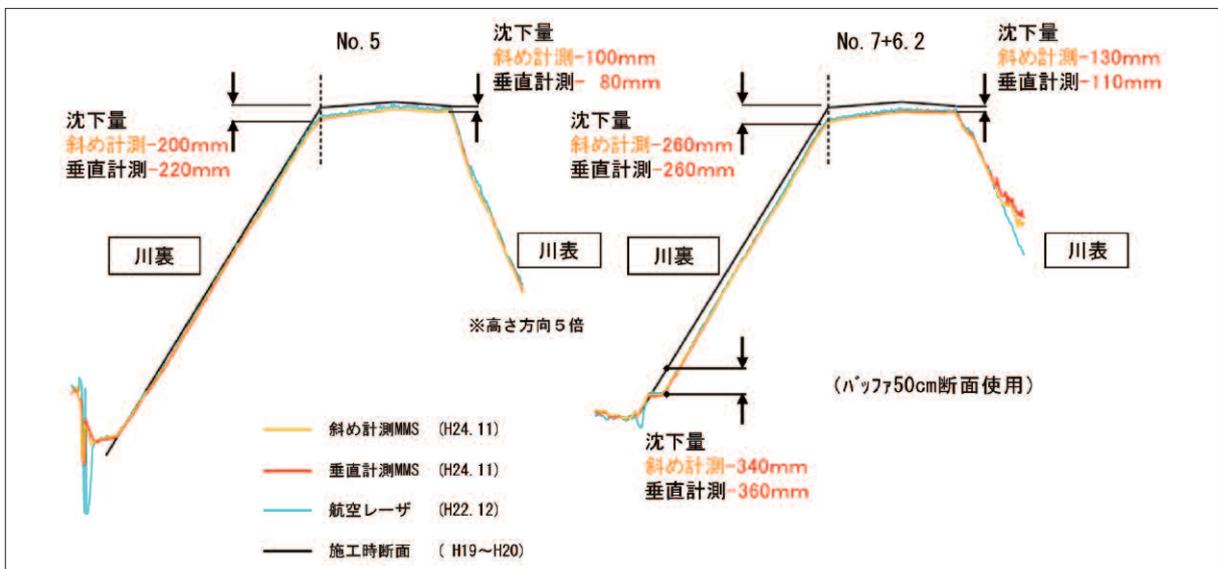


図 4.12 施工時断面復元技術による腹付盛り土個所の詳細な経年変化解析

的な堤防の変状分析を行った。図 4.10 は、堤防補強工事の竣工図より生成した堤防 3 次元数値データと 4 年経過した時点の長距離対応 MMS 計測によって得られたデータとの差分抽出の結果を示したものである。図 4.11 は当初の沈下予測を示したものである。また、図 4.12 は、図 4.10 に示す 2 断面 (NO.5、NO.7+6.2) における経年沈下を示したものである。

従来の堤防沈下・変状モニタリングは、断面に数箇所の観測箇所を設置し計測する手法を採用している。これに対して、堤防 3 次元データを活用したモニタリングでは、対策工

を講じた区間において、一律の沈下・変状が生じているのではなく、基礎地盤条件や、地下水位などの影響によって複雑に変状していることを面的に把握することができるようになる。この分析手法により、スパイラル的な重点管理、留意すべき区間抽出、詳細な対策管理が実現するものとする。

③ 1 回の計測値から変状を抽出する技術

複数期の計測モニタリングによる変状分析に加えて、計測時点でいち早く変状抽出をするために、1 回の計測値から変状が生じている箇所を抽出する手法を試みた。図 4.13 は、堤防 3 次元地表面データ平面に変換し、凹凸

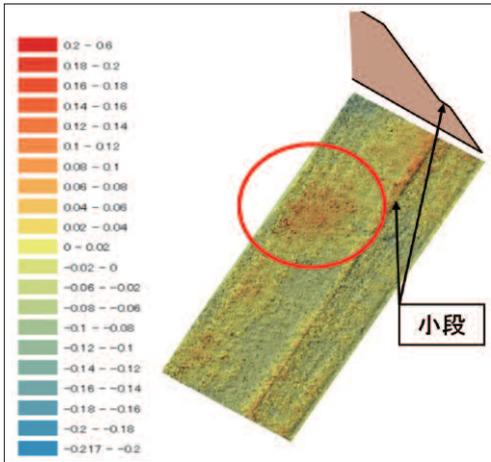


図 4.139 凹凸解析による変状箇所の抽出例

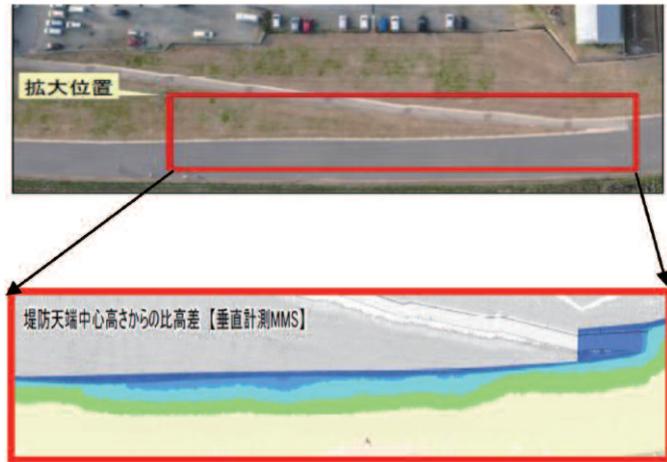


図 4.14 比高差解析による変状箇所の抽出例

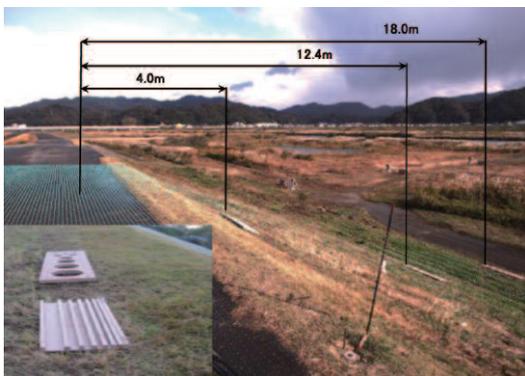


図 4.15 擬似モデルと配置図

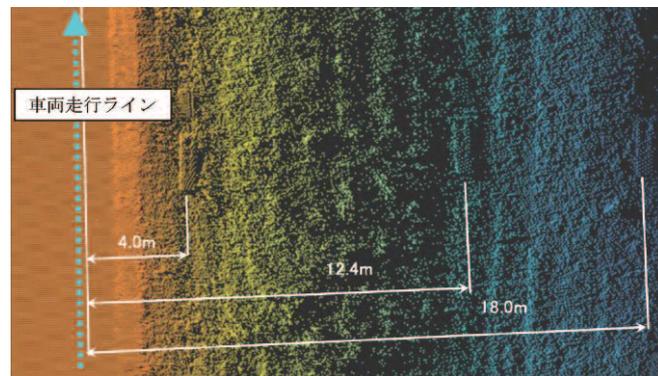


図 4.16 MMSによる擬似モデルの照射点群データ

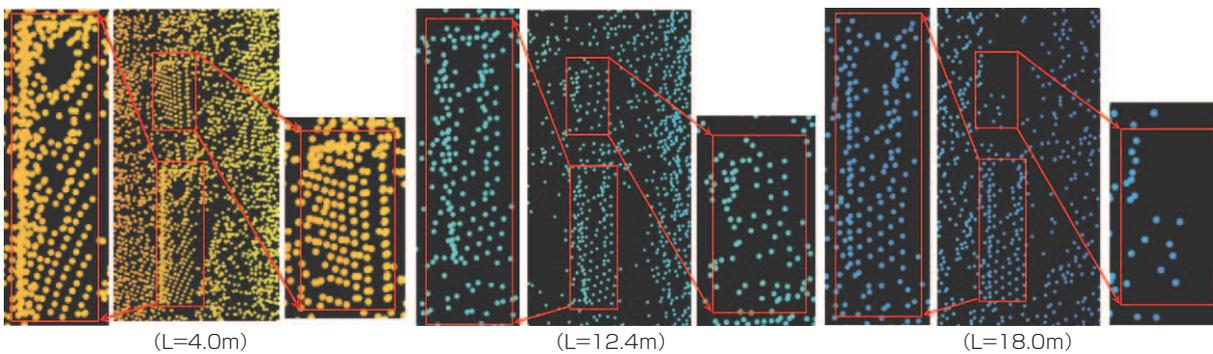


図 4.17 各擬似モデルに照射された点群

の激しい箇所を抽出するアルゴリズムにより分析した結果である。赤い枠の領域に示す赤い凸部分は、はらみだしの傾向が現地調査で確認できた地点である。この結果、法面の変状を把握する有効な手法であることがわかった。また、図 4.14 は堤防天端の中心を基線軸とした横断方向の標高分布を構築したものである。50mmの差が生じている箇所が青色で表

示されている。本手法で面的かつ連続的な定量的評価が可能になることが判った。

(2) 亀裂・モグラ(ヌートリア)穴の検出技術

堤防の破壊、変状要因で留意される亀裂、穴といった現象の検出の可能性を検証するために、図 4.15 に示す擬似モデルを対象に計測を実施した。図 4.16 は堤防法面と各擬似モデルに照射された点群の状況で、図 4.17 は擬似モ



図 4.18 ノートリアの穴の抽出例

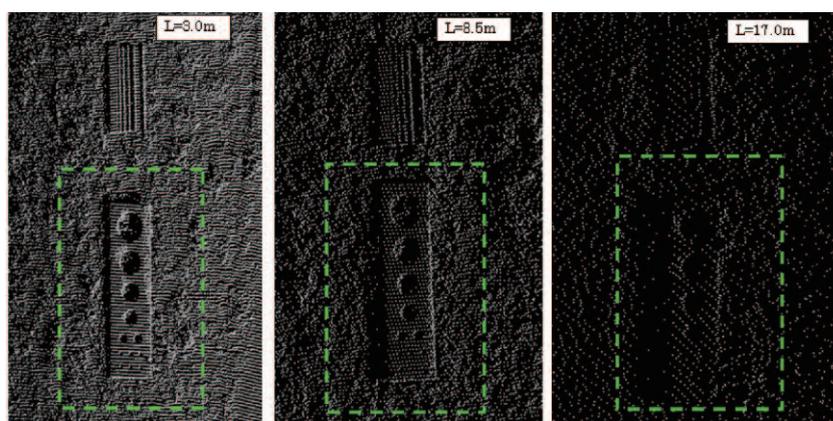


図 4.19 堤防法尻走行による点群データ

デルに照射した点群データを表せたものである。

検証の結果、レーザ点群の密度が高い地域では、レーザ点群の分布から穴の存在が検知できること、レーザ点群の密度はレーザの照射距離と照射する角度に依存するため、車両走行位置が検出精度に大きく関与することを確認した。また、直径 10cm の穴は、5 cm の点間隔の点群で検出可能であり、4 cm の幅・長さ 90cm の亀裂は、2 cm の点間隔のレーザ照射で検出可能であることを確認した。

実際に現地にあったノートリアの穴の抽出例を図 4.18 に示す。

天端走行では法面中央から法尻に存在する穴の認識が難しい。穴の検出には車両走行位置の関係が重要であり、車両から穴が見えにくい個所にある場合は検出も困難である。

図 4.19 は、擬似モデルを堤防法尻から照射した点群データである。このことから、法面の穴の検出を目的とした計測は、堤防法尻の走行など、現場ごとに走行位置等を計画し。管理することが求められる。

5. まとめ

5.1 堤防管理上の計測データ取得

(1) 一連の連続する河川堤防の区間データの取得方法

河川堤防天端は管理用通路として整備されており、車両通行が可能である。しかし、堤防法尻や堤防法尻付近の道路は一部区間に限られているのが現状である。本研究では、堤防天端からの車両計測の可能性を試行した結果、30m 幅の範囲では照射点群の取得と精度の確保ができることを立証した。今後、特に

堤防変状の重点管理をすべき区間においては、法尻付近の走行計測を行うための管理用通路の確保策も必要に応じて対応していくことが求められることも予測される。これに関しては、実際の堤防巡視・点検時に車両走行計測を実施したうえで検証する必要がある。

(2) 経時変化などの分析・評価に求められるデータの密度、データ取得範囲と精度

目標の堤防天端、法面の計測範囲（天端より30m範囲内）を対象に検証実験を実施し結果、今回採用したレーザー仕様の照射密度30万回/秒レベル、走査範囲は180度のスキャナによって十分に対応できることを立証した。

また、照射距離30m以内では15mm段差が検出計測でき、かつ、堤防天端からの照射による堤防点群データは、 $\pm 20\text{mm}$ の精度確保が可能であることを立証した。

遠距離レーザー搭載MMSは、照射距離が長くなる程、点群のばらつきが発生し、精度が劣化するが、検証点による姿勢の補正を行うことによってレーザー密度が少ない箇所に対して複数回の計測の重ね合わせによって、精度向上が図れる手法を開発することができた。

(3) 計測の位置精度の確保

レーザーの位置精度は、今後の堤防モニタリングにおいて確保されなければならない必須条件である。そのためには、計測区間において新設の固定基準点を独自に設けて解析を行うことにより、位置正確度を保つことがより有効であることを立証した。よって、目標とする位置・高さ精度は従来のGNSS（全地球測位システム）と同等として堤防とその周辺の点群データ、デジタル画像を取得することが可能とした。

2.3 得られたデータの分析・評価

(1) 定量的な変状分析

遠距離レーザーMMSによる計測データは、

堤防管理区間全体を連続的に3次元地表高データとして保管することができ、データの蓄積により、堤防の変状を面的に全体把握できることを立証した。堤防天端、法面の変状把握は、基本は前回の計測データとの差分抽出で抽出する手法を開発することができた。堤防管理では、出水や地震時には迅速な変状把握が求められるケースが発生することを踏まえ、一回の計測データによる堤防法面の起伏分析データの構築の開発を行い、実現可能とした。このデータを基に管理区間における変状箇所を迅速に抽出し、現行の巡視点検者の効率化、簡便化を図る手法を開発することができたものとする。

堤防法面の計測は、成長した張芝や草がレーザーの地表面に到達度を低下させることを踏まえ、定期的な堤防点検時に実施される除草後に遠距離レーザーMMSによる計測を実施することが必須となる。これは、車両走行計測時の必須条件となることを確定させたものである。

また、小段付の2割の法勾配の堤防は、天端から小段までの法面は的確に捉えるものの、下段の法面は照射点群密度が粗くなる。そのため、地上からレーザー機器の位置を今回の試験計測時の $H=2.2\text{m}$ から $H=4.0\text{m}$ の高さに改良するなど、堤体全体のデータを取得できる手法を確立することができた。

(2) 堤防管理手法の簡便化

河川管理の効率化の観点から、「堤防等河川管理施設及び河道の点検要領案」に記載されている巡視点検項目への適用可能性、有効性については、本論では述べていないが、本研究において、下記の巡視点検に適用できる点検項目を評価している。

- 1) 堤防法面、亀裂・陥没・はらみだし・法崩れ・寺勾配化、侵食等の変状
- 2) 芝のはがれ、堤防植生の繁茂状態

- 3) 雨水排水上の問題となる小段、法尻部の排水勾配、不陸
- 4) 樹林の侵入・拡大
- 5) 坂路・階段取り付け部の洗掘、侵食
- 6) 堤防護岸、高潮堤防排水工の目地開き、亀裂、破損、漏水
- 7) 堤防天端の亀裂・陥没・不陸変状、侵食、スパン目地
- 8) 高潮堤防の法部分の漏水・痕跡
- 9) 高潮堤防の剥離・剥落・欠損、錆汁、鉄筋露出など

しかし、現段階では巡視点検に適用できない点検項目は、表土の状態(湿潤状態、緩み)、法面・小段の泥濘化、堤体内の空洞化、低水部の施設、しほり水による浸潤状態、ドレーン工の目詰まり、ひび割れの有無などがある。これらに関しては、今後の遠距離対応のMMSの計測機器の性能向上と、他の計測手法の開発により補間する技術開発は、今後の課題であり、早急に取り組んでいくべきである。

(3) 堤防管理の高付加価値化

従来の堤防沈下・変状モニタリングは、断面に数箇所を観測箇所を設置し計測する手法で、点の観測である。これに対して遠距離レーザーMMSは、連続する堤防管理区間全体を3次元データとして保管し、差分による経時変化を算出することで、面的な変状、変化を把握することができる。すなわち、堤防管理の高度化が図れることを立証した。

出水後や地震による影響把握のための堤防点検では、変状抽出の迅速な対応が求められる。本研究では、一計測時期により得られた3次元地表高データから、堤防法面の起伏分布図を作成する手法を構築した。よって、堤防天端・法面において凹凸の激しい個所を容易に早く抽出し、変状の可能性が高い個所を抽出することを実現した。

遠距離レーザーMMSの天端走行によって得

られるデータのみでは法面全体の亀裂、モグラ穴の検出、認識が難しいこともわかった。穴の検出にはレーザーの照射角度が重要で、車両から穴が見えにくい個所にある場合は検出も困難である。そのため、これらの変状を的確に把握するためには、堤防の法尻の走行ルートの確保など、必要に応じて、堤外地の高水敷の管理通路の確保、堤内地では、堤脚水路に隣接する管理通路の確保などの対応が求められる。

6. おわりに

遠距離レーザーMMSは、河川堤防管理の効率化・高度化を図っていく上で、大いに活用され、効果を発揮するものと期待できる。今後は、従来の堤防点検時と同時期に計測を実施しながら実用化の検証を行い、これら計測技術と人による点検の優位性をもって、新たな河川管理手法を確立することに貢献していく所存である。

■謝辞

本研究開発を実施するにあたり、国土交通省国土技術政策総合研究所 危機管理技術研究センター 水害研究室、国土交通省 水管理・国土保全局 河川環境課 河川保全企画室、関東地方整備局 京浜河川事務所、近畿地方整備局 豊岡河川国道事務所、京都大学大学院、京都大学防災研究所の関係各位に多大なる配慮を受け賜りました。ここに記して謝意を表します。

■執筆者

吉岡 裕嗣 (よしおか ゆうじ)

株式会社パスコ

業務経歴等：河川分野の計画・分析、MMS、航空レーザー計測等の空間情報技術開発に従事

E-mail : yaukuo7779@pasco.co.jp

