

第5章 各章の要旨ならびに結論

第2章では、MMSの概要と変遷、公共施設等の維持管理などに用いられているMMSの事例の一部を示した。

第3章では、本章では、MMSによる河川堤防技術を確立するために、FKP方式で自己位置を求めているMMSを用いた河川堤防計測を行ない、高精度での計測方法を検討するために、FKP方式とRTK法により電子基準点を固定局として用いた場合と、新たに固定局を設けた場合のMMSの車両の自己位置の精度を求めた。次にその結果に基づいて堤防天端の標高および堤防の天端から法面方向の位置精度を確認し、計測手法の妥当性を考察した。最後にレーザ光が堤防の地表面に当たっている点群の抽出方法を検討し、堤防断面形状を作成するための手法を提案してその有効性を確認し、次のことを明らかにした。

GNSS解析方式によるMMSの自己位置の精度の比較では、長距離の基線長の場合は自己位置計測精度が劣化する場合があること、約3,000mの近傍に新設の固定局を設けてGNSS解析を実施することにより、高精度な自己位置姿勢計測が可能であることを確認した。河川の定期縦断測量は水準測量により行われ、要求される精度は数センチメートルのレベルである。堤防の天端の計測結果は、平均二乗誤差が約0.02mで標準偏差が約0.01mであり、高精度が求められる堤防天端の標高計測にもMMSは十分適用可能であることが確認できた。さらに堤防の断面方向の計測結果から、レーザ照射距離約30m程度の近距離では水平位置および標高とも約0.05mの精度を得ることが可能であり、レーザ照射距離100mの位置においても水平位置および標高とも約0.08m以下の精度を得ることができることが確認できた。定期横断測量の点検測量は、2回の計測の較差を点検することにより行われる。この際の較差の許容範囲の標準値は、30mの位置で0.047m、100mの位置で0.07mである。今回の断面方向の計測結果は、これに相当する精度であるといえる。これらの結果から、MMSは高水敷きの範囲を含む広域な河川管理区域の3次元形状を高精度で計測するための有効な手段であることが検証できた。また、MMSによる河川堤防の計測では除草が必須であること、バッファを取って点群を抽出し最下点を抽出する手法が河川堤防の断面形状の抽出に有効な手法であることも検証され、河川堤防の変状抽出などに応用する際の手法も提案することができた。なお本研究で得られた堤防の断面形状は、法面の勾配が2割勾配の円山川堤防で計測した結果から得たものであり、計測精度に影響を与えるレーザのフットプリントの大きさは地表面へのレーザの入射角度に依存するので、法面の勾配によってはレーザスキャナの設置位置を高くするなどの工夫を図ることで計測精度を確保することも考慮する必要がある。亀裂や穴の検出検証では、直径10cmの穴は、5cm点間隔が必要

であり、4cm の幅で長さ 90cm の亀裂は、約 2cm 点間隔のレーザ点群が必要であることが確認できた。

MMS の点群データの分析技術の開発では、堤防法面の起伏分析として、Ransac（ランダムサンプリングコンセンサス）による法面の凹凸解析法を開発し、腹みだしなどの起伏の検出に有効であることを示した。また、天端の変状を分析する技術として、天端の中心線上の標高を基準として比高を求めて表示する手法を開発し、天端の変状を面的に把握することを可能とした。さらに、堤防堤体の経年変化を検出する差分解析技術を開発し、堤防堤体の形状の時系列変化を面的に把握することを可能とした。これらの技術は、従来行われている縦横断測量が線的なものであるのに対し、堤防全体の変状を面的にかつ定量的に分析することを可能とするものであり、河川堤防管理を高度化するものである。

河川堤防の管理に対する MMS の適用性の考察と課題に関しては、実施した各種点検結果を基に MMS の改良点について検討してまとめた。また、河川堤防の効率化、高度化に向けた対応として、目視による巡視点検に対して、MMS の適用可能性を検討し、標準型 MMS が巡視点検に適用できる項目と適用できない項目を明確にした。さらに、その結果を基に、効率化の観点から、標準型 MMS の計測の費用巡視点検の費用の比較と、河川カルテの作成にかかる費用を比較した。この結果、MMS 計測を適用することで、巡視点検作業の効率化が図れることがわかった。最後に、MMS 計測により高度化されることによって得られる知見をまとめた。

第4章では、河川堤防の3次元形状を正確に計測するために、長距離レーザスキャナとデジタルカメラを高所に設置したMMSを製作して、その計測精度を明らかにした。まず、フレーム型MMSと昇降型MMSの2種類の河川計測用MMSを製作した。次に、実際に、製作した河川計測用MMSで走行計測して、計測精度の確認をした。また、長距離レーザスキャナを高所に設置していない標準型MMSの計測結果と比較して、製作した河川計測用MMSの有効性を検証した。最後に、MMSに搭載されている各センサの性能をもとに、河川計測用MMSの計測精度についての考察を行った。

本検証により、河川計測用 MMS の計測精度は、20m 程度の近距離における平均二乗誤差は、河川計測用 MMS、標準型 MMS とともに 0.03~0.04m 程度で、距離が離れるに従って精度が劣化する傾向がみられるが、遠距離の場合でも 0.15m 以内の計測結果が得られることが確認できた。また、標準偏差は遠距離の場合でも 0.02m 程度となっており、計測結果のばらつきが小さいことが確認できた。以上の結果から、河川計測用 MMS はレーザスキャナを高所設置したことによる精度劣化はなく、標準型 MMS と同等で高い計測性能を有してい

ることが確認できた。また、レーザスキャナを高所に設置することにより、オクルージョン領域を減少させる効果があること、堤防法面用カメラにより、法面の天端から法尻までの画像を、ほぼ同じ解像度で網羅的に撮影することが可能であることが確認できた。この画像は、堤防法面の記録として重要な資料となると考えられる。さらに、機器の性能を考慮した理論精度と、実際の 3 次元点群の精度を比較することにより、MMS の精度は、近距離においては GNSS の位置測定精度依存し、遠距離の測定をする場合にはレーザの取り付け後のキャリブレーションが重要となることが確認できた。

以上より、新たに製作した河川計測用のMMSは、河川の堤防堤体、および、周辺の高精度高密度3次元計測に対し、非常に有効な手段であることを確認した。

本研究により、MMS による高精度で効率的かつ高度化された河川計測手法が確立できた。

社会インフラの急速な高齢化が進む一方、厳しい財政状況や熟練技術者の減少という状況下において、新技術の導入による高精度化、効率化は必須である。本研究の成果は、今後の河川堤防等の維持管理に寄与するものと考えられる。

今後は、本研究で構築した河川堤防の断面形状を計測する手法を用い、実際のはらみ出しなどの変状の抽出精度の定量的な検証を行うとともに、計測環境の異なる河川で本研究の成果を適用して、河川堤防の点検およびモニタリング業務につなげてゆく予定である。また、実際の堤防堤体法面上の計測精度、形状の再現性の検証、フットプリントや 3 次元点の点間隔等が精度に及ぼす影響についての検証を行っていく。

謝辞

本論文をまとめるにあたり、細部にわたりご指導、ご鞭撻いただきました岡山大学大学院環境生命科学研究科社会基盤環境学専攻の西山哲教授、貴重なお時間をいただき、ご指導いただいた前野詩朗教授、吉田圭介准教授に謹んで感謝の意を表します。また、このような機会を与えてくださり、ご助言とご指導をいただいた株式会社パスコの島村秀樹取締役役に心より感謝いたします。

本論文の第3章の研究は、平成23、24年度河川砂防技術研究開発制度（河川技術分野）の助成を受けて行ったものであり、本研究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、近畿地方整備局 豊岡河川国道事務所の関係各位に多大なるご助力を賜りました。また、京都大学防災研究所の東良慶助教、日本工業大学の石川貴一朗助教には貴重なご助言をいただきました。さらに、実験等では、三菱電機株式会社、株式会社GIS関西の各位およびパスコ関西事業部技術センターの各位にご協力をいただきました。ここに記して謝意を表します。

第4章の河川計測用MMSの開発では、株式会社ニコン・トリンブルの伊沢光磨氏、岩部忠行氏に多大なるご支援をいただきました。深く感謝いたします。

本研究に当たり、株式会社パスコの北川育夫氏、真鍋鎮男氏、佐藤俊明氏、吉岡裕嗣氏、西村修氏、土田直之氏、さらに多くの同僚諸氏にも多大なご協力をいただきました。また、吉村充則氏には、常に貴重なアドバイスをいただきました。間野耕司氏には、データの整理や資料作成まで多大なるご協力をいただきました。ここに記して深く感謝の意を表します。

最後に、いつも心の支えであった家族の皆に感謝いたします。

参考文献

- [1] 石川貴一郎 : Mobile Mapping System による道路測量について, 精密工学会誌, Vol.79, No.5, pp397-400, 精密工学会, 2013
- [2] 外村史輝, 石川貴一郎, 天野嘉春, 橋詰匠 : Mobile Mapping データにおける大規模三次元点群からの道路周辺地物の認識 (第 4 報), 2013 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp857-858, 精密工学会, 2013
- [3] 末久博行 : 高規格計測車両を用いた道路施設計測, 写真測量とリモートセンシング, Vol. 47, No.5, pp28-31, 日本写真測量学会, 2008
- [4] 矢吹信喜, 中庭和秀, 木寺浩紀, 西乃助 : モバイルマッピングシステムの切削オーバーレー工法による道路舗装改良工事測量への応用, 土木学会論文集 F3 (土木情報学) Vol.67, No.2, I_18-I_28, 土木学会, 2011
- [5] 田中成典, 北川悦司, 姜文淵, 安彦智史, 川野浩平 : 道路橋上部工の維持管理のための 3 次元現況図の自動生成に関する研究, 土木学会論文集 F3 (土木情報学), Vol. 68, No. 2, I_181-I_189, 土木学会, 2012
- [6] 山本遼介, 泉岳樹 : モバイルマッピングシステムを用いた東日本大震災復興アーカイブの試みー宮城県岩沼市における事例ー, 日本地理学会発表要旨集 , 85 号, pp320, 日本地理学会, 2014 年 03 月 10 日
- [7] 小荒井衛, 岡谷隆基, 中埜貴元, 神谷泉 : 東日本大震災における津波浸水域の地理的特徴, 国土地理院時報, No.122, pp97-111, 2011
- [8] 石川貴一郎, 天野嘉春, 橋詰匠, 瀧口純一, 清水聡 : モービルマッピングシステムによる都市空間モデリング, 計測自動制御学会産業論文集, Vol.8, No.17, pp132-139, 計測自動制御学会, 2009
- [9] 国土交通省 : 平成 24 年度国土交通白書, pp274, 国土交通省, 平成 25 年 7 月

[10] 国土交通省国土地理院：ネットワーク型 RTK-GPS を利用する公共測量作業マニュアル（案），国土地理院，pp1，平成 17 年 6 月

[11] 国土交通省国土地理院：移動計測車両による測量システムを用いる数値地形図データ作成マニュアル（案），国土地理院，平成 24 年 5 月

[12] 間野耕司，石井一徳，平尾公孝，橘菊生，吉村充則，Devrim AKCA， Armin Gruen：移動計測車両測量システム（MMS）により取得される点群の精度評価：写真測量とリモートセンシング Vol.51，NO.4，pp186-200，日本写真測量学会，2012

[13] 東良慶，吉岡裕嗣，西山哲，石川貴一郎，船田征，久保田啓二郎：モバイルマッピングシステムの河川堤防管理への適用性の検討，河川技術論文集，第 19 巻，pp21-26，2013 年 6 月

[14] 吉岡裕嗣：新探査技術による河川堤防管理手法の高度化，月刊測量，pp14-17，日本測量協会，2014 年 2 月号

[15] 宮田 剛，武田 浩志，芝 隆：モバイルマッピングシステムを用いた計測手法の精度検証，平成 22 年度秋季学術講演会発表論文集，pp23-26，日本写真測量学会，平成 22 年

[16] 岩上弘明，石森章之，佐田達典，石坂哲宏：モバイルマッピングシステムによる 3 次元計測精度検証実験，応用測量論文集 Vol.25，pp115-124，日本測量協会，2014

[17] 相本敬志，鈴木清，白石宗一郎，鈴木寛，末久博行：移動計測車両による長距離レーザ計測の精度検証，平成 26 年度秋季学術講演会発表論文集，pp117-118，日本写真測量学会，平成 26 年

[18] Cameron Ellum， Naser El-Shemy：Land-Based Mobile Mapping System，PHOTOGRAMMETRIC ENGINEERING & REMOTE SENSING，pp13-17,pp28，ASPRS，January 2002

- [19] 今西 暁久,平尾 公孝,橘 菊生,間野 耕司,石井 一徳,富樫 健司 ; G P S衛星不可視区間におけるMMS計測データの高精度化手法の検討 : 応用測量論文集,Vol.22, 2011 (平成 23 年)
- [20] 大浜雅宣 : 走行写真撮影法による路面性状調査 (その 1), 写真測量とリモートセンシング Vol.18, NO.2, pp4-12, 日本写真測量学会, 1979
- [21] 高木久, 加納政宏 : ロードマンと道路面の状況計測, 写真測量とリモートセンシング Vol.47, NO.5, pp6-9, 日本写真測量学会, 2008
- [22] 南澤輝雄, 前田近邦 : 道路現況計測システム:Real, 写真測量とリモートセンシング Vol.47, NO.5, pp10-13, 日本写真測量学会, 2008
- [23] 来島輝武 : 道路管理評価システム, 写真測量とリモートセンシング Vol.47, NO.5, pp14-17, 日本写真測量学会, 2008
- [24] 黒須, 赤外線検査法 (その 1) -舗装の走行観測診断, 土木学会第 66 回年次学術講演会概要集,(2011.9)
- [25] 鶴飼 尚弘, 柴田 拓, 大内山 弘美, 外山 康彦, 中田 洋史, 岡崎 慎一, 早川 潤 : GPS 測量を応用した円山川堤防高計測, 応用測量論文集, Vol.18, 2007 年
- [26] 国土交通省近畿地方整備局豊岡河川国道事務所 : レーザープロファイラーデータを活用した堤防高管理の取り組みについて, 河川, 2011-8 月号, PP25, 公益社団法人日本河川協会, 2011 年 8 月 20 日
- [27] 西川啓一, 富樫健司 : MMS の最新動向, 建設の施工企画, 2011 年 10 月号, No.740, pp58-64, 一般社団法人 日本建設機械施工協会, 2011
- [28] 臼井澄夫 : 高精度衛星測位技術と精密計測への応用, 精密工学会誌, Vol.77, No.4, pp358-361, 2011 年

[29] 齊藤和也：図解航空レーザ計測，日本測量調査技術協会，pp51，2008 年 1 月

[30] J. Hutton, Alan Ip, T. Bourke, B. Scherzinger, N. Gopaul, P. Canter, I. Oveland, L. Blankenberg : Tight Integration of GNSS Post-Processed Virtual Reference Station with Inertial Data for Increased Accuracy and Productivity of Airborne Mapping, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVII. Part B5. Beijing pp829-834, ISPRS, 2008

付録

本資料は、報告書第3章の表3-13に示す各点検項目に対する適用の可否を判断した根拠と、堤防管理の高度化が図れる事項についてとりまとめたものである。

1.土堤

1.1 法面・堤防護岸・小段

1) 亀裂、陥没、はらみだし、法崩れ、寺勾配化、侵食等

① 亀裂(▲) 【計測条件：天端と法尻と除草】

亀裂は、遠距離レーザ及び画像の判読で捉えることができる。

図1は、模型の擬似亀裂を、遠距離レーザで捉えた結果である。亀裂があるとレーザ光が入り込むために、レーザ光が戻ってこない。一方、亀裂の縁から戻ってきたレーザ点は、亀裂の方向に沿って、線状に並ぶ。図1のa)は、擬似亀裂の模型である。擬似の亀裂は、長さ90cmで、5 mmから100mmまでの7つの幅とした。図の赤色が凸部である。図1 b)、c)、d)は、それぞれMMSの走行位置から3.0m、8.5m、17.0mの距離に設置した模型周辺のレーザ点群である。距離が長くなるにつれて、白色のレーザ点の線状の並びが鮮明でなくなる。例えば、3.0mでは、幅20mmの亀裂が、黒色の帯と白色の縦方向の線で判別がつく。また、8.5mでは、幅40mmの亀裂、17.0mで幅100mmの幅の亀裂が識別できる。

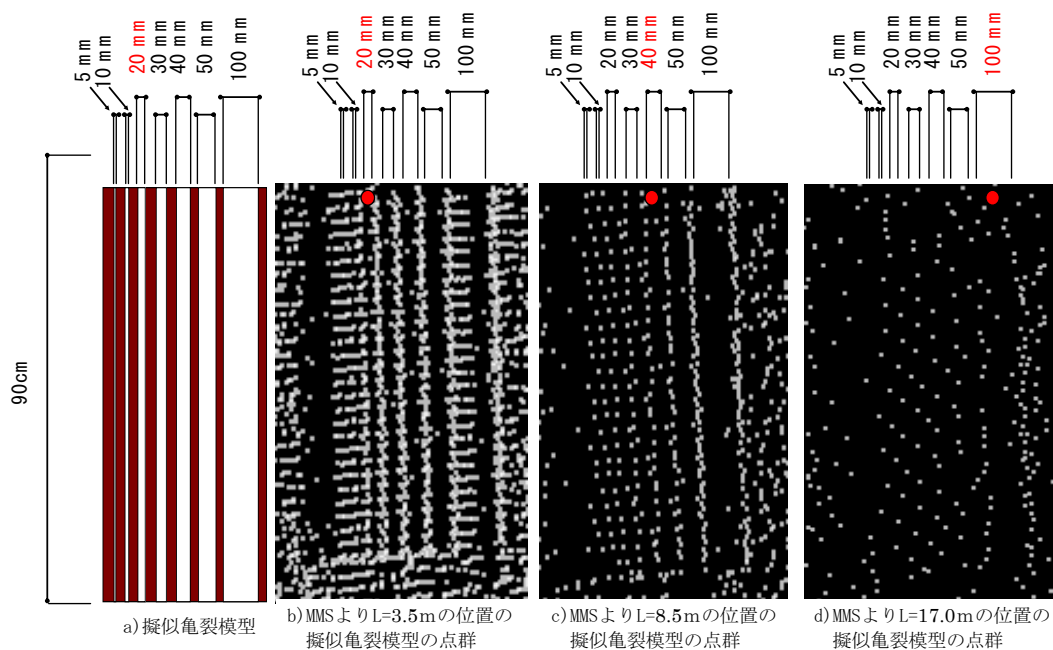


図1 遠距離レーザで擬似亀裂を捉えた結果

また、図2は、MMSの進行方向右側の法面に模型を設置した様子である。図2では、擬似亀裂が確認できる。模型の場合は亀裂が直線的かつ規則的であるために明確に表れているが、実際は、土堤の亀裂は黒く線状に写るために、前述の遠距離レーザと画像を比較しながら、判読することが必要である。また、亀裂は、張芝や草に隠れているので、除草作業を行う必要がある。



図2 画像で模擬亀裂を捉えた結果

② 陥没・はらみだし・法崩れ、寺勾配化（▲）【計測条件：天端と法尻と除草】

陥没・はらみだし・法崩れ、寺勾配化は、遠距離レーザで捉えることができる。

また、大規模な陥没は、画像でも捉えることができる。図3は、微細な法面の変状を捉えるために、レーザ点群を解析した結果である。図の中で、赤色は、はらみだしで、青色は、法崩れの可能性が高い領域である。実際には、赤い枠の領域は、現地で確認された変状である。

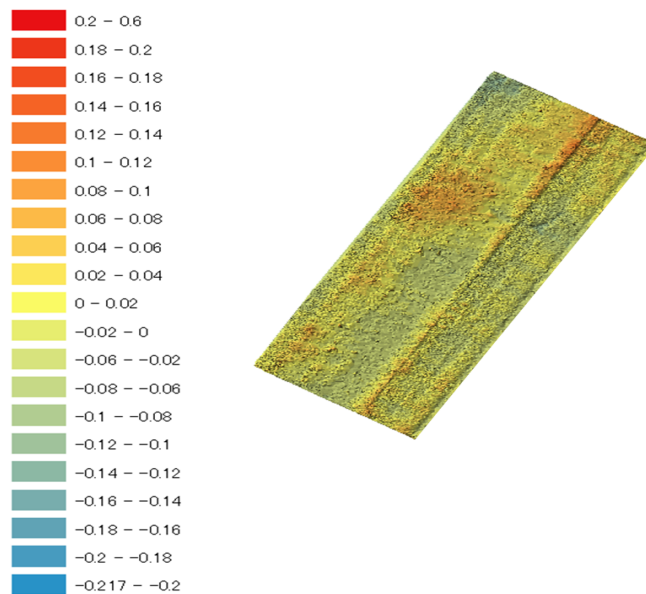


図 3 レーザ点群で解析した法面変状結果

さらに、的確に微細な変状を捉えるためには、変状の前後の時期のレーザ点群を比較することが有効である。図4は、法面の変状を捉えた2時期のレーザ点群の差分解析結果である。天端はほぼ黄色で変位がゼロであるが、法面では5cm以上の変位があるエリアがある。図の中では、四角の枠で囲んだ濃い青色のエリアである。まさに、はらみだしが存在する場所であり、また、旧河道に位置することがわかった。

このように、2時期のレーザ点群の差分解析結果では、変位の大きさを色で表現し、変位が大きい色が面的に広がっている場所があれば、変状であることが判定できる。

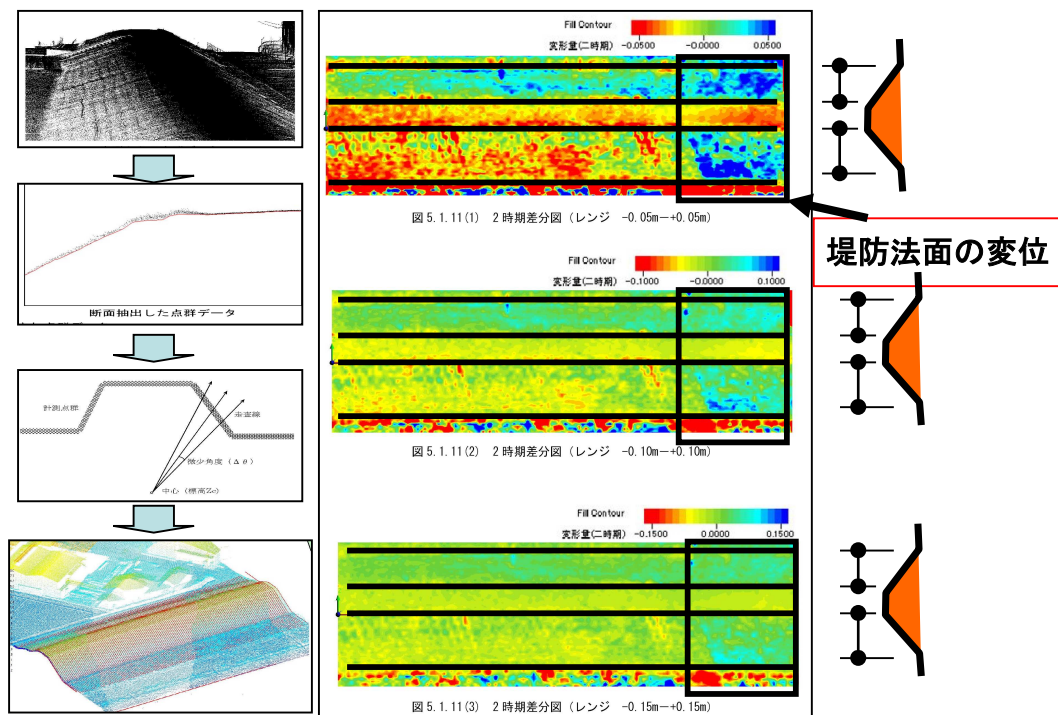


図 4 法面の変状を捉えた 2 時期のレーザ点群の差分解析結果

② 侵食 (●)【計測条件：天端と法尻と除草】

侵食は、前述②の変状と同様、遠距離レーザで捉えることができる。解析手法も同様である。また、大規模な侵食は、画像で捉えることができる。

2) 張芝のはがれ等、堤防植生、表土の状態の異常

① 張芝のはがれ等、堤防植生 (▲)【計測条件：天端と法尻走行と除草】

芝のはがれ、裸地化、植生の繁茂状態は、図5に示すような、天端、法尻走行の計測を同時に連続的に撮影した画像によって確認することができる。



図 5(1) デジタル画像例 (左：堤防天端からの撮影、右：堤防法尻からの撮影)



図 5(2) デジタル画像例

③ 表土の状態 (×)

MMS計測では、表層のゆるみ状態を直接計測することはできない。

反射強度を精密に感知することで、土の緩み程度を評価することを可能とする機材の技術開発が必要となる。

3) 雨水排水上の問題となる小段の逆勾配箇所や局所的に低い箇所

雨水排水上の問題となる小段の逆勾配箇所や局所的に低い箇所は、レーザで捉えることができる。図6は、レーザ点群で堤体の断面形状を作成した結果である。図の中の丸枠は小段の場所であり、ここではなだらかに傾斜していることがわかる。逆勾配がとなっている場合は、このように断面図から判断することができる。また、局所的に低い箇所を検出するためには、図7に示すように、高さデータに色を付けた段彩図の作成が適している。図の中の四角の枠は、小段の場所であり、ここでは、黄色の中に別の色が混在していない、すなわち局所的に低い箇所が表れていない。

このように、小段の逆勾配箇所や局所的に低い箇所の検出には、レーザ点群で堤体の断面形状を作成すること、及び、高さデータによる段彩図で判定ができる。

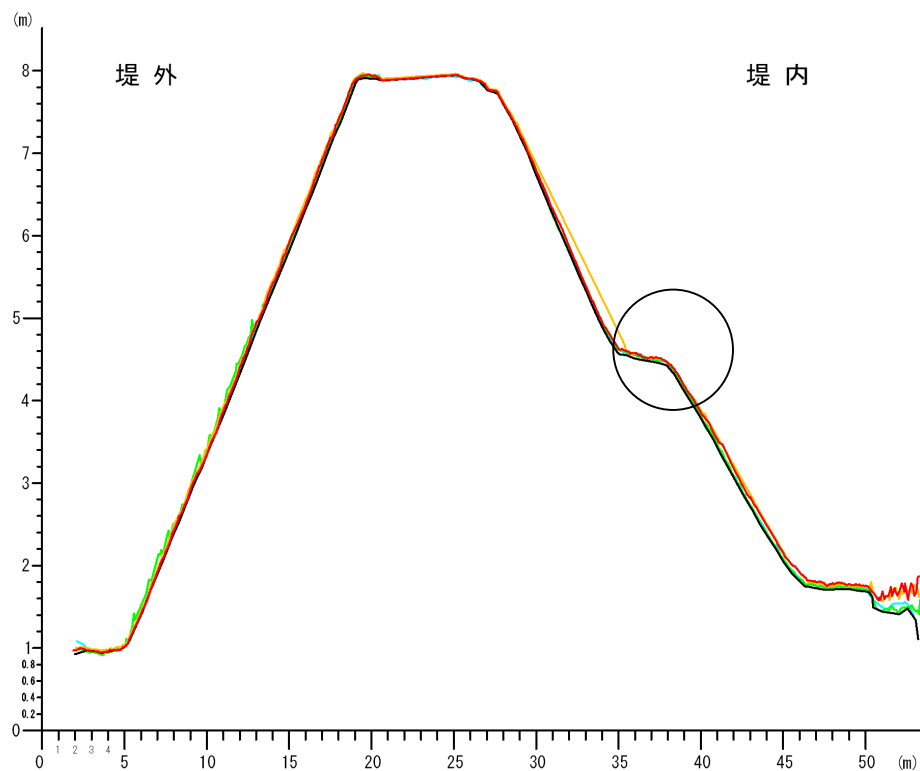


図 6 小段の断面形状

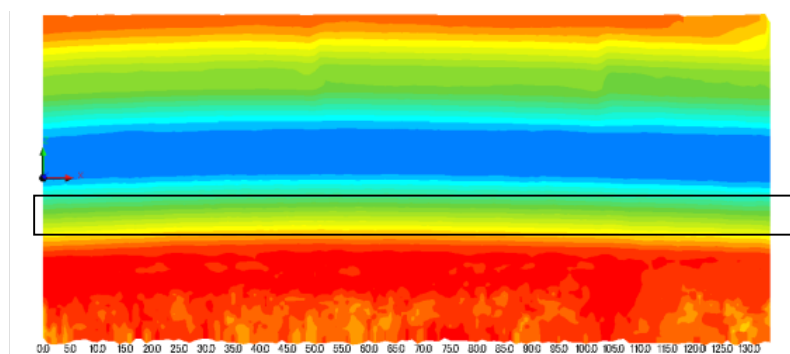


図 7 小段の段彩図

4) 法面・小段の不陸（○）【計測条件：天端走行と除草】

法面・小段の不陸は遠距離レーザで捉えることができる。

解析手法は、1.1 1) ② 項と同様である。不陸状態は、除草後に堤防天端から計測したデータ、法面の変状結果（図3）、差分解析結果（図4）によって可視化することができる。

(高度化)

経年的な沈下量を評価することで、点検の高度化を図ることができる。

5) 法面・小段の泥濘化 (×)

MMS計測では、法面や小段の泥濘化状態を計測・把握することはできない。温度センサーや反射強度を精密に感知できる機材の技術開発が必要となる。

6) モグラ等の小動物の穴

① モグラ等の小動物の穴の集中による堤体内の空洞化 (×)

モグラ等の小動物の穴の集中による堤体内の空洞化は、MMSでは地表面下の計測ができないことから検出することはできない。

現在、法面土壌を対象とした空洞を検出する技術はないが、路面やトンネルの空洞化調査などでは、熱赤外センサーを用いて温度分布を計測し、これを元に空洞を検出する手法などが採られている。堤防の点検においても、同様の計測技術開発を進めていくことが必要である。

② モグラ等の小動物の穴の集中していた場所の陥没 (▲)【計測条件：天端と法尻走行と除草】

モグラ等の小動物の穴は、遠距離レーザ及び画像の判読で捉えることができる。図8に模型の擬似モグラ穴を対象としたMMS計測の結果を示す。図8c)が擬似モグラ穴の模型である。直径30mmから300mmの円を配置している。模型は、図2に示す通り、MMSの走行位置から3.0m、8.5m、17.0mの位置に設置している。検証の結果、穴の形状が認識可能な大きさは、3.0mの位置(図8a))で直径30mm程度、17.0mの位置(図7b))で直径100mm程度であった。また、実際のヌートリアの巣穴をレーザ点群から検出した結果を図9(1)、同位置の写真を図9(2)に示す。例に示すとおり、小動物の穴が集中した場合の陥没の現象は、天端と法尻の走行による計測によって検出ができると考えられる。

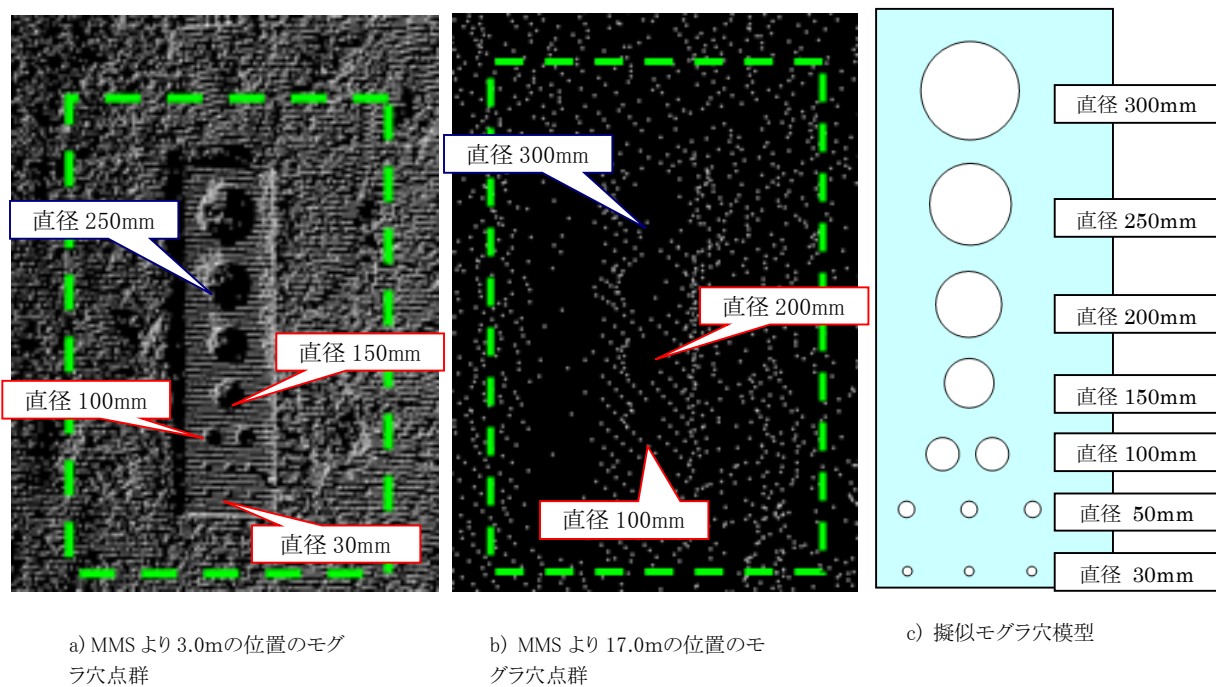


図 8 擬似モグラ穴の検出例

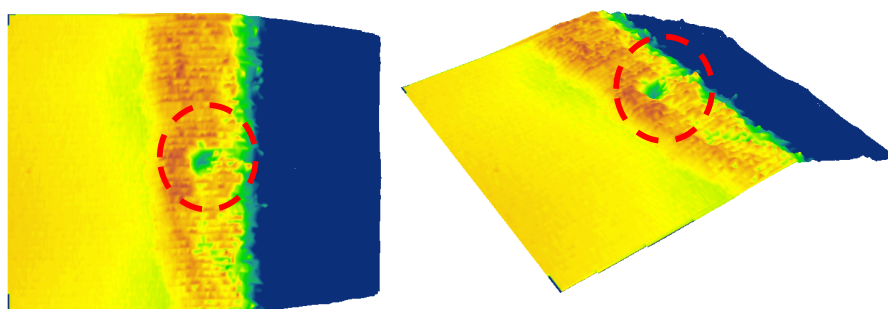


図 9(1) ニートリアの巣穴の検出例



図 9(2) ヌートリア巣穴（左：MMSに搭載したデジタル画像 右：現場写真）

7) 樹木の侵入、拡大（●）【計測条件：天端と法尻走行】

樹木の侵入、拡大状況も遠距離レーザ及び画像の判読で捉えることができる。

図10は、MMSの走行方向に対し50cmの幅のレーザ点群データを選択し、断面表示したものである。樹木繁茂区間で、レーザ点群が樹木等の植生等を捉えていることがわかる。これにより、どの程度の樹林、植生が繁茂しているかを把握することができる。また、画像によって植生種別等を判読できる。

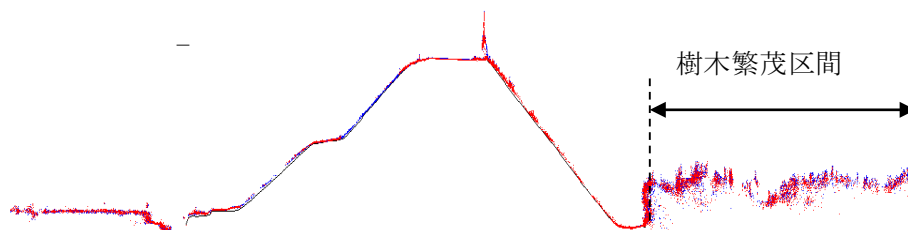


図 10 レーザ点群を幅 50cm のバッファ処理によって生成した堤防横断点群

8) 坂路・階段取り付け部の路面排水の集中に伴う洗堀、侵食（○）【計測条件：天端走行と除草】

坂路・階段取り付け部の路面排水の集中に伴う洗堀、侵食は1.1 1)③項と同様の解析手法を適用する。計測は堤防天端と坂路の法尻、法肩から実施する。

9) 堤防護岸に目地の開き、亀裂、破損等の変状 (●) 【計測条件：天端と法尻走行】

堤防護岸の目地の開き、亀裂、破損等の変状は、天端走行と法尻や河川敷からの計測時に取得した画像と遠距離レーザにより捉えることができる。

図11は、目地の開き部分を撮影したデジタル画像（部分拡大）、図12は、遠距離レーザ点群の標高段彩と断面表示したものである。図中の赤線で示した範囲が目地の部分で、目地の位置、開きを検出できている。

(高度化)

レーザ点群データの標高差分抽出により、経年的な沈下量、目地の開き幅の評価によって、点検の高度化を図ることができる。



図 11 目地のデジタル画像（部分拡大）

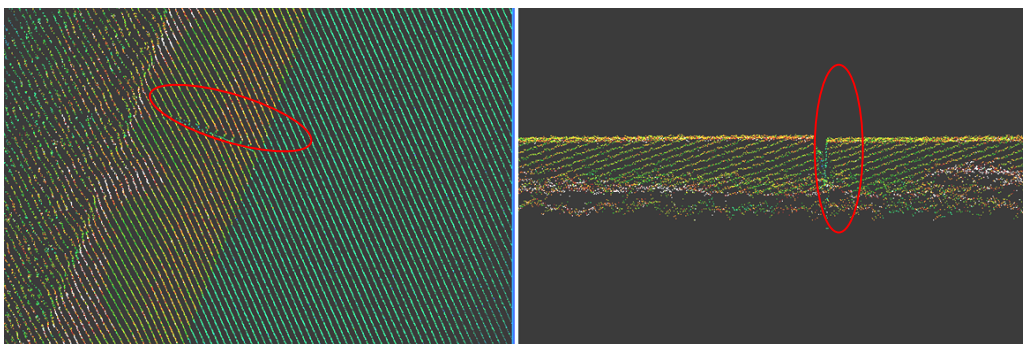


図 12 目地の部分の遠距離レーザ点群の標高段彩と断面表示

10) 根固工の変状 (×)

根固め工は低水部にあり、MMS計測は適用できない。

船舶型のMMSなどにより、低水護岸も併せた低水施設管理が可能となる。

11) 水制工の変状 (×)

水制工の変状は、前述の10) 項と同様に、MMS計測は適用できない。

12) 遮水シートの露出や破断 (▲)【計測条件：天端と法尻走行と除草】

遮水シートの露出や破断は、法尻からの計測時に取得した画像によって、容易に検出できると考えられる。

13) 護岸及び端部の洗掘、侵食 (×)

護岸及び端部の洗掘、侵食は、前述の10) 項と同様に、MMS計測は適用できない。

1.2 天端

14) 堤防天端及び法肩に亀裂、陥没、不陸等の変状 (○)【計測条件：天端走行と除草】

堤防天端及び法肩の亀裂、陥没、不陸等の変状は、遠距離レーザ及び画像の判読で捉えることができる。

天端は、レーザの照射距離も近く、レーザ点の密度も高いため、最も高精度に計測を実施することができる。

図13(1)は、天端における中心線の標高と、横断方向の標高の比高差の分布を色調表現したものである。寒色系が低いことを示す。一定勾配であれば、これらの色調は平行に現れるが、この例では、法肩付近に局所的に比高差が大きい領域があり、勾配が不均一であることが検出されている。

このように、標高分布を特定の高さからの差分という形で視覚化する事により、図13(2)のような一般的な等高分布図では把握できない、より詳細な傾斜分析や変状分析が可能となる。これにより陥没や不陸等の変状を把握することが可能となる。また、亀裂は、法面・堤防護岸・小段の亀裂と同様の処理で検出することが可能である。

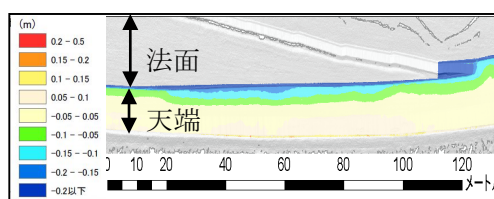


図 13(1) 横断方向標高差分布図

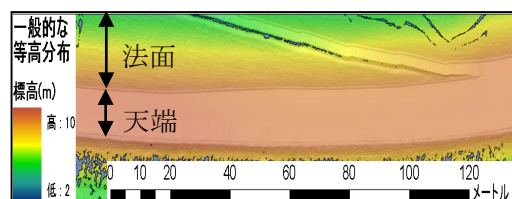


図 13 (2) 一般的な等高分布図

さらに、定量的に経年的な沈下量を評価することで、点検の高度化を図ることができる。図14(1)は複数期の堤防横断面データを重ね合せた結果である。この例では、腹付盛土施工完了時の竣工図書を基に堤防3次元数値データを作成し、MMSで計測したデータを用いて断面形状を算出し、差分解析を行ったものである。この結果、堤防天端では、竣工図書の値に対して、川表側100mm～130mm、川裏側200mm～260mmの沈下を検出した。

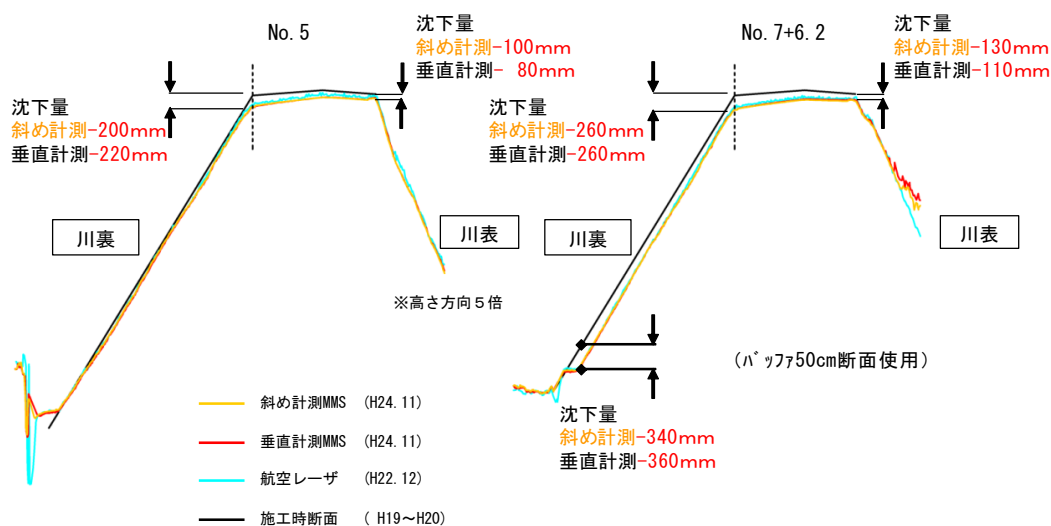


図 14 (1) 経年変化図

また、図14(2)は、前述のデータを用いて、標高差分解析を行い、沈下・変状の傾向を面的に表したものである。暖色系は隆起傾向、寒色系は沈下傾向を示す。なお、図中のNo.5、No.7+6.2の位置が、前述の横断面を作成した位置である。これにより、天端や法面の面的な変状を可視化し、差分数値による定量的な沈下量を把握することができる。

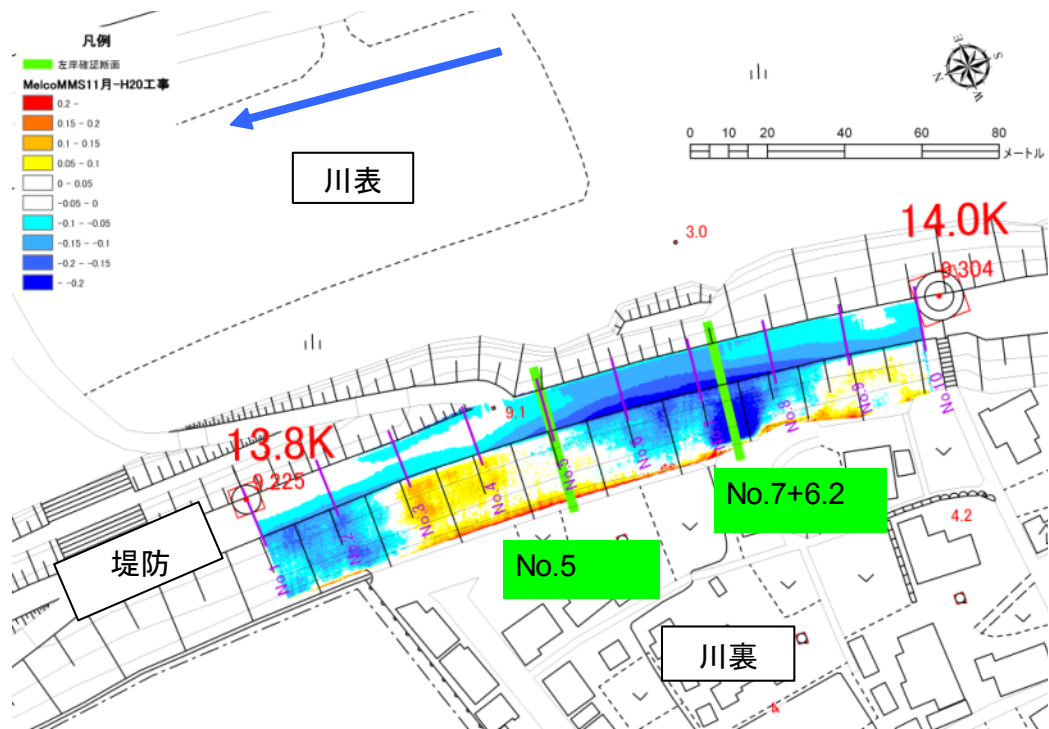


図 14(2) 2 時期の差分図

(高度化)

上述の通り、堤防法面の陥没・はらみだし・法崩れ、寺勾配化などの堤防の変状は、レーザ計測データの起伏分析、複数期の差分解析によって、堤防法面の起伏を可視化し、定量的に評価することにより、点検の高度化を図ることができる。

15) 天端肩部の侵食 (○) 【計測条件：天端走行と除草】

天端肩部の侵食は、前述の堤防天端及び法肩の亀裂、陥没、不陸等の変状と同様の処理で把握することができる。

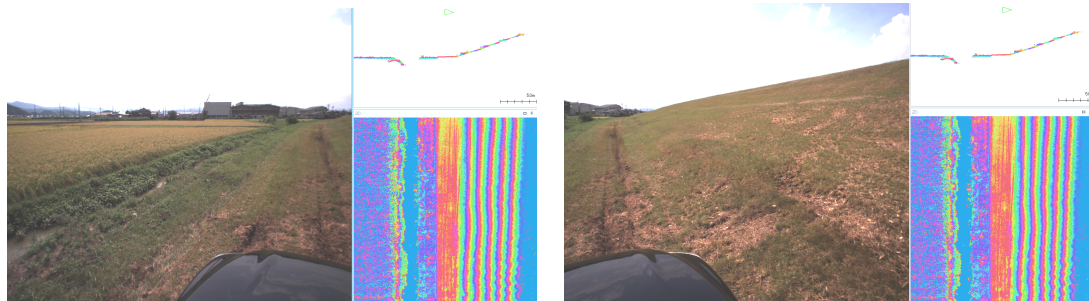
1.3 裏法尻部

16) 堤脚付近の排水不良に伴う浸潤状態 (▲) 【計測条件：天端と法尻走行と除草】

堤脚付近の排水不良に伴う浸潤状態は、天端走行と法尻や河川敷からの計測時に取得した画像により直接捉えることができる。

図15に裏法尻走行時に撮影したデジタル画像カメラを示す。なお、図中の写真部の右側の色表現は、標高を2cmごとに区分してグラデーション表示することにより、点群の高さ分布

を表現したものである。



(左カメラからの堤脚水路側の撮影画像)

(右側カメラからの法尻側の撮影画像)

図 15 裏法尻走行時のデジタル画像

このように、出水前、出水後の湿潤状態は、MMSの法尻走行で得る連続的に撮影した画像をもって観察することができる。

また、平常時から堤体の浸潤線が高い場合は、堤防法尻は湿潤状態の可能性が高く、芝などの植生の生育が早い傾向があり、これらの画像をもって浸潤状態の可否を把握することができる。

17) 堤脚付近の堤体土の軟弱化、流動化 (×)

堤脚付近の堤体土の軟弱化、流動化は、2)② 表土の状態と同様MMSの計測では土質性状を評価することができないため適用できない。

反射強度を精密に感知できるなどの機材の新技术開発が必要となる。

18) しぼり水による浸潤状態 (×)

しぼり水による湿潤状態は、局部的に見られる現象であり、画像による直接観察はかなり難しいものとする。

堤防の点検への適用に向けて、熱赤外線を計測する温度センサーなどをMMSに搭載する計測技術の開発を進めていくことも必要である。

19) 法尻付近の漏水、噴砂 (▲) 【計測条件：天端と法尻走行と除草】

法尻付近の漏水、噴砂は、天端走行と法尻や河川敷からの計測時に取得した画像(図5(2)、図15参照)により直接捉えることができる。

20) 堤脚保護工の変形 (▲)【計測条件：天端と法尻走行と除草】

堤脚保護工の変形は、画像（図5(2)、図15参照）及び遠距離レーザの判読で捉えることができる。

1.1 1) ② 項と同様の処理で把握することができる。

21) 局所的に湿性を好む植生種の群生 (●)【計測条件：天端と法尻走行】

局所的に湿性を好む植生種の群生は、天端走行と法尻や河川敷からの計測時に取得した画像により直接捉えることができる（図5(2)、図15参照）。

22) ドレーン工の目詰まり、あるいは濁水の排水 (×)

MMS計測では目詰まりは、地中内で起きる現象であり、MMSでは検出できない。

また、濁水などの微細な変化は、本研究成果では検出することができなかった。

1.4 堤脚水路

23) 堤脚水路の継目からの漏水・噴砂 (×)

川裏の法尻にある堤脚水路の両岸からの計測走行ができれば適用できるが、このような条件が整った区間は希にしかなく、MMSでの計測は困難である。

24) 堤脚水路の閉塞 (×)

堤脚水路の閉塞は、1.4 23)項と同様である。

2.高潮堤防（被覆構造の堤防）

2.1 波返工（および胸壁の堤体工）

25) ひび割れの有無 (×)

本研究開発で使用した機器では、波返工に照射するレーザの点群密度は10mm程度であるため、求められる幅のクラックまで検出することはできない。

今後、レーザの照射頻度や波長の改良などの機器開発によって対応できる可能性が高い。

26) 剥離・剥落・欠損の有無 (●)【計測条件：天端と法尻走行】

高潮堤防の剥離・剥落・欠損の有無は、画像の判読により捉えることができる。

図16に高潮堤防の法尻走行時のデジタル画像を示す。



図 16(1) 高潮堤防 法尻走行時のデジタル画像

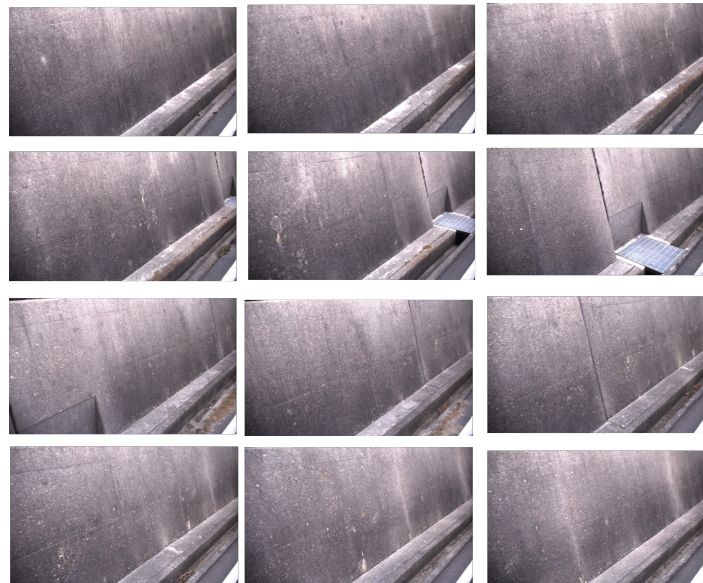


図 16 (2) MMS の法尻走行時に連続的に撮影したデジタル画像

27) 錆汁、鉄筋露出等の有無 (●)【計測条件：天端と法尻走行】

錆汁、鉄筋露出等の有無も前述の剥離・剥落・欠損と同様に、画像により直接捉えることができる。

28) 隣接スパンの目地部、打ち継ぎ部の高低差、ずれ、開き (◎)【計測条件：天端走行】

隣接スパンの目地部、打ち継ぎ部の高低差、ずれ、開きは、天端走行の遠距離レーザ及び画像の判読で捉えることができる。目地及び発生したクラックのデジタル画像を図17に示す。処理内容は、1.1 9) 項と同様である。

(高度化)

レーザ点群データの標高差分抽出により、変状の定量的な評価を行い、点検の高度化を図ることができる。



図 17 堤防の目地（上）、クラック（下）のデジタル画像

2.2 天端被覆工

29) 沈下・陥没の有無（◎）【計測条件：天端走行】

天端被覆工の沈下・陥没の有無は、遠距離レーザ及び画像の判読で捉えることができる。
処理内容は、1.2 14)項と同様である。

(高度化)

レーザ点群データの標高差分抽出により、変状を定量的な評価を行い、点検の高度化を図ることができる。

30) 植生の繁茂等の有無（◎）【計測条件：天端走行】

植生の繁茂等の有無は、画像の判読により捉えることができる。

31) ひび割れの有無 (×)

2.1 25)項と同様である。

32) 隣接スパンの目地部、打ち継ぎ部の高低差、ずれ、開きの有無 (◎)【計測条件：天端走行】

隣接スパンの目地部、打ち継ぎ部の高低差、ずれ、開きは、天端走行の遠距離レーザ及び画像の判読で捉えることができる。処理内容は、1.1 9) 項と同様である。

(高度化)

レーザ点群データの標高差分抽出により、変状の定量的な評価を行い、点検の高度化を図ることができる。

33) 剥離・剥落・欠損の有無 (◎)【計測条件：天端走行】

天端被覆工の剥離・剥落・欠損の有無は、画像の判読により捉えることができる。

2.3 表・裏法被覆工

34) ひび割れの有無 (適用できない項目×)

表・裏法被覆工のひび割れの有無は、2.1 25) 項と同様である。

35) 沈下・陥没の有無 (●)【計測条件：天端と法尻走行】

表・裏法被覆工の沈下・陥没の有無は、遠距離レーザ及び画像の判読で捉えることができる。処理内容は、1.2 14) 項と同様である。

(高度化)

レーザ点群データの標高差分抽出により、変状を定量的な評価を行い、点検の高度化を図ることができる。

36) 隣接スパンの目地部、打ち継ぎ部の高低差、ずれ、開きの有無 (●)【計測条件：天端と法尻走行】

隣接スパンの目地部、打ち継ぎ部の高低差、ずれ、開きの有無は、遠距離レーザ及び画像の判読で捉えることができる。処理内容は、1.1 9) 項と同様である。

(高度化)

レーザ点群データの標高差分抽出により、変状の定量的な評価を行い、点検の高度化を図ることができる。

37) 漏水・噴砂の痕跡の有無（●）【計測条件：天端と法尻走行】

表・裏法被覆工の漏水・噴砂の痕跡の有無は、天端走行と法尻や河川敷からの計測時に取得した画像の判読により捉えることができる。

38) 植生の繁茂等の有無（●）【計測条件：天端と法尻走行】

植生の繁茂等の有無は、画像の判読により捉えることができる。

39) 剥離・剥落・欠損の有無（●）【計測条件：天端と法尻走行】

表・裏法被覆工の剥離・剥落・欠損の有無は、画像の判読により捉えることができる。

40) 錆汁、鉄筋露出等の有無（●）【計測条件：天端と法尻走行】

表・裏法被覆工の錆汁、鉄筋露出等の有無は、画像の判読により捉えることができる。

2.4 排水工

41) 目地の高低差、ずれ、開き、漏水等の新規変状の有無と進行（●）【計測条件：天端と法尻走行】

排水工の目地の高低差、ずれ、開き、漏水等の新規変状の有無と進行は遠距離レーザ及び画像の判読で捉えることができる。処理内容は、1.1 9) 項と同様である。

（高度化）

レーザ点群データの標高差分抽出により、変状の定量的な評価を行い、点検の高度化を図ることができる。

2.5 消波工・根固工

消波工・根固工は、低水部にあり、川中からの計測が適用の条件となる。従ってMMSの適用はできない。

比較的成本が高いが、航空レーザによる定期的な計測が可能であれば、これら点検管理に適用できる。また、船舶からのレーザ照射による計測の技術開発による適用も可能性が高い。

42) ブロックの移動・散乱の有無（×）

43) 沈下の有無（×）

44) ブロックの破損、ひび割れ・損傷の有無 (×)

3.特殊堤

3.1 自立式特殊堤防

自立式特殊堤防は、コンクリート、鋼矢板、鋼管杭等の部材で構成された直立構造であり、MMSによって計測可能な範囲は堤内地側のパラペット壁等に限られるため、MMSの適用はできない。

川表側は、船舶型のMMSによる計測が考えられる。

3.1.1 本体・波返工

45) ひび割れの有無 (×)

46) 剥離・剥落・欠損の有無 (×)

47) 錆汁、鉄筋露出等の有無 (×)

48) 隣接スパンとの目地部、打ち継ぎ部の高低差、ずれ、開きの有無 (×)

3.1.2 排水工

49) 目地の高低差、ずれ、開きの有無 (×)

3.1.3 消波工・根固工

50) ブロックの移動・散乱の有無 (×)

51) 沈下の有無 (×)

52) ブロックの破損、ひび割れ・損傷の有無 (×)

3.2 胸壁構造堤防

胸壁構造堤防は、3.1項と同様の理由により、MMSの適用ができない施設である。

3.2.1 胸壁部

53) 沈下・陥没の有無 (×)

54) ひび割れの有無 (×)

55) 剥離・剥落・欠損の有無 (×)

56) 錆汁、鉄筋露出等の有無 (×)

57) 隣接スパンとの目地部、打ち継ぎ部の高低差、ずれ、開きの有無 (×)

4. 陸閘

陸閘は、高潮堤防、自立式特殊堤防、胸壁構造堤防に設置される施設である。堤内地と堤外地は車両にて走行可能であることから、MMSの適用が可能な施設である。

58) 隣接する堤防天端と高低差、ずれ、目地の開きの有無（◎）【計測条件：天端走行】

陸閘の隣接する堤防天端との高低差、ずれ、目地の開きの有無は、遠距離レーザ及び画像の判読で捉えることができる。

処理内容は、1.1 9)項と同様である。図18に陸閘の目地部分のデジタル画像、図19にパラペット、陸閘に照射したレーザ点群を示す。

(高度化)

図19に示すレーザ点群データの標高差分抽出により、変状の定量的な評価を行い、点検の高度化を図ることができる。



図 18 陸閘付近の目地部分のデジタル画像例

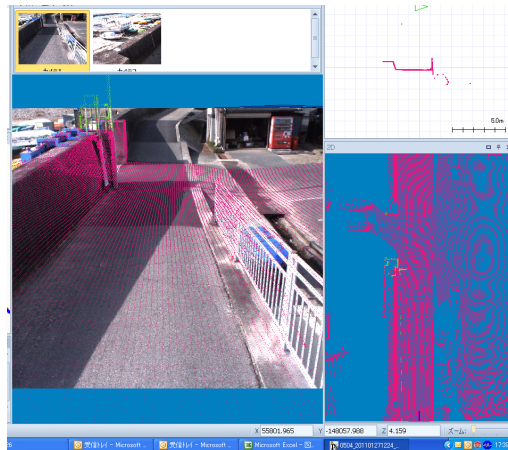


図 19 パラペット、陸閘に照射したレーザ点群

59) 扉体の傾きやたわみ等の有無 (◎) 【計測条件：天端走行】

扉体の傾きやたわみ等の有無は、画像 (図18) 及びレーザ (図19) の判読で捉えることができ、1.1 1) ②項と同様の処理でこれら現象を把握することができる

60) 扉体や車輪に錆等の有無 (◎) 【計測条件：天端走行】

陸閘の扉体や車輪の錆等の有無は、画像の判読で捉えることができる。図20に陸閘の扉体付近のデジタル画像を示す。



図 20 陸閘の扉体付近のデジタル画像

61) 扉体と堤体の間にゴミ等の異物の有無 (◎) 【計測条件：天端走行】

陸閘の扉体と堤体の間のゴミ等の異物の有無は、画像の判読で捉えることができる。

5.樋門等構造物周辺の堤防

5.1 構造物上部の天端及び法面

62) 構造物上部の天端及び法面の抜け上がりや亀裂の状態の変化の有無、幅、段差の拡大(●)【計測条件：天端と法尻走行】

構造物上部の天端及び法面の抜け上がりや亀裂の状態の変化の有無、幅、段差の拡大は遠距離レーザで捉えることができる。解析手法は1.1 1) ② 項と同様である。

実際の樋門・樋管の堤防横断部の天端抜け上がり、周辺の沈下現象を、本研究期間中に確認することができた。図21に樋門部周辺の堤防天端の沈下状況を示す。

法尻からの走行によって取得する画像による亀裂、段差の確認、2時期の点群データの差分によって、変状を把握することができる。

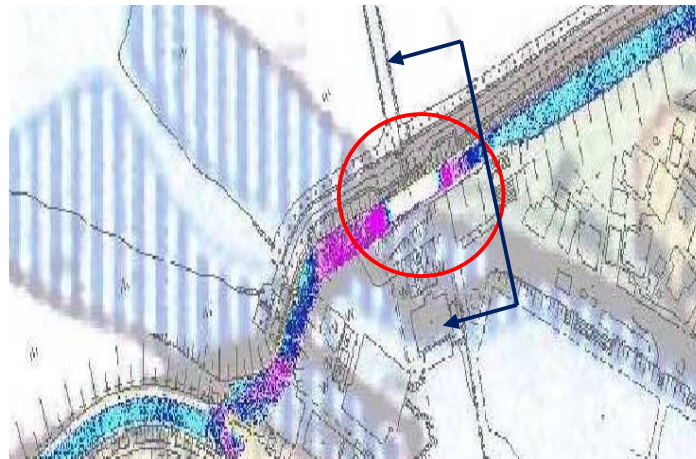


図 21(1) 樋門部周辺の堤防天端の沈下状況（赤色部：沈下部）

当樋門の構造は、図21(2)に示すとおり、杭基礎による剛形式であり、樋管横断部の抜け上がり、樋管周辺の堤防沈下の傾向が顕著に現れたことが把握できた例である。

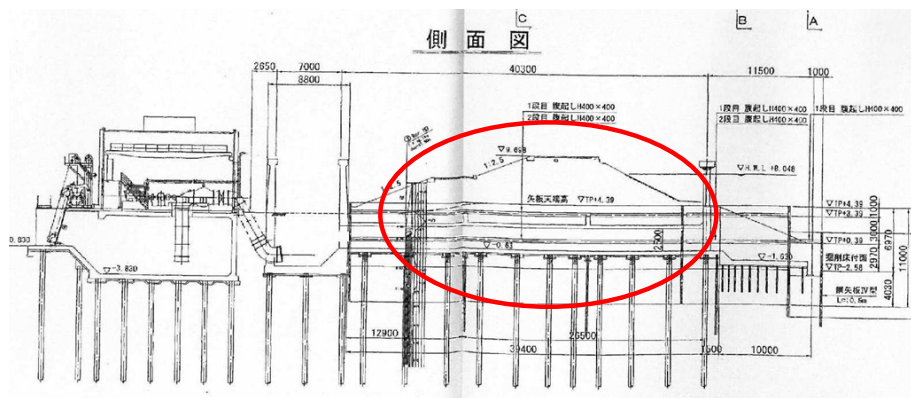


図 21(2) 当該樋門の構造横断面図（杭基礎構造）

63) 構造物上部の天端及び法面の堤体法尻部、小段部や堤脚水路からの漏水・噴砂等の吸い出しの痕跡（●）【計測条件：天端と法尻走行】

構造物上部の天端及び法面の堤体法尻部、小段部や堤脚水路からの漏水・噴砂等の吸い出しの痕跡は、画像の判読で捉えることができる。図22に樋門部周辺のデジタル画像を示す。



図 22(1) 樋門部周辺のデジタル画像

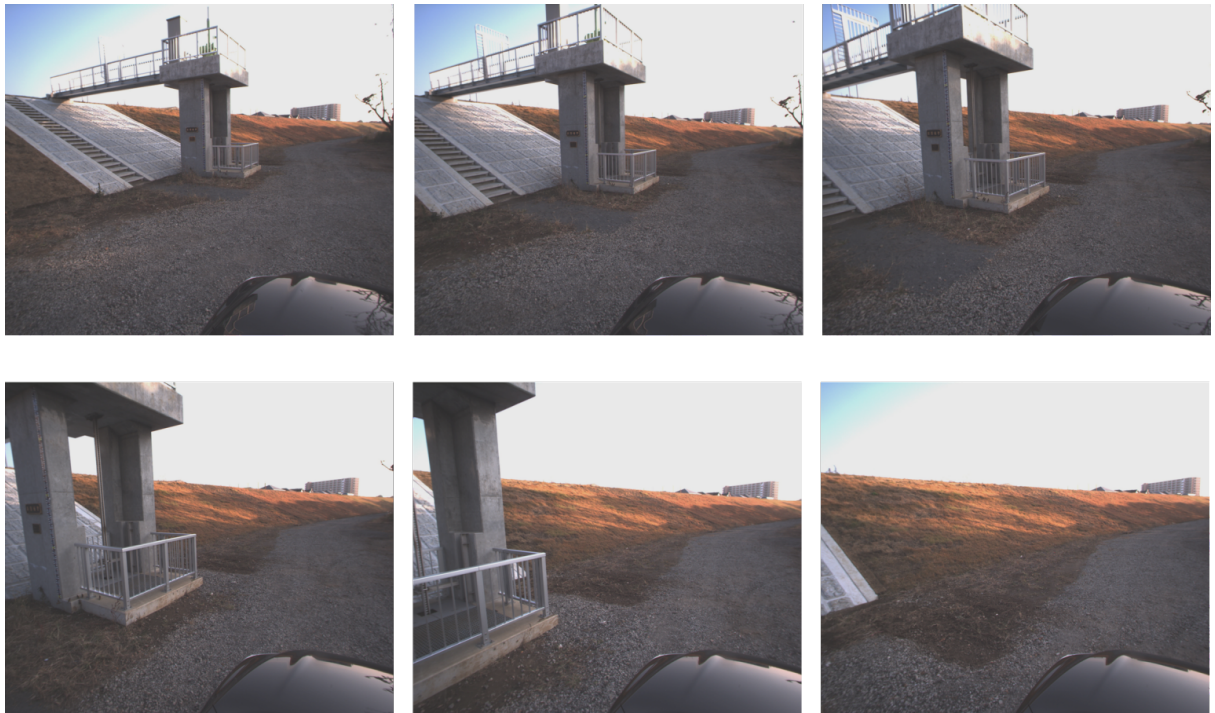


図 22 (2) 樋門部周辺のMMSによる連続的に撮影したデジタル画像

64) 構造物上部の天端及び堤体法尻部、小段部や堤脚水路の構造物上の陥没（●）【計測条件：天端と法尻走行】

構造物上部の天端及び堤体法尻部、小段部や堤脚水路の構造物上の陥没は、遠距離レーザ及び画像の判読で捉えることができる。処理内容は、1.2 14) 項と同様である。

(高度化)

図23に示すとおり、レーザ点群データの標高差分抽出により、変状を定量的な評価を行い、点検の高度化を図ることができる。

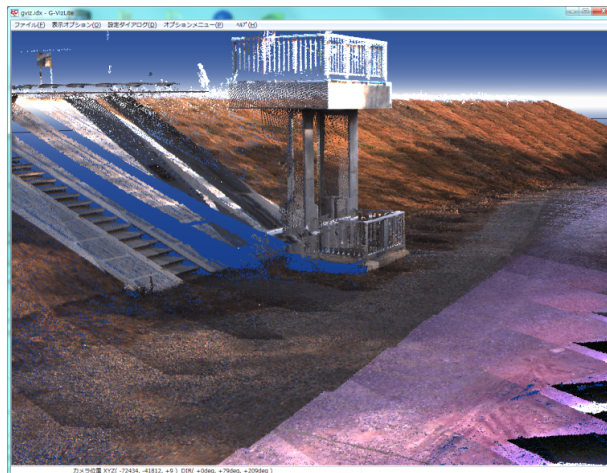


図 23 樋門部周辺のMMSカラー点群データ

5.2 構造物同士の接合部

以下の構造物同士の接合部は、MMSの天端、法尻からの走行では画像取得、レーザ照射ができない。

- 65) 構造物各部の接合部の開きの状態の変化。幅、段差の拡大 (×)
- 66) 構造物各部の接合部から吸い出しの痕跡 (×)

5.3 函渠

- 67) 函渠の撓み、折れ曲がりや、継手の開き、函体のクラックの状態の変化、拡大 (×)

樋門の函渠部は、MMSの天端、法尻からの走行では画像取得、レーザ照射ができない。