

博士論文

河川堤防モニタリングに関する
モバイルマッピングシステム（MMS）計測技術の研究

2018年1月

間野 耕司

岡山大学大学院
環境生命科学研究科

目次

1. 序論	
1.1. 研究の背景と目的	1-1
1.2. 独自性	1-3
2. 河川堤防の状況把握における MMS の必要性	
2.1. はじめに	2-1
2.2. 河川堤防の現状	2-2
2.2.1. 河川堤防の成り立ちとその構造	2-2
2.2.2. 河川堤防の災害	2-4
2.2.3. 河川堤防の安全性	2-9
2.2.4. 河川堤防における状態把握の現状と課題	2-10
2.3. 河川堤防の維持管理で利用されているセンシング技術と MMS に関する既往研究	2-11
2.3.1. 一般的に利用されているセンシング技術	2-11
2.3.2. 河川の維持管理で利用されているセンシング技術	2-14
2.3.3. MMS を用いた河川堤防の状態把握に関する既往研究	2-24
2.4. 河川堤防の維持管理に MMS を用いる必要性	2-26
2.4.1. 河川堤防維持管理の課題と MMS の必要性	2-26
2.4.2. 研究課題と本研究のアプローチ	2-27
3. MMS 取得データの位置精度評価	
3.1. はじめに	3-1
3.2. MMS	3-2
3.2.1. MMS の概要	3-2
3.2.2. 標準型 MMS	3-2
3.3. MMS 点群の位置精度評価手法	3-4
3.3.1. 提案する位置精度評価手法	3-4
3.3.2. LS3D の概要	3-5
3.3.3. LS3D の理論	3-6
3.4. 標準型 MMS で取得された点群の位置精度評価	3-11
3.4.1. 実験計測	3-11
3.4.2. データ取得の手順と対象地域の設定	3-11
3.4.3. 軌跡解析におけるデータ品質評価	3-14
3.4.4. 安定度評価	3-15

3.4.5.	相対評価	3-18
3.4.6.	絶対評価	3-21
3.4.7.	クロスセンサ評価	3-23
3.4.8.	考察	3-25
3.5.	本章のまとめ	3-27
4.	河川堤防計測用 MMS の製作と位置精度評価	
4.1.	はじめに	4-1
4.2.	河川計測用 MMS の製作	4-1
4.2.1.	河川計測用 MMS の改良点	4-1
4.2.2.	河川計測用 MMS に搭載したセンサ	4-3
4.2.3.	フレーム型 MMS と昇降型 MMS	4-5
4.3.	河川計測用 MMS で取得された点群に対する位置精度評価手法	4-6
4.4.	河川計測用 MMS で取得された点群に対する位置精度評価	4-7
4.4.1.	実験計測	4-7
4.4.2.	軌跡解析におけるデータ品質評価	4-8
4.4.3.	相対評価	4-9
4.4.4.	絶対評価	4-13
4.4.5.	考察	4-17
4.5.	本章のまとめ	4-19
5.	河川堤防における MMS 計測方法の検討	
5.1.	はじめに	5-1
5.2.	河川堤防の MMS 計測で想定される誤差要因と検証内容の整理	5-1
5.2.1.	河川堤防の MMS 計測で想定される誤差要因の整理	5-1
5.2.2.	検証内容の整理	5-3
5.3.	実験計測による検証	5-4
5.3.1.	実験計測	5-4
5.3.2.	河川距離標と GNSS 測量の標高較差	5-6
5.3.3.	基線長による位置精度への影響	5-8
5.3.4.	ネットワーク型 RTK 解析 (VRS) 方式の有効性	5-11
5.3.5.	河川堤防における GNSS 不可視区間での位置精度結果	5-13
5.3.6.	河川堤防における MMS 計測手法の整理	5-17
5.4.	軟弱地盤地の河川堤防における	
	MMS 点群の位置精度評価	5-18
5.4.1.	実験計測	5-18

5.4.2.	円山川での位置精度評価	5-20
5.4.3.	吉井川での位置精度評価	5-21
5.4.4.	評価結果のまとめ	5-22
5.5.	本章のまとめ	5-23
6. 変形・沈下把握手法の検討		
6.1.	はじめに	6-1
6.2.	変形・沈下把握に関する課題の整理	6-1
6.2.1.	変形・沈下把握の現状	6-1
6.2.2.	変形・沈下把握に関する既往研究	6-2
6.2.3.	変形・沈下把握の課題	6-3
6.3.	変形・沈下把握手法	6-4
6.3.1.	提案手法の概要	6-4
6.3.2.	縦断表示による変形・沈下区間抽出手法	6-4
6.3.3.	面的な分布表現による変形・沈下状況の詳細把握手法	6-6
6.4.	MMS 点群を用いた変形・沈下区間把握の効果	6-9
6.4.1.	検証地区とデータ取得	6-9
6.4.2.	円山川における評価	6-10
6.4.3.	吉井川における評価	6-17
6.5.	本章のまとめ	6-22
7. 堤防高把握手法の検討		
7.1.	はじめに	7-1
7.2.	堤防高把握に関する課題の整理と解決策の検討	7-1
7.2.1.	堤防高把握の重要性と要求精度	7-1
7.2.2.	堤防高把握の現状とその課題	7-2
7.2.3.	MMS を用いた堤防形状の把握に関する既往研究とその課題	7-2
7.2.4.	解決策の検討	7-2
7.3.	堤防高把握手法	7-3
7.3.1.	提案手法の概要	7-3
7.3.2.	堤防高把握手法	7-4
7.4.	堤防高把握の効果	7-8
7.4.1.	検証地区とデータ取得	7-8
7.4.2.	評価の概要	7-8
7.4.3.	全区間評価	7-9
7.4.4.	部分評価	7-10

7.4.5.	考察		7-15
7.5.	本章のまとめ		7-17
8.	河川堤防モニタリング		
8.1.	はじめに		8-1
8.2.	沈下・変形、堤防高把握の検討結果		8-1
8.2.1.	変形・沈下把握の検討結果		8-1
8.2.2.	堤防高把握の検討結果		8-2
8.2.3.	得られた知見のまとめ		8-2
8.3.	河川堤防モニタリングの提案		8-3
8.3.1.	提案手法の概要	8-3	
8.3.2.	広域モニタリング		8-5
8.3.3.	詳細モニタリング		8-8
8.3.4.	河川堤防管理システムの構築		8-9
8.4.	本章のまとめ		8-10
9.	結論		
9.1.	総括		9-1
9.2.	河川全体のモニタリングへの展開		9-5
9.3.	河川堤防・河川モニタリングに MMS およびレーザ計測技術を利用する意義と効果		9-9
9.4.	今後の課題と展望		9-10

謝辞

図表一覧

図 2-1	補強や嵩上げがされる形で築造された河川堤防	2-2
図 2-2	土堤 (兵庫県加古川)	2-3
図 2-3	特殊堤 (岡山県吉井川)	2-3
図 2-4	時間降雨量 80 mm以上の年間発生回数 [環境省, 2013]	2-4
図 2-5	平成 27 年 9 月の関東・東北降雨による鬼怒川の破堤	2-6
図 2-6	鬼怒川 決壊区間上流側からの写真 [国土交通省, 2016]	2-6
図 2-7	平成 16 年台風 23 号による円山川の破堤状況 [国土交通省, 2005]	2-7
図 2-8	杭で支持された河川横断構造物に生じる変形と空洞の概念図	2-8
図 2-9	河川管理施設の推移 [国土交通省, 2015]	2-8
図 2-10	河川堤防の基本的な断面形状 [吉川勝秀, 2008]	2-9
図 2-11	洪水規模が大きくなった場合に堤防越水が生じる場所の推定	2-9
図 2-12	縦横断測量の現地計測風景	2-11
図 2-13	堤防点検の現地観測風景	2-11
図 2-14	計測プラットフォーム別空間解像度と適用面積等の関係	2-12
図 2-15	航空レーザ計測の概念	2-14
図 2-16	航空レーザ計測成果による横断図作成	2-14
図 2-17	ALB 計測概念	2-15
図 2-19	標高段彩図と航空写真地図	2-17
図 2-18	ALB 点群と航空写真地図の平面と断面表現	2-17
図 2-20	特殊堤における点群による陰影図	2-19
図 2-21	特殊堤付近の現況写真	2-20
図 2-22	GNSS 縦断測量測定位置 [鵜飼尚弘, 2007]	2-21
図 2-23	コロコロポール [鵜飼尚弘, 2007]	2-21
図 2-24	堤防センサにおける光ファイバの配置	2-22
図 2-25	本研究の構成	2-28
図 3-1	MMS Type-X640	3-3
図 3-2	MMS レーザスキャナ取り付け角度	3-3
図 3-3	MMS 点群の位置精度評価手法	3-5
図 3-4	MMS 計測経路	3-12
図 3-5	安定度評価結果	3-17
図 3-6	相対評価結果	3-20
図 3-7	クロスセンサ評価結果	3-24
図 4-1	レーザスキャナの高所設置による効果	4-2
図 4-2	レーザスキャナの設置角度の改良	4-2

図 4-3	フレーム型 MMS と昇降型 MMS	4-5
図 4-4	MMS 点群の位置精度評価手法	4-6
図 4-5	検証点位置と走行経路	4-8
図 4-6	相対評価結果 (フレーム型 MMS シーン 1 と 3 の比較結果)	4-11
図 4-7	相対評価結果 (昇降型 MMS シーン 11 と 13 の比較結果)	4-12
図 4-8	検証点の計測例 (左 : 50m 先, 右 100m 先)	4-13
図 4-9	河川計測用 MMS の平面誤差分布	4-15
図 4-10	河川計測用 MMS の標高誤差分布	4-15
図 4-11	精度検証結果	4-18
図 5-1	使用した河川計測用 MMS	5-5
図 5-2	検証点の設置風景	5-5
図 5-3	検証点付近の MMS 点群	5-5
図 5-4	基線長による平面位置精度への影響 (吉井川での検証結果)	5-9
図 5-5	基線長による標高精度への影響 (吉井川での検証結果)	5-9
図 5-6	基線長による平面位置精度への影響 (円山川での検証結果)	5-10
図 5-7	基線長による標高精度への影響 (円山川での検証結果)	5-10
図 5-8	VRS 方式による平面位置精度への影響 (吉井川での検証結果)	5-12
図 5-9	VRS 方式による標高精度への影響 (吉井川での検証結果)	5-12
図 5-10	高架道路を跨ぐ区間における GPS+GLONASS と GPS のみの PDOP	5-14
図 5-11	樹木に覆われた区間における GPS+GLONASS と GPS のみの PDOP	5-15
図 5-12	道路橋を跨ぐ区間の PDOP, 検証点との標高較差	5-15
図 5-13	樹木に覆われた区間の PDOP, 検証点との標高較差	5-15
図 5-14	対象地区	5-19
図 5-15	検証点設置位置図	5-22
図 6-1	河川堤防の変形・沈下把握手法の流れ	6-4
図 6-2	縦断表現処理の流れ	6-6
図 6-3	連続標高図	6-7
図 6-4	傾倒算出の流れ	6-8
図 6-5	傾倒算出の概念	6-8
図 6-6	検出可能な傾倒角度 (理論値)	6-8
図 6-7	対象地区	6-9
図 6-8	円山川 標高縦断図	6-11
図 6-9	円山川 2013 年 (平成 25 年) と 2015 年 (平成 27 年) の 堤防高差分縦断図	6-12

図 6-10	円山川 堤防天端横断勾配縦断図	6-13
図 6-11	連続標高図, 標高差分図および, 治水分類図	6-14
図 6-12	下げ振りによる傾倒計測風景	6-15
図 6-13	MMS 点群と下げ振りの傾倒算出結果	6-15
図 6-14	樋門周辺の連続標高図による沈下把握結果	6-16
図 6-15	小段の逆勾配化箇所状況	6-16
図 6-16	縦断取得位置図	6-17
図 6-17	吉井川 堤防高縦断図	6-18
図 6-18	吉井川 2015年1月と12月の堤防高差分縦断図	6-19
図 6-19	吉井川 天端道路の横断勾配縦断図	6-20
図 6-20	吉井川 連続標高図 (0.2k.p~0.4k.p 区間)	6-21
図 6-21	目地の開き確認箇所	6-21
図 7-1	堤防高把握処理の流れ	7-3
図 7-2	地形解析の概念図	7-5
図 7-3	軌跡を用いた堤防高の抽出	7-6
図 7-4	縦断図による処理の概念図	7-7
図 7-5	対象地区	7-8
図 7-6	定期横断測量成と MMS 点群から把握した堤防高の比較	7-9
図 7-7	歩道区間における解析結果と MMS 点群による縦断図	7-11
図 7-8	特殊堤区間における解析結果と MMS 点群による縦断図	7-12
図 7-9	植生繁茂区間における堤防高縦断図	7-13
図 7-10	植生繁茂区間の現況写真	7-13
図 7-11	植生繁茂区間における MMS 点群の横断図	7-13
図 7-12	非舗装堤防における堤防高縦断図	7-14
図 7-13	非舗装堤防の現況写真	7-14
図 7-14	誤抽出した倉庫付近の現況写真	7-15
図 7-15	誤抽出したアンダーパス付近の現況写真	7-15
図 8-1	MMS を用いた河川堤防モニタリングの処理の流れ	8-4
図 8-2	広域モニタリングの流れ	8-5
図 8-3	集計結果例	8-7
図 8-4	詳細モニタリングとデータベース化の流れ	8-8
図 8-5	MMS のカメラ画像と検出区間の表示例	8-10
図 8-6	MMS 点群の多視点表示例	8-10
図 8-7	MMS 点群と評価結果の重ね合わせ表示例	8-10

表 2-1	主要破堤災害の原因別分類（過去 30 年間）	2-5
表 2-2	プラットフォーム，センサ別取得情報	2-12
表 2-3	ALB 成果と横断測量成果の比較結果	2-18
表 2-4	堤防センサの設置状況 [末次忠司, 2010]	2-22
表 3-1	軌跡解析におけるデータ品質評価・重複率・安定度評価結果	3-15
表 3-2	相対評価結果	3-19
表 3-3	絶対評価結果	3-22
表 3-4	クロスセンサ評価結果	3-23
表 3-5	点群の位置精度評価のまとめ	3-26
表 4-1	搭載センサの仕様	4-4
表 4-2	軌跡解析におけるデータ品質評価	4-9
表 4-3	相対評価結果	4-10
表 4-4	フレーム型 MMS の検証点較差	4-14
表 4-5	昇降型 MMS の検証点較差	4-14
表 4-6	精度検証の結果	4-16
表 4-7	レーザスキャナのカタログ仕様	4-17
表 5-1	MMS 計測諸元	5-5
表 5-2	RTK-GNSS 測量と水準測量の比較	5-7
表 5-3	GNSS 測量と水準測量の比較	5-7
表 5-4	MMS 点群と検証点の位置較差	5-12
表 5-5	GPS+GLONAS と GPS 単独による測位 を用いて生成した点群の位置精度	5-16
表 5-6	円山川 MMS 点群位置精度検証結果	5-20
表 5-7	吉井川 2016 年 1 月 MMS 点群位置精度検証結果	5-21
表 5-8	吉井川 2016 年 12 月 MMS 点群位置精度検証結果	5-22
表 6-1	課題の抽出と解決策	6-3
表 6-2	MMS 点群と下げ振りの傾倒較差	6-15
表 7-1	定期縦横断成果と MMS 点群から把握した堤防高の比較	7-10
表 9-1	河川の状態把握における従来の計測手法	9-5
表 9-2	実用化されているレーザ計測	9-6
表 9-3	河川の状態把握におけるセンシング技術の使い分け	9-7

1. 序論

1.1. 研究の背景と目的

本論文は、被害が大きくなる越流による水害を軽減するために、河川堤防の沈下・変形状況や堤防高の状態を漏れなく把握する手法を構築し、効率的かつ確実性の高い河川堤防モニタリング手法を提案するものである。

日本では、梅雨前線、台風、低気圧などにより降雨がもたらされ、降雨状況により洪水が発生する。洪水流を安全に流下させ、洪水の氾濫を防ぐインフラ構造物が河川堤防である。河川堤防の破堤を引き起こす水害は、被害規模が大きくなり、死者・行方不明者の被害や家屋、ライフライン、地下施設に甚大な被害をもたらす。こうした被害規模が大きくなる水害は、ほとんどが越流によるものである [末次忠司, 2010]。1960年代以降は、河川堤防の整備が進み、破堤に伴う災害の数は減少した。しかし、河川堤防の整備率が向上した近年でも、越流により破堤に至る災害が報告されている。たとえば、平成16年7月の新潟豪雨では、過去の最大日雨量を大きく上回る雨量を記録し、7河川11箇所破堤が発生した [7. 1.3 新潟豪雨洪水災害調査委員会, 2015]。平成16年台風23号による円山川の破堤では、沈下・変形で周辺より低い約30mの区間から越流が発生し、破堤した [国土交通省, 2005]。平成27年9月の関東・東北豪雨による鬼怒川の破堤では、周辺の堤防より低い約200mの区間が決壊し、その浸水範囲が常総市の約1/3に当たる約40km²まで及んだ [国土交通省, 2016], [常田賢一, 2015]。これらの越流による水害は、大きな被害をもたらす結果となった。

こうした周辺の堤防より低い区間や沈下・変形といった越流の恐れがある区間を把握するために、現在の河川の維持管理では、200m間隔を基本とした縦横断測量と、目視による堤防等河川管理施設の点検（堤防点検）が行われている。しかし、縦横断測量のような代表断面による管理は、測線間の堤防高やその状態が把握されておらず、また目視による堤防点検は、広く連続的につながった低い箇所や変状を捉えられない。そのため、越流の危険がある堤防区間を漏れなく把握することが難しい。

近年、集中豪雨や大雨の発生頻度が増加傾向を示し、計画規模を上回る洪水が毎年のように発生している [環境省, 2013]。また、高度成長期以降に集中的に整備した河川堤防や樋門といった河川管理施設の老朽化が進み、平成38年に設置後40年経過する堤防は、全体の約6割となる [国土交通省, 2015]。さらに、少子高齢化による人手不足が懸念される今後は、限られた人材で河川堤防の状態を漏れることなく連続的に把握し、治水に必要な河川堤防を維持管理することが求められる。

連続的な地形を捉えられる計測方法として、航空機や車両を利用したレーザ計測がある。航空機によるレーザ計測は、流域全体といった広い範囲の地形を数十cmから数m間隔の標高データが取得できる。また、車両を用いたレーザ計測はモバイルマッピングシステム (Mobile Mapping System: MMS) と呼ばれ、堤防天端を走行しながら数十cmから数mの

詳細な間隔で堤防形状を連続（面）的に計測できる。こうした面的な形状が把握できるレーザ計測技術を活かすことで、漏れのない確実な河川堤防の状況把握に寄与できると考える。そこで本研究では、河川堤防周辺の形状を効率的かつ高精細に取得できる MMS を利用し、沈下・変形状況や堤防高の状態を把握する解析手法を構築し、効率的かつ確実性の高い河川堤防モニタリング手法と河川管理システムを構築することを目標とした。この目標達成に向けて、次の研究課題を設定する。

研究課題 1 MMS 取得データの面的な位置精度把握

堤防の高さや形状をもれなく連続的に把握する手法を検討する。そのために面（連続）的な計測ができる MMS を用いて、取得データ (MMS 点群) 全体の位置精度を把握する。

研究課題 2 河川堤防における MMS 計測手法の検討

数十 km 以上におよぶ帯状に長い河川堤防の堤防状況や堤防高が把握できる位置精度を確保した MMS 点群を取得するための MMS 計測手法を確立する。

研究課題 3 河川堤防の変形・沈下把握の検討

堤防越流の可能性が高いと考えられる堤防沈下・変形区間や河川構造物周辺の沈下・変形状態を漏れることなく把握し、その状態を視覚的にわかりやすく可視化する手法を確立する。

研究課題 4 河川堤防高の把握の検討

河川堤防の管理で必要となる堤防高の状態を迅速かつ効率的に把握するために、MMS 点群から自動処理により堤防高を把握する手法を確立する。

研究課題 5 MMS を用いた河川堤防モニタリングの検討

検討した沈下・変形状況や堤防高の把握手法を用いて、河川堤防モニタリング手法を確立する。

以上の検討により、効率的かつ確実性の高い河川堤防モニタリング手法の確立を目指す。本研究の目標が達成されると、堤防高が計画高水位や計画堤防高より低い箇所、周辺より堤防高が低い箇所、沈下・変形の恐れがある箇所、および堤防横断構造物周辺で変状が発生している箇所を漏れなく、視覚的に分かりやすく把握できる。また、河川堤防だけではなく河川全体のモニタリングを実現するために、MMS と航空機等を用いたレーザ計測技術の使い分けを整理し、河川全体を効率的かつ効果的にモニタリングできる手法も提案する。

これらの研究成果は、河川堤防に関わる専門的な知識が高くなくても、確実性の高い河川堤防モニタリングが実現できると考えられる。限られた人材で効率的で効果的な堤防の維持管理に寄与でき、さらに、河川の水害に関わる被害を軽減させ、住民の生命と資産を守ることにつなげられると期待される。

1.2. 独自性

本研究の独自性を以下に示す。

独自性1 点群全体の位置精度評価手法の提案

MMS 点群全体の位置精度を評価する手法を提案した。日本では、車両や航空機を利用したレーザ計測において、取得される点群の位置精度を担保する方法が公共測量作業規程に定義されている。その方法は、1) Global Navigation Satellite Systems(GNSS)・慣性計測装置 (Inertial Measurement Unit : IMU) の観測状況評価、2) コースごとに生成された点群の重複区間で検証地区をランダムサンプリングし、コース間における高さ方向の較差確認、3) 対象地区内で地上測量による基準点をランダムサンプリングし、基準点と周辺の点群との高さ方向の較差確認の手順に従うものとされている。この手法は、ランダムサンプリングに基づく精度管理であり、点群全体の位置精度を評価していない。そのため、点群全体の位置精度評価手法を提案した。これにより、MMS 点群が、連続的な堤防状態の把握に適用可能なことを定量的に評価した。

独自性2 実際に発生した沈下・変形状態の把握

河川堤防は、数十 km 以上におよぶ帯状に長い構造物であり、その形状は時間の経過とともに変形する。こうした河川堤防の変形を、MMS 点群を用いて実際に捉えた事例は少ない。そこで本章では、実際に堤防の変形や沈下が発生している河川堤防において、MMS を用いて複数年にわたる計測を行い、MMS 点群の位置精度を評価するとともに、変形・沈下状態の把握を実際に捉えることを試みた。

独自性3 3次元データを用いた河川の維持管理に関わる情報の自動抽出

近年、レーザ計測や写真測量技術の進展により、連続（面）的な3次元データが容易に取得できるようになった。こうした3次元データから維持管理に必要な情報を抽出する研究が多く行われている。しかし、河川堤防の維持管理に必要な堤防高や変形・沈下状態といった情報を抽出する手法は確立されていない。そこで、MMS 点群から、河川堤防の維持管理に必要な情報を抽出する新たな手法を提案する。この手法は、河川堤防の形状特性とMMS の計測特性を考慮した手法である。

独自性4 面的な三次元データを用いた連続的な河川堤防状態の把握

現在、河川堤防の維持管理では、基礎情報に、200m 間隔を基本とした代表断面を用いている。しかし、過去の災害で30m の短い区間で破堤した事例がある。そのため、代表断面による管理は、短い区間で越流発生の可能性がある箇所を把握ができない恐れがある。本研究では、代表断面による管理ではなく、連続的な河川堤防状態を把握できる管理手法を提案する。MMS 点群から、河川堤防高や変形・沈下状態を面的に把握するものである。

2. 河川堤防の状況把握における MMS の必要性

2.1. はじめに

近年、集中豪雨や大雨の発生頻度が増加傾向を示し、計画規模を上回る洪水が毎年のように発生している。こうした洪水の氾濫を防ぐための治水構造物が河川堤防であり、その役割は益々重要になっている。洪水の災害リスクが高まっている現在での河川の維持管理では、堤防高の変化を漏れることなく把握し、治水に必要な堤防高の維持や、洪水時に土のうの嵩上げなどによる的確な対策を講じることが求められる。こうした河川の維持管理や対策を検討するために、河川堤防の形状を把握する必要がある。連続的な堤防形状を捉えられる計測方法の一つに、車両を利用したレーザ計測がある。車両を用いたレーザ計測である MMS と呼ばれ、数cmの計測間隔で走行周辺の形状を取得できる。こうした MMS のレーザ計測技術を活かすことで、越流が発生する恐れがある堤防区間の把握に寄与できると考えられる。

そこで本研究では、MMS を利用して越流が発生する恐れがある区間を漏れなく把握する手法を確立する。そのための導入部分として、2.2 節で、河川堤防の構造特性と過去の災害要因を整理し、現在の河川管理における課題を整理する。2.3 節では、河川堤防の維持管理で利用されているセンシング技術と MMS に関する既往研究を整理する。そして、2.4 節では、堤防高や河川堤防の状態把握に MMS を適用するうえでの研究課題をとりまとめ、その課題に対する本研究のアプローチを述べる。

2.2. 河川堤防の現状

本節では、河川堤防の成り立ちと構造特性、河川堤防に関わる過去の災害を整理し、現在の河川管理における課題を明確にする。

2.2.1. 河川堤防の成り立ちとその構造

本項では、河川堤防の成り立ちと構造特性を整理する。

(1) 河川堤防の成り立ち

河川堤防は、人家のある地域に河川の水が氾濫しないように、河川沿いに土砂を盛り上げ治水構造物である。大河川の氾濫原が新田として利用されるようになった江戸時代以降は、大きな河川の流路の固定と堤防の整備が行われ、主要な氾濫平野が河川堤防により守られるようになった。明治時代以降は、その延長沿いに、都市化や工業化が進展し、氾濫原に人口と資産が立地してきた。現在では、人口の約50%、資産の約75%が河川堤防により守られた氾濫原に位置している【吉川勝秀, 2011】。

日本の河川堤防は、もともと氾濫原に形成された自然堤防の上に盛土したものが多い。大規模な災害を経験することで、それまでの堤防の設計基準や改修計画が見直され、順次引堤、嵩上げ、拡幅等が実施されてきた歴史がある(図2-1)。また、我が国の都市や市街地の多くは、河川によって形成された沖積平野に立地している。都市や市街地を守る河川堤防が旧河道、後背湿地、段丘面などが分布する不均質な地盤の上に築造されている地域が点在する。そのため、河川堤防の内部やその周辺の地質状態は、十分に把握できていないことが多い。

河川堤防は、堤防内部の土質構成、土質分布、地盤の地質条件が明確ではない、曖昧さが残る構造物であるという特徴がある【公益財団法人 土木学会, 2008】。

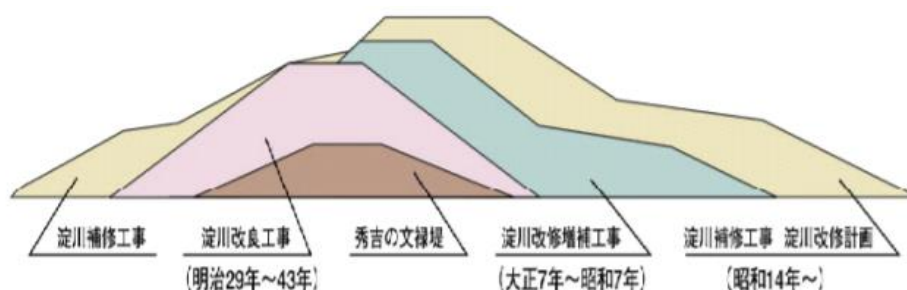


図 2-1 補強や嵩上げがされる形で築造された河川堤防
 [国土交通省 水管理・国土保全局, 2012]

(2) 河川堤防の構造

河川堤防の構造は、図 2-2 に示す土堤を原則としている。その理由は、工事費用が比較的低廉であること、材料取得の容易さ、修復の容易さ、嵩上げや拡幅など改堤の容易さが挙げられる。河口域や堤防用地を確保できない区間では、図 2-3 に示す全部もしくは主要な部分がコンクリートや鋼矢板やコンクリート製のパラペット構造が取り付けられている特殊堤が整備されている。こうした特殊堤の高さや天端幅は、河川管理施設等構造令で規定されており、小さいもので、数十cm程度の天端幅の形状を持つ [財団法人 日本河川協会, 2014]。また、河川堤防の構造に関する特徴として、土堤では、不同沈下による形状の変形や沈下が起きやすいことが指摘されている。



図 2-2 土堤 (兵庫県加古川)



図 2-3 特殊堤 (岡山県吉井川)

2.2.2. 河川堤防の災害

本項では、河川堤防に関わる過去の災害要因を整理する。

(1) 河川堤防の主な災害要因

近年、図 2-4 のように集中豪雨や大雨の発生頻度が増加傾向を示し [環境省, 2013], 計画規模を上回る洪水が毎年のように発生している [服部泰士, 2016]. こうした洪水の氾濫を防ぐための治水構造物が河川堤防であり, その役割は益々重要になっている. 河川堤防で被害の規模が大きくなる災害は, 堤防が決壊する破堤である. 破堤の主な原因は, 以下の4つが挙げられる [吉川勝秀, 2008], [福成孝三, 2007], [末次忠司, 2010].

- ・ 堤防の上を洪水が超えることで生じる堤防越流による破堤
- ・ 洪水流による浸食で生じる洗堀による破堤
- ・ 降雨や洪水により生じる浸透・漏水による破堤
- ・ 樋管や水門など堤防横断構造物のまわりの浸透や漏水による破堤

土木研究所が昭和40年代に行った破堤の全国調査結果がある [須賀堯三, 1984]. この調査結果では, 昭和22年から44年までの破堤原因として, 越流, のりすべり, 漏水, 洗堀, その他に分類し, その発生箇所数が, 越流 231 箇所 (82%), 洗堀 32 箇所 (11%) 漏水・のり面崩壊 15 箇所 (5%) その他 5 箇所 (2%) であることを示した. [吉川勝秀, 2008], [福成孝三, 2007]. 表 2-1 は, 過去30年間で発生した主要な破堤原因を原因別に分類したものである [末次忠司, 2010]. この表から, 破堤は単一の原因だけでなく, 越流と浸透が原因になった事例があり, また, 河川堤防の災害要因の大半は, 越流に関わることが確認できる.

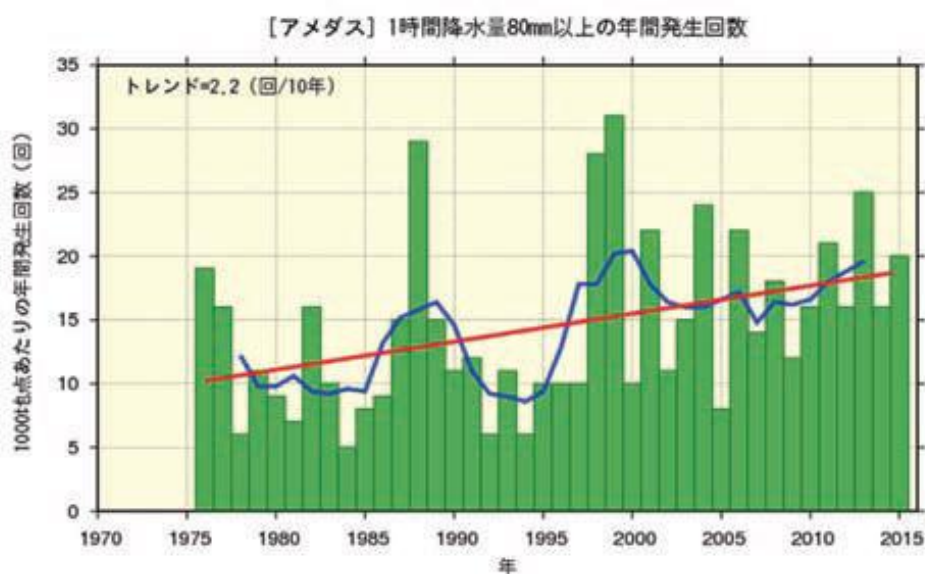


図 2-4 時間降雨量 80 mm以上の年間発生回数 [環境省, 2013]

表 2-1 主要破堤災害の原因別分類（過去30年間） [末次忠司, 2010]

原因1	越水	浸透	侵食
原因2			
—	石狩川 千曲川 吉田川（鳴瀬川） 足羽川（九頭竜川） 刈谷田川（信濃川）	—	多摩川 関川 荒川（阿武隈川）
浸透	新川（庄内川） 円山川	長良川 漁川（石狩川） 小貝川（利根川）	—

* 1) () 内は水系名である。

* 2) 太字の河川は複合原因による破堤事例である。

以降では、河川堤防の主な災害要因である越流による破堤について、詳しく整理する。

(2) 越流による破堤

大型台風や昭和35年の伊勢湾台風の被害を受け、昭和39年に新しい河川法が制定された。これにより、高度経済成長期に河川堤防やダムなどの治水施設の整備が進み、昭和20年代に比べ30年代、40年代で破堤数が減少したとの報告がある [須賀堯三, 1984] , [吉川勝秀, 2008]。しかし、河川堤防の整備率が向上した最近でも、越流の破堤による甚大な災害が報告されている。以降では、最近の越流による災害事例として、平成27年9月の関東・東北豪雨による鬼怒川の破堤、平成16年新潟豪雨災害による五十嵐川と刈谷田川の破堤、および平成16年台風23号による円山川の破堤の状況と主な要因について示す。

1) 平成27年9月の関東・東北豪雨による鬼怒川の破堤

平成27年9月の台風17号などにより、関東から東北南部で豪雨が発生し、破堤災害が発生した。図2-5に破堤した付近の航空写真を示す。破堤箇所付近では、図2-6に示すように0.2mから0.3m程度の越流が発生し、その後、破堤した。破堤付近は、約500m区間の堤防高が、計画堤防高と比較しておしなべて低い状態であったことや、破堤箇所の近傍にある水海道水位観測所で、5時間計画高水位を超過していたことが報告されている [国土交通省, 2016]。0.1m程度の堤防高の違いが越流水深や越流時間に大きな影響を及ぼすこと、さらに、土のうにより0.2m程度の嵩上げができれば、破堤に至らなかった可能性も報告されている [常田賢一, 2015]。



図 2-5 平成 27 年 9 月の関東・東北降雨による鬼怒川の破堤



図 2-6 鬼怒川 決壊区間上流側からの写真 [国土交通省, 2016]

2) 平成 16 年新潟豪雨災害による五十嵐川と刈谷田川の破堤

平成 16 年 7 月に新潟豪雨が発生し、破堤災害が発生した。気象庁の栃尾観測所では、過去の最大日雨量の 342 mm を大きく上回る 421 mm の雨量を記録した。この豪雨により現況の流下能力を超える流量の洪水が流れ、7 河川 11 箇所破堤が発生した。新潟県の報告書によると、越流水深が最大で 0.5m、越流時間が 1 時間を超えたところが主に破堤したことが確認された。また、こうした破堤箇所周辺の堤防高は、約 50m の区間で周辺の上流や下流区間に比べ、少し堤防高が低くなっていたことが報告されている [7. 13 新潟豪雨洪水災害調査委員会, 2015]。

3) 平成 16 年台風 23 号による円山川の破堤

兵庫県北部の豊岡盆地は、近畿地方でも有数な軟弱な沖積地盤が形成されている。その軟弱な地盤は、地上から泥層、砂層、泥層、砂泥層、および砂礫層の互層で形成され、特に 40m 程度の厚みがある中部泥層で圧密沈下の恐れが土質試験から明らかにされている [坪田邦治, 2007]。地上部では長期にわたり年数 cm 程度の沈下の発生が報告され、軟弱地盤地に築堤された円山川の河川堤防でも、年数 cm 程度も沈下した事例が報告されている。平成 16 年の台風 23 号に伴う豪雨により、2 日間で 278 mm の降雨を記録した。この降雨量は、おおむね 40 年に一度の確率で発生する降雨量に相当する。この豪雨では、周辺より堤防高が

低い約30mの区間から越流が発生し、破堤した(図2-7)。この破堤区間は、旧河道の上に築堤された区間であり、軟弱地盤地による沈下により周辺より5cmから数十cm低くなっていたことが確認されている [国土交通省, 2005]。



図 2-7 平成16年台風23号による円山川の破堤状況 [国土交通省, 2005]

(3) 河川堤防とその維持管理の現状

国土交通省では、樋管や水門など堤防横断構造物のまわりの浸透や漏水による破堤の危険性を指摘している。これは、図 2-8 に示すように堤防内に建設された樋門周辺で、樋門の浮き上がりにより、樋門下に空洞が生じやすく、空洞からの土砂吸出しにより、更に空洞化が進行して、浸透流を発生するものである。特に昭和 48 年から昭和 59 年に建設された樋門の基礎には長尺支持杭が多く用いられており、樋門下の空洞化が生じやすい。そのため、平成 10 年に河川砂防技術基準・同解説の中で「杭基礎以外の構造とする」という基準の改訂が行われた [国土技術研究センター, 2002], [末次忠司, 2010]。

さらに、国土交通省では、河川施設の戦略的な維持管理の必要性を示している。高度成長期以降に集中的に整備した河川堤防や樋門といった河川管理施設の老朽化が進展しており、平成 38 年に設置後 40 年経過する施設は、全体の約 6 割に増加する (図 2-9)。更に厳しい財政状況、や少子高齢化による人手不足が懸念される状況で、今後は、限られた人材で確実な堤防の維持管理が求められる。近年の集中豪雨や大雨の発生頻度が増加傾向に伴う水害の多発化を踏まえた、確実な安全の確保が求められる [国土交通省, 2015]。

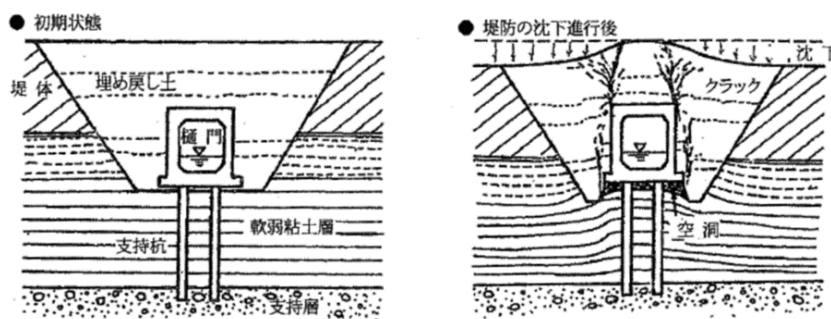


図 2-8 杭で支持された河川横断構造物に生じる変形と空洞の概念図 [末次忠司, 2010]

■ 高度成長期以降に集中的に整備した河川管理施設の老朽化が進展

- ① 現在、設置後40年経過した施設 : 全体の約4割
- ② 10年後に設置後40年経過する施設 : 全体の約6割に増加
- ③ 20年後に設置後40年経過する施設 : 全体の約8割に増加

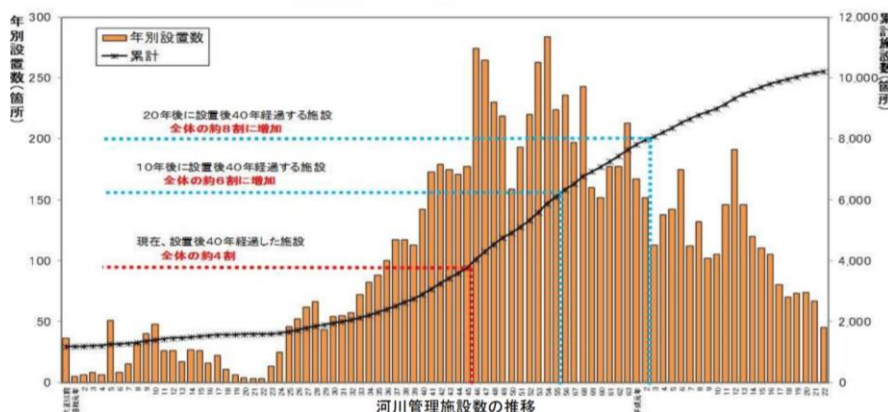


図 2-9 河川管理施設の推移 [国土交通省, 2015]

2.2.3. 河川堤防の安全性

本項では、河川堤防の安全性を評価するうえで、確認すべき要素を整理する。

河川法の政令である「河川管理施設等構造令」によると、河川堤防の構造は、図 2-10 のように、①計画高水位、②堤防余裕高、③堤防天端（堤防の頂部分）幅、④のり勾配（堤防斜面の勾配）で示すことができる【財団法人 国土技術研究センター、2000】。計画高水位とは、その河川で治水上想定している洪水量が河川改修後の河道断面（計画断面）を流下するときの水位を示す。また、堤防余裕高とは、一時的な水位の上昇による越流を防ぐよう計画高水位に加えられる堤防の高さをいう【吉川勝秀、2011】。前節までの河川堤防の災害事例の整理から、破堤の原因は、圧倒的に越流によるものが多く、また洪水時の水位が堤防高より高くなったことによるものが多いことが確認された。そのため、河川堤防の安全性は、洪水位、堤防設計時の計画高水位、および堤防天端高さ（堤防高）が支配的な要因となり、それに堤防横断構造物と堤防とのなじみ具合が関係する。図 2-11 はこれらの高さ情報を縦断面図として表示したものである。堤防高が計画高水位を確保できていない区間、周辺より低い堤防高区間、沈下や変形の発生区間および、河川構造物周辺での変形発生区間を漏れなく把握することが重要となる。

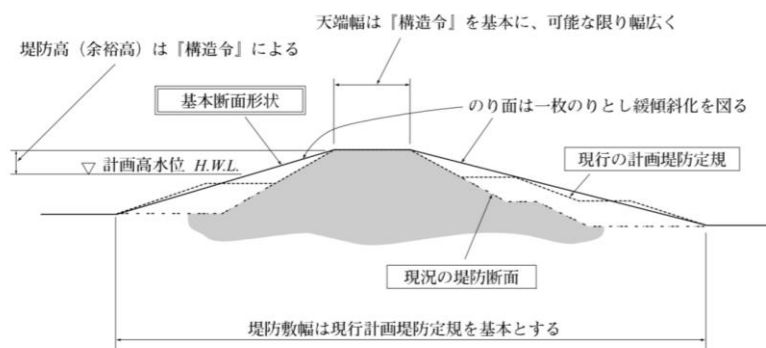


図 2-10 河川堤防の基本的な断面形状 【吉川勝秀、2008】

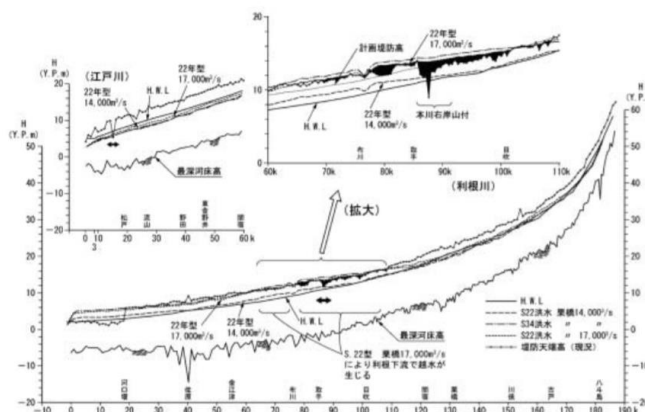


図 2-11 洪水規模が大きくなった場合に堤防越流が生じる場所の推定 (1982年当時の河道と堤防での推定) 【吉川勝秀、2011】

2.2.4. 河川堤防における状態把握の現状と課題

前項までに、河川堤防の構造特性、過去の主な災害要因、および河川堤防の維持管理で確認すべき要素を整理した。これらの整理結果を踏まえ、本項では、現在の維持管理における課題を整理する。

河川堤防の構造は、土堤を基本とし、河口域や堤防用地が確保できない区間などで、コンクリート製のパラペット構造を有する特殊堤が取り付けられている。河川の維持管理では、こうした堤防での洪水の越流を防ぐことのできる高さ（堤防高）や堤防の沈下・変形状態を把握する。この堤防高は、堤防天端の最も高い部分である。特殊堤区間では、パラペット構造の天端の高さ、マウントアップされた歩道が天端に整備された堤防では歩道の高さが堤防高となる。

こうした堤防高や変形・沈下の状態を把握するために、現在の維持管理では、5年に一度の縦横断測量と、年数回の堤防等河川管理施設の点検（堤防点検）が一般的に行われている〔国土交通省国土地理院, 2016〕, 〔国土交通省水管理 国土保全局 河川環境課, 2016〕。縦横断測量は、200m といった一定間隔ごとに配置された河川距離標を対象に、左右岸の河川距離標の視通線上の横断形状を取得したものが一般的に行われる。堤防天端の高さと横断形状をトータルステーション測量や水準測量を用いて計測する場合が多い(図 2-12)。堤防点検は、河道形状や状態を監視し、流下能力および堤防施設の機能への影響が懸念される変状の発生あるいは変化を把握するために行う目視を中心とした点検が行われている。堤防や樋門などの河川構造物を対象に、陥没・不陸といった局所的な変形や沈下の有無を目視で確認し、その長さや深さを、巻尺などを使って計測している(図 2-13)。

前項までの過去災害要因の確認と考察から、洪水の災害リスクが高まっている河川では、0.1m 程度の堤防高の変化を漏れることなく把握し、治水に必要な堤防高の維持や洪水時に土のうの嵩上げなどによる的確な対策を講じることが求められることが確認された。また、軟弱地盤地で破堤した区間やその周辺の河川構造物付近では、0.05m から数十cmの沈下や変状が堤防点検により把握されたことから、0.05m 程度の高さ変化を伴う変形・沈下状況を漏れなく把握することが必要である。しかしながら、縦横断測量のような代表断面による管理は、測線間の堤防高が把握されておらず、また巻尺を使った堤防点検は、広く連続的につながった 0.05m 程度の低い箇所や変形・沈下を捉えることが難しい。そのため、漏れなく確実な堤防の維持管理には、以下を把握する技術の確立が必要であると考えられる。

- 堤防沈下や変形区間や堤防と河川構造物周辺の老朽化状態を、漏れることなく把握する技術。
- 堤防高を、漏れなく確実に把握するための技術



図 2-12 縦横断測量の現地計測風景



図 2-13 堤防点検の現地観測風景

2.3. 河川堤防の維持管理で利用されているセンシング技術とMMSに関する既往研究

河川堤防の空間情報を把握するために、センシング技術を利用した取り組みが行われている。空間情報とは、地形を主とする地表面の位置、地形や堤防などの形状、およびその状態を示す情報であり、センシング技術とは、これらの情報を取得するためのプラットフォーム、センサを組み合わせた計測技術である。本節では、それらの取り組み内容を確認し、MMSを河川堤防の状況把握に適応する場合に想定される課題を整理する。

2.3.1. 一般的に利用されているセンシング技術

河川の空間情報取得に、一般的に実用化されているセンシング技術を整理する。

(1) プラットフォームと取得される空間情報のスケール

空間情報の取得は、取得したい範囲やデータ解像度（空間分解能）に応じて、プラットフォームやセンサを選択している。現在、多くの場面で実用されているプラットフォームは、人工衛星、航空機、車両などがある。各プラットフォームとその適用範囲（面積）・距離、空間分解能の関係は概ね図 2-14 のようにまとめられる。一般に空間分解能は、プラットフォームと対象物の距離に比例するケースが多い。このような状況を踏まえ、対象とする範囲と、必要とされる空間情報の空間分解能、さらにコストを踏まえ、プラットフォームやセンサが選択されている。

これまで、河川の流域（面積：数百～千数百 km^2 、延長：数十～数百 km ）を対象とした空間情報の取得に、プラットフォームに人工衛星や航空機を、河川の断面形状の空間情報を取得は、縦横断測量のよう地上測量を用いることが主流であった。現在では、航空機

と地上測量の境界領域のセンシング技術として、MMSが位置づけされている。

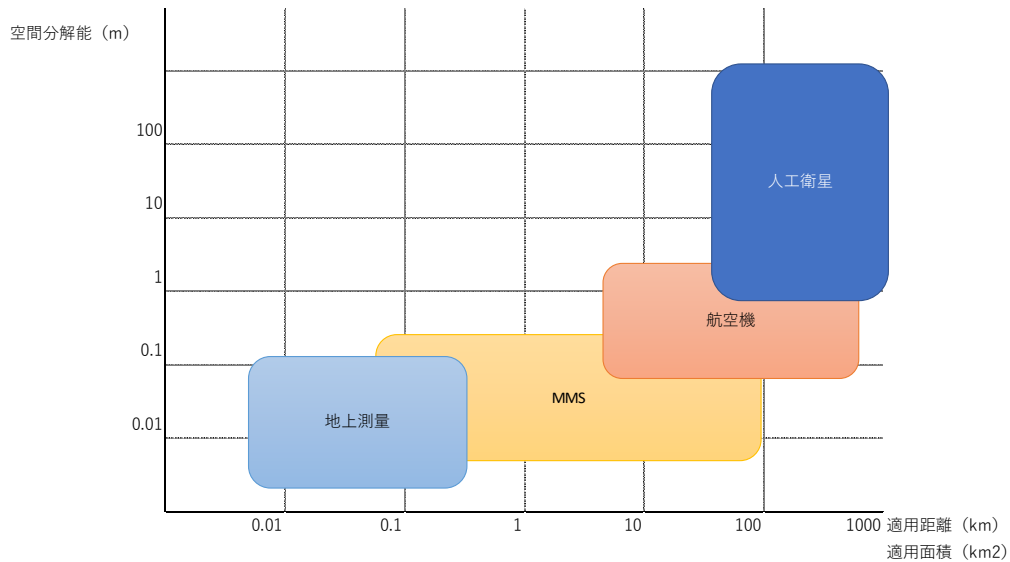


図 2-14 計測プラットフォーム別空間解像度と適用面積等の関係

(2) プラットフォームで主に利用されるセンサと目的

河川の維持管理では、その目的に応じて、プラットフォームと搭載されるセンサを組み合わせ利用されている。一般的に搭載される主なセンサは、光学センサ、合成開口レーダ (Synthetic Aperture Radar : SAR)、レーザスキャナなどがある。プラットフォームと搭載されるセンサの組み合わせと及び取得される情報は、表 2-2 のように整理できる。

表 2-2 プラットフォーム，センサ別取得情報

プラットフォーム	主な搭載センサ	主な取得情報	主な適用範囲	用途例
人工衛星	光学センサ	RGB画像	流域全体	地形図作成，流域の状況把握
		近赤外線領域画像		植生状況の把握
	SAR	反射強度		植生・水領域の把握
		インターフェロメトリ		地形等変化状況の把握
航空機	光学センサ	RGB画像	流域全体 堤防・河道周辺	地形図作成，流域の状況把握
		近赤外線領域画像		植生状況の把握
	SAR	反射強度		植生・水領域の把握
		インターフェロメトリ		地形等変化状況の把握
レーザスキャナ	点群	地形形状の把握		
MMS	光学センサ	RGB画像	堤防・河道周辺	地形図作成，堤防周辺の状況把握
		近赤外線領域画像		植生・水領域の把握
	レーザスキャナ	点群		地形形状の把握

以降では、各センサの特徴を示す。

①光学センサ

光学センサとは、デジタルカメラなどである。取得される情報は、RGB 画像が主流であり、地図作製や地表・地被状況の判読・把握の用途に用いられている。また、赤外線波長領域の情報を取得できるもあり、RGB 画像と組み合わせることで、植生活性度といった植生状態を把握する情報として用いられている。光学センサは、概ね全てのプラットフォームで利用されている。求められる地上解像度や撮影範囲、計測タイミング等の目的・用途によりプラットフォームが選択される。

②合成開口レーダ (SAR)

SAR は、人工衛星や航空機に搭載し、マイクロ波と呼ばれる電磁波を照射し、地物からの反射波を取得し解析するものが一般的である。2 時期の情報をインターフェロメトリ処理（干渉 SAR）により位相差情報を得て、解析により地形変化情報を取得できる。近年、解像度の向上や画像解析技術の発達、センサ搭載衛星の増加により、夜間や曇天時に計測が困難な光学センサの代替・災害調査手法として注目を集めている。さらに解析を施すことで mm レベルの変位を検出することができるとの報告がある。しかし、SAR の地上解像度は、光学センサやレーザスキャナに比べると空間分解能が低い。一般的に利用されている人工衛星や航空機に搭載した SAR の地上解像度は、数 m 程度である。そのため、数 m や数十 cm 程度の大きさとなる河川堤防や特殊堤の形状を判読するには、十分な地上解像度を有していない。

③レーザスキャナ

レーザスキャナはレーザ光を用いた計測機器である。その取得データは、膨大な 3 次元計測点が集合した点群である。レーザスキャナを用いた計測では、対象物の大きさや再現したい分解能（計測点間隔）に応じて、地上据置型やプラットフォームを選択されている。そのプラットフォームの多くは、航空機、車両などがある。日本では、航空機搭載レーザスキャナを用いた計測を航空レーザ測量と呼び、標高データを作成することを目的とした測量が 1990 年代後半から実施されている。現在では、0.5m から 5m 間隔の標高データの取得が公共測量として実施されている。また、地上設置型レーザ計測の利用も 1990 年代後半から始まり、設置箇所周辺の 3 次元形状を把握する手法として利用されている。その計測範囲が、設置箇所から数 m から数百 m であり、計測点間隔が、数 cm から数 m オーダである。MMS によるレーザ計測は、公共測量で車両写真レーザ測量と呼ばれ、道路周辺の地図や道路を管理するための図面作成に、2000 年代後半から利用されている。その取得データの計測間隔は、数 cm から数十 cm 程度であり、航空レーザ測量の計測間隔より細かい。さらに、MMS のデータ取得範囲は、地上設置型レーザ計測に比べ広い。また、近年では、2010 年代に入り、計測機器の小型化や省電力化といった計測機器の進化により、背負子型

レーザ計測機や無人飛行機（Unmanned aerial vehicle, : UAV）搭載型のレーザ機器が登場している。

2.3.2. 河川の維持管理で利用されているセンシング技術

前項では、河川の維持管理で利用されているセンシング技術を整理した。本項では、河道や河川堤防周辺の形状や状況把握に絞り、センシング技術を利用した取り組みや既往研究を確認し、その課題を整理する。

(1) 航空レーザ計測を利用した河川の状況把握

1)国土交通省における航空レーザ測量を利用した河川状況の把握

国土交通省では、2007年に「航空レーザ測量による河道及流域の三次元電子地図作成指針（案）」を策定し、航空レーザ計測成果を用いて中小河川の治水安全度を評価した。航空レーザ測量によるデータ取得の概念を図2-15に示す。中小河川は、横断測量が行われていない区間が多いため、航空レーザ計測で得られる3次元データを基に、流域の地形形状と100m間隔で河道の横断形状を把握した(図2-16)。そして、全国各雨量観測地点の降雨強度式と合理式による確率規模別流量の計算、及び次元不等流計算といった簡便な解析手法を用いて、治水安全度を評価した。しかし、この評価では、2m間隔の3次元データを使用しており、天端幅3m程度といった天端幅の小さい堤防の形状を十分に再現できていないことが確認されている。

また、浸水想定区域図や洪水ハザードマップ作成の基礎資料として、航空レーザ計測成果は、多くの河川で利用されている。平成26年に規定された「浸水想定区域図作成マニュアル（改訂版）（国土交通省）」では、航空レーザ計測で整備された細密な標高データを用いることが明確に記述された。この細密な標高データは、氾濫原の詳細な地形の起伏状況が表現できるだけでなく、局所的な危険箇所や、避難に関わる地形情報をわかりやすく伝えることができる。航空機を用いることで、広い範囲を効率的に計測できる利点がある。一方で、帯状に長い河川堤防や蛇行した河川を対象とした場合、飛行コースを多く設定するため、コストが高くなる。

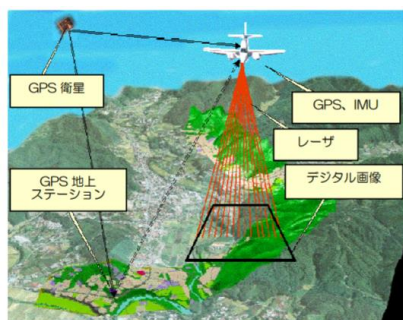


図 2-15 航空レーザ計測の概念

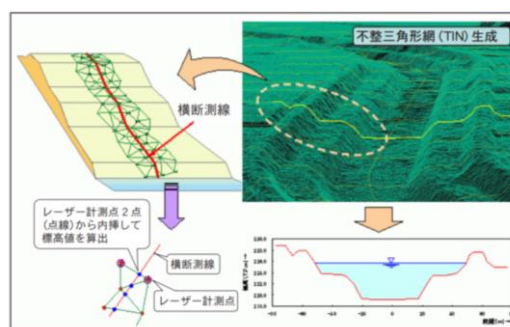


図 2-16 航空レーザ計測成果による横断図作成
[国土交通省河川局, 2007]

2)航空レーザ測深を利用した河川状況の把握

航空レーザ測量の多くは、近赤外線波長帯のレーザスキャナを利用している。この近赤外線波長域のレーザスキャナは、水に吸収されやすく河床や海底といった水底部の反射波を得られないことが多い。一方、2010年代に入り、水底の計測ができる航空レーザ測深(ALB: Airborne Laser Bathymetry)の実用化が始まった。ALBとは、従来の航空レーザ計測で用いられる近赤外線波長域のレーザスキャナと、緑色波長域のレーザスキャナの2つを用いて、陸部と水部の地形を計測するシステムである。図2-17にALBの計測概念を示す。緑色波長域のレーザ光は水の吸収が少なく、水底部の反射波を取得できる [Guenther, 1985]。近赤外線波長域のレーザ測距儀と緑色波長域のレーザ測距儀を用いることで、従来の航空レーザ計測では難しかった水底形状を計測できる。ただし、水深、濁度および水質の影響により水底部から反射波が得られない場合は欠測となる。

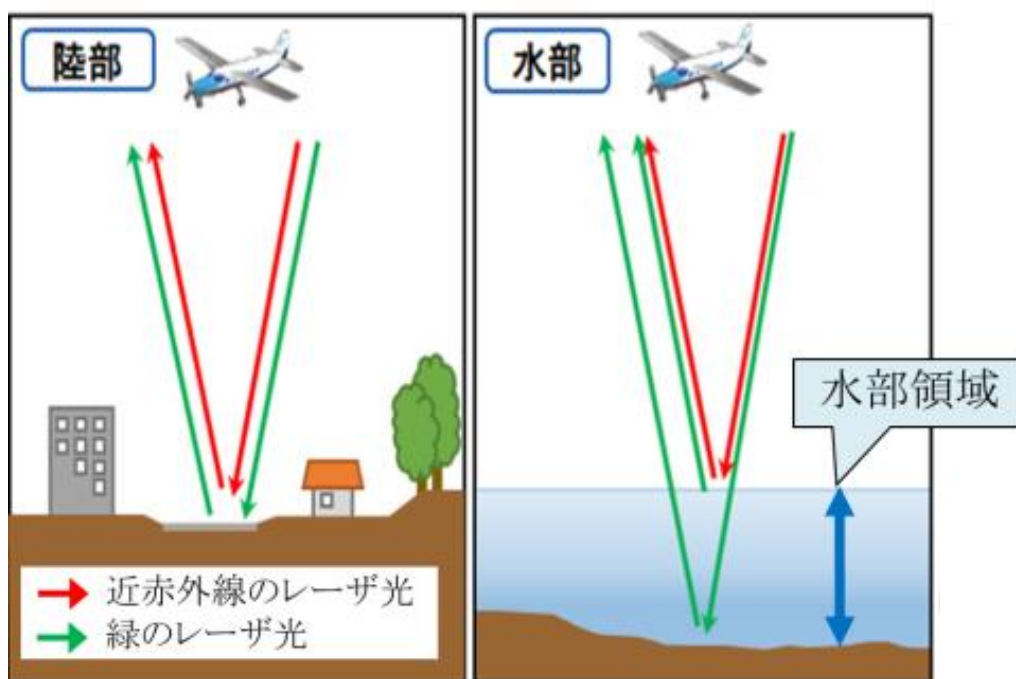


図 2-17 ALB 計測概念

ALB 技術を用いて岡山県旭川を計測した事例を、図 2-19 と図 2-18 に示す [間野耕司, 2017]。図 2-19 は、ALB で取得した点群 (ALB 点群) の平面図と横断面図である。この ALB 点群は、水部の緑波長域レーザの点群と、陸部の近赤外線波長域レーザの点群をそれぞれ抽出し、一つに統合したものである。断面図から、陸部と水部が連続的につながった地形が取得可能であることが確認できる。この地区では、最大水深約 4.6m までの測深が確認できた。図 2-18 の断面図は、樹木等の高さを含む表層形状(DSM: Digital Surface Model)だけではなく、地盤形状(DTM: Digital Terrain Model)や、植生の立体構造を表現できる 3次元データが取得されていることが確認できる。また、DSM から DTM を差し引くことで植生の高さを算

出できる。[吉田圭介, 2017]は、標尺と逆目盛検測竿を用いて取得した樹高とALB点群を比較し、数十cmの位置精度を確保した植生高を面的に把握できることが確認された。

図2-19は、ALB点群から地盤や河床の計測点を内挿補間した標高段彩図と航空写真である。航空写真では見えない水部の河床形状が標高段彩図で再現されている。また、図2-19拡大①で、堰の下流部に幅約30m、長さ約35m、深さ約2.5mの洗堀箇所を、図2-19拡大②で、河床波と推測される形状を確認できる。こうした陸部と河床が一体となった3次元データは、河川管理上把握すべき局所的な洗堀や河床波などの地形を、面的に漏れなく、わかりやすく可視化されるため、河川管理の高度化に寄与できると考えられる。

航空レーザ測量およびALBは、数十cm程度の計測点間隔となる点群を取得でき、河道に存在する河畔林や高水敷の形状が面的に把握できること、さらに、天端幅数m以上となる土堤形状を再現できることが、図2-19や図2-18から確認できる。

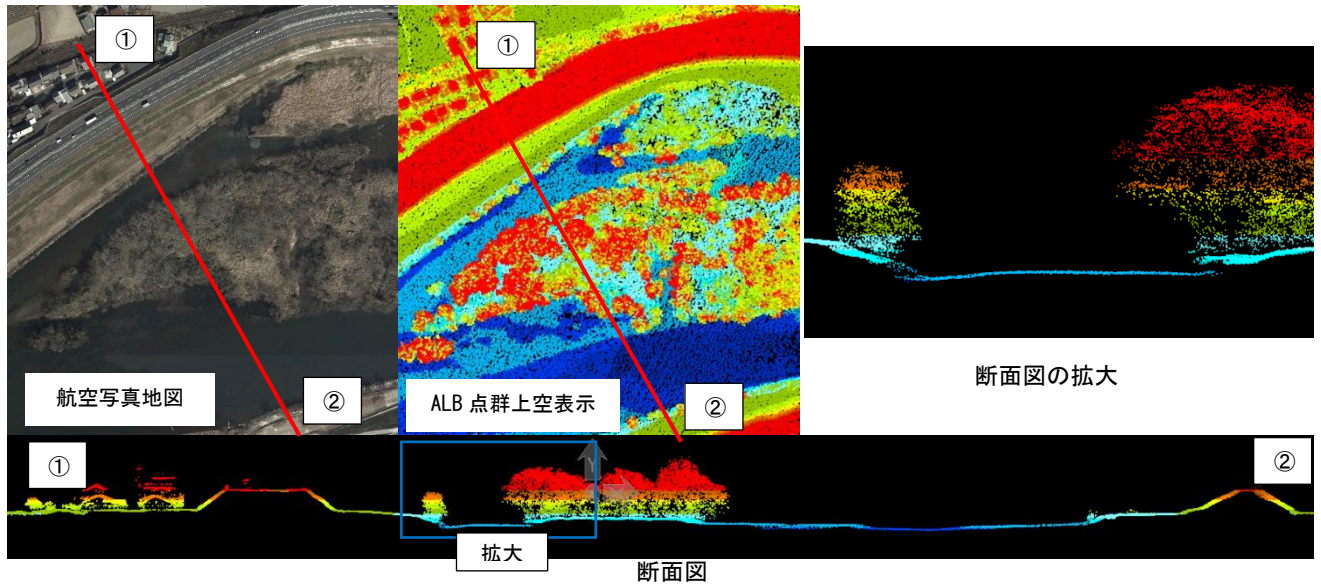


図 2-19 ALB 点群と航空写真地図の平面と断面表現

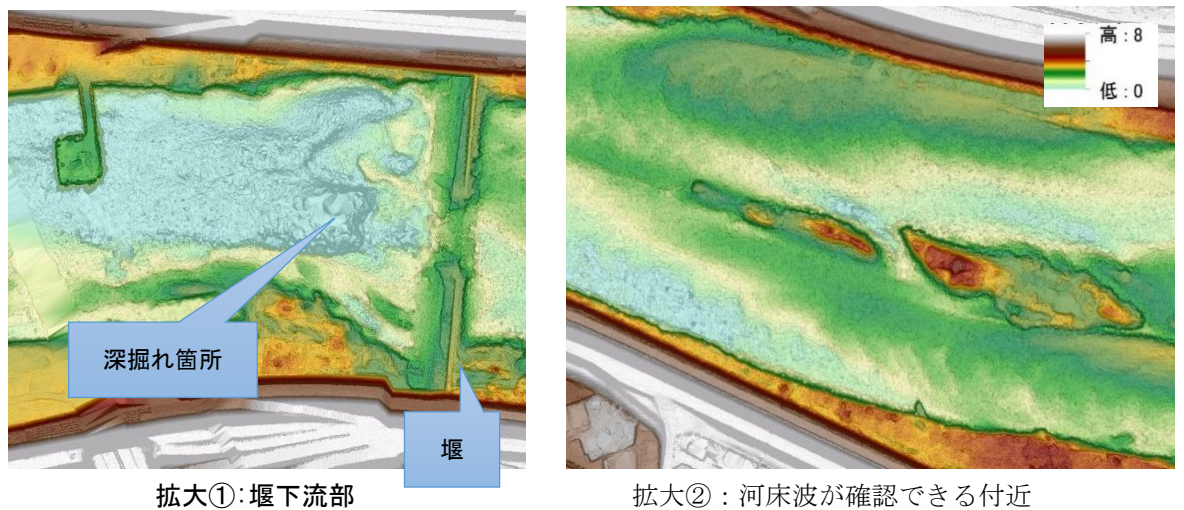
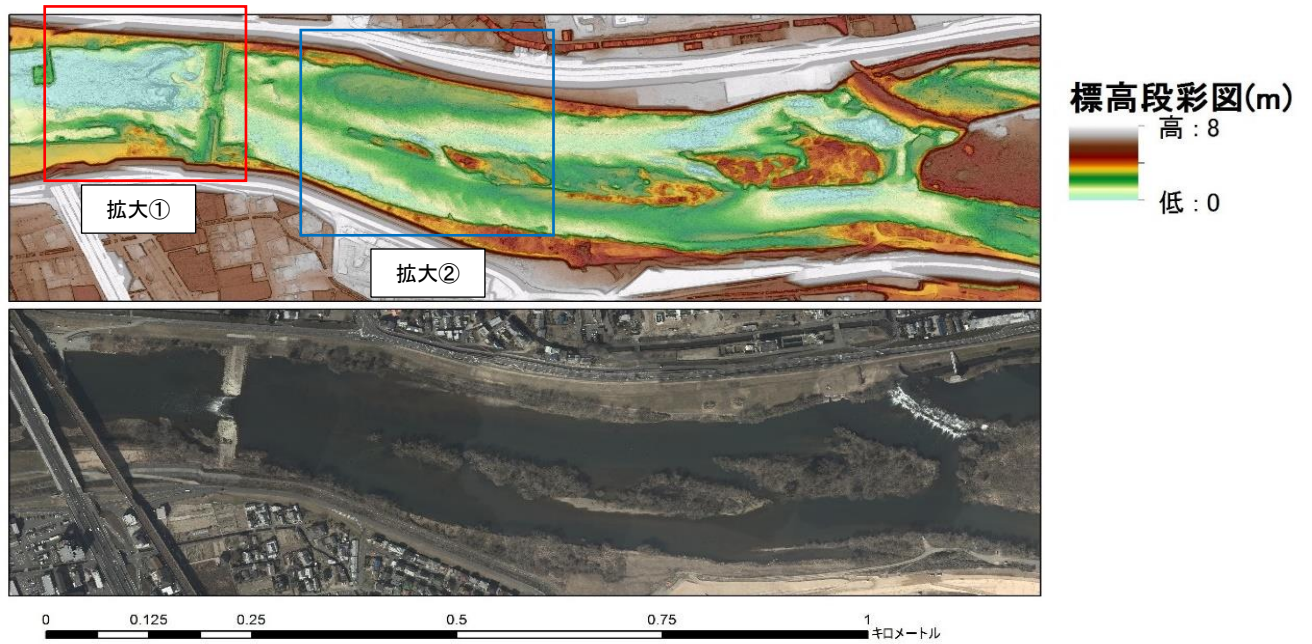


図 2-18 標高段彩図と航空写真地図

3)航空レーザ測量の位置精度

航空レーザ測量による河川堤防の再現精度を把握するため、航空レーザ測量と航空レーザ測深（ALB）の併用機器である Leica Geosystems 社の Chiroptera II を用いて、位置精度を検証した。計測間隔は、陸上部で約 0.5m、水部で約 1m である。陸部の計測間隔 0.5m は、公共測量で最も細かい計測点間隔となる。

本項の位置精度検証では、取得された点群と河川の維持管理で定期的に整備されている横断測量成果の位置座標を比較した。横断測量成果は、100m 又は 200m 間隔で配置された河川距離標を与点とし、左右岸の河川距離標の視通線上の横断形状を取得したものである。河川距離標の平面位置は RealTime Kinematic（RTK）-GNSS 観測法で、高さは水準測量により取得している。地盤や河床の横断形状の測量では、トータルステーション（TotalStation：TS）とロット又はシングルビーム音響測深機が測定に用いられている。その比較結果を表 2-3 に示す。この比較では、近赤外線波長帯のレーザスキャナから生成した点群を用いて道路・グラウンド地区、草本や樹林の植生被覆地区、砂礫河原地区の比較を行い、緑波長帯のレーザスキャナで取得された点群を用いて河床地区（水部）の比較を検証した。

表 2-3 の道路やグラウンドの地区は、基準を十分に満たす 10cm 以下の位置精度を有していることが確認できる。砂礫河原区間や河床区間では 10cm 以上の誤差を確認した。数 cm から十数 cm 程度の大きさの石が点在する。航空レーザ測量で示される位置精度は、地上被覆状態の影響を受けることがわかる。

表 2-3 ALB 成果と横断測量成果の比較結果

	航空レーザ測量			ALB
	道路やグラウンド区間	植生被覆区間	砂礫河原区間	河床区間
検証点数	50	121	22	120
平均誤差(m)	-0.045	-0.019	-0.043	0.040
最大誤差(m)	0.091	0.344	0.255	0.512
標準偏差(m)	0.035	0.101	0.066	0.175
RMSE(m)	0.057	0.103	0.079	0.179

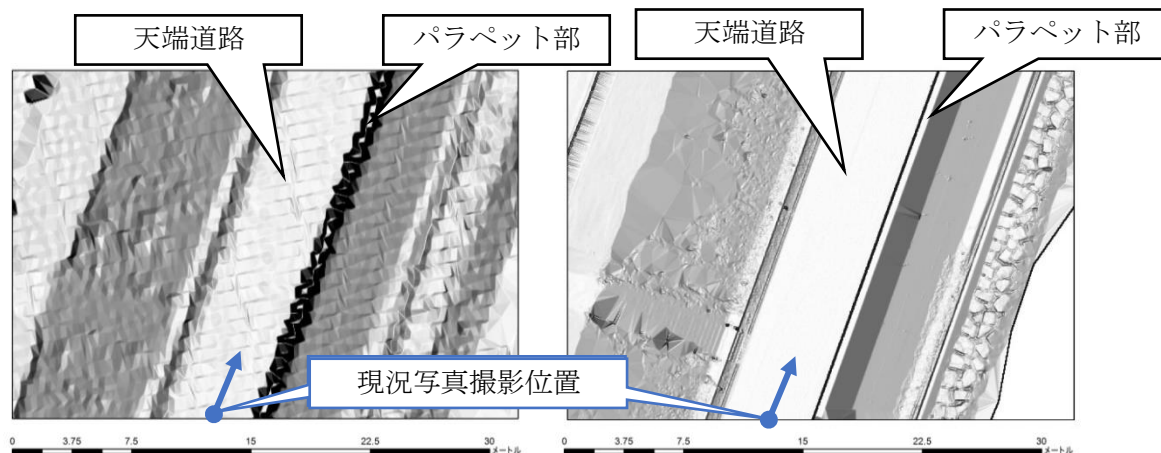
4)航空レーザ測量とMMSによる堤防形状の再現性

連続的な地形形状を取得できる航空レーザ測量とMMSを用いて、河川堤防における天端形状の再現性を確認する。

0.4m幅のパラペットを有する特殊堤区間において、航空レーザ測量とMMSの点群による堤防形状の再現性を検証した結果を示す。図2-20は、それぞれの点群から内挿補間により3次元の面データを生成し、陰影表現した図である。点群の取得間隔は、航空レーザ測量で公共測量において最も細かい0.5m、MMSで0.1m以下である。検証地区における現況写真を図2-21に示す。パラペットの天端のエッジ部分に着目すると、MMS点群は直線の形状を明瞭に再現している。一方、航空レーザ測量の点群は、直線的な形状を再現できていない。0.4m程度の規模となるパラペットを有する特殊堤形状は、計測点密度より細かいため、形状を再現できなかったと考えられる。

つぎに、天端道路に着目すると、ALBの陰影図は波打った形状に見える。平坦な天端道路における1m×1mの点群の高さバラツキは、ALBが標準偏差0.04mに対し、MMSが標準偏差0.01mであった。こうした点群のバラツキにより、航空レーザ測量は波打った形状として表現されたと考えられる。

以上の結果より、確実な堤防天端の把握に、MMSが利用できる可能性があることが確認できた。



(a) 航空レーザ測量の点群による陰影図

(b)MMS点群による陰影図

図 2-20 特殊堤における点群による陰影図



図 2-21 特殊堤付近の現況写真

(3) GNSS を利用した河川堤防高の把握

航空レーザ測量や MMS 以外の測量機器を用いて、連続的な堤防形状の把握を目指した既往研究を示す。

鵜飼らは、200m の測線間隔より細かい間隔で河川堤防高を把握するために、GNSS 測量を利用した [鵜飼尚弘, 2007]。具体的には、堤防天端に 1 つの縦断測線を設定し、その測線に対し、RTK-GNSS 観測法により徒歩で 1m 間隔の天端高を取得するものである。測線位置は、図 2-22 に示すように、河川の管理区間で天端中心を、一般道路の共用区間で法肩周辺の白線を取得することを基本とし、白線がない場合で、法肩から 1m の位置を取得した。簡便に計測するために図 2-23 で示す車輪と GNSS 受信機を取り付けたポールを用いて、観測を行った。この手法は、縦断的な堤防高を確実に捉えられる。しかし、部分的に沈下・変形の発生区間など、測線上に沈下・変形がない場合、越流の恐れのある箇所を捉えられない恐れがある。

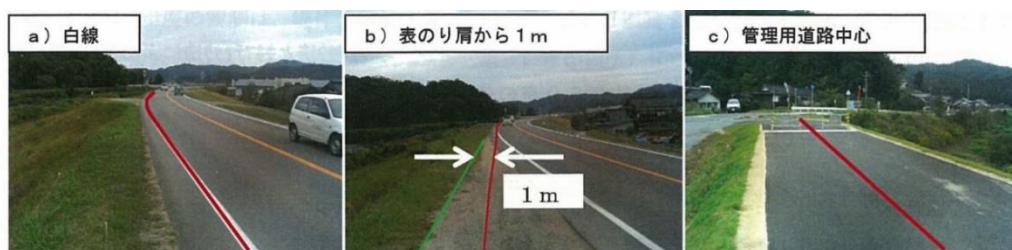


図 2-22 GNSS 縦断測量測定位置 [鵜飼尚弘, 2007]

堤防天端に 1 つの縦断測線を設定し、その測線に対し、RTK-GNSS 観測法により徒歩で



1m 間隔の天端高を取得

図 2-23 コロコロポール [鵜飼尚弘, 2007]

(4) 検知センサを利用した河川堤防の状態把握

測量以外の計測機器を用いて、河川堤防の状態を把握した既往研究を示す。

具体的には、河川堤防に光ファイバなどの検知センサを取り付け、洪水時ののり崩れや洗堀といった変状を検知するシステムである [末次忠司, 2010]。このセンサは、図 2-24 に示すように、ケーブル途中に錘を付け、変状により堤体中の錘が沈下して沈む（伸びる）と散乱光の周波数が短くなる性質を利用したものである。堤防堤体の変位→錘の移動→歪みの発生といったプロセスで変状の検知を行うことができ、リアルタイムな観測ができる。しかし、電源や通信装置が必要なこともあり、2004年時点の設置距離は、数km程度であった（表 2-4）。数十kmの区間延長や河川全体に適用する場合は、多くの建設コストと維持管理コストが必要となることが報告されている。

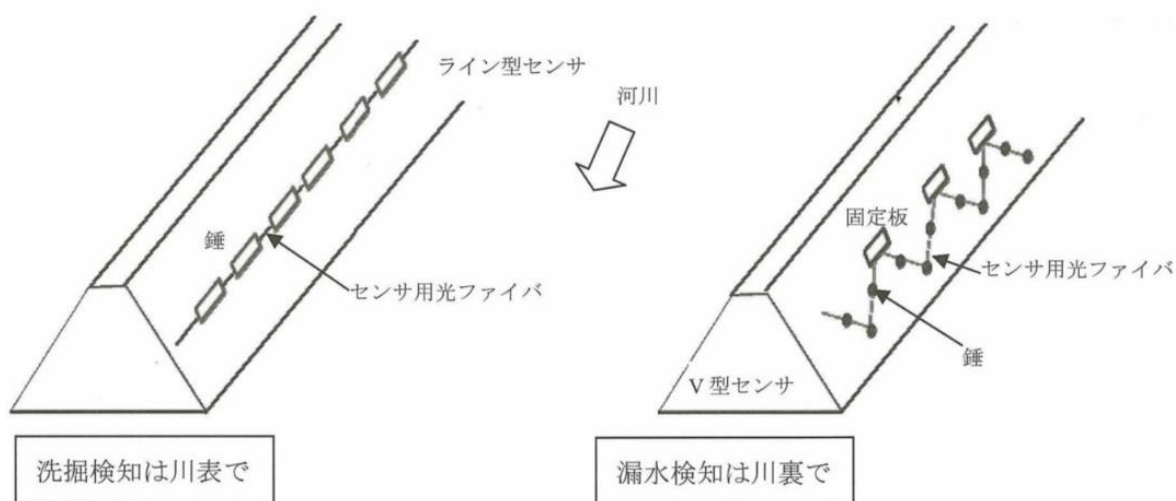


図 2-24 堤防センサにおける光ファイバの配置

表 2-4 堤防センサの設置状況 [末次忠司, 2010]

水系名	河川名	導入年月	目的	方式	敷設長
阿武隈川	阿武隈川	2000.3	漏水	ライン型+V型	1,000m
肱川	肱川	2001.3	〃	〃	280m
信濃川	魚野川	〃	洗堀	ライン型	1,850m
利根川	利根川	2002.3	漏水	〃	400m
肝属川	串良川	〃	〃	〃	320m
庄内川	新川	2002.5	〃	〃	232m

(5) 河川の維持管理で使用されているセンシング技術のまとめ

本項では、河道や河川堤防周辺の形状とその状況把握に関する既往研究や取り組みを確認した。河川堤防の維持管理では、数十cmの幅をもつ特殊堤や土堤の堤防高を 0.1m の位置精度を確保しながら漏れなく把握することや、天端の沈下・変形を 0.05m 程度の位置精度で漏れなく把握することが求められる。航空レーザ測量では、特殊堤を再現するのに十分な空間分解能を確保できない場合があり、GNSS 測量やセンサを利用した観測では、河川天端全体を、漏れなく把握することが難しいことがわかった。一方で、堤防天端周辺の高精細な形状を取得できる MMS は、確実な堤防天端の状態把握に寄与できる可能性があることが確認できた。

2.3.3. MMS を用いた河川堤防の状態把握に関する既往研究

本節では、MMS を河川堤防の維持管理に利用した既往研究や取り組みを整理する。

MMS は、車両にレーザスキャナ、デジタルカメラ、および自己位置・姿勢の計測機器を搭載したシステムであり、道路上から見える路面・道路構造物・周辺の樹木・建物などの複雑な形状を持つ点群を取得できる。道路周辺の 3 次元地物を、数十 cm 程度の空間分解能を確保して効率的に取得でき、2000 年代後半から、地形図や道路台帳の附図を作成するための計測システムとして利用されている。この MMS を利用して、連続的な河川堤防の形状や状況を把握する取り組みや既往研究はいくつか存在する。本項では、既往の研究や取り組みから、河川堤防でのデータ取得や河川の維持管理に関する MMS の利用内容とその課題について確認する。そのために、「(1)河川堤防における MMS 計測」では、既存研究で位置精度を確保するために検討されたデータ取得手法について整理する。そして、河川の維持管理に MMS を適用した事例として、「(2) MMS を用いた 360 度カメラ画像の取得」、「(3) MMS を用いた地形図、管理図面の作成」、および「(4) MMS を用いた河川堤防点検」の既往研究や取り組みを整理する。

(1) 河川堤防における MMS 計測

MMS は、GNSS 受信機、IMU、DMI などの計測機器の観測データを用いて、自己位置と姿勢を測定する。その自己位置精度は、GNSS キネマティック法による測位結果、IMU の慣性測位結果、および DMI による距離情報の結合処理により決定される。

一般に GNSS キネマティック法は、固定局から MMS までの距離（基線長）が長くなるにつれ、GNSS 電波の電離層遅延などの影響により位置精度が劣化する [臼井澄夫, 2011]。帯状に長い河川堤防では、基線長が長くなり、MMS 取得データの位置精度が低下しやすい。また、MMS 計測に関する既往研究において、固定局からの基線長が取得データに及ぼす影響を具体的な数値で示した事例は少ない。

一方で、基線長を仮想的に短くする測位技術として、ネットワーク型仮想基準点 (Virtual Reference Station) 方式 (VRS 方式) の測位や面補正パラメータ (Flächen Korrektur Parameter : FKP) 方式がある。MMS の周囲にある電子基準点などの既知点の観測量から電離層・対流圏の遅延や衛星の軌道誤差等の補正量を求めて解析を行うため、RTK 方式に比べて基線が長い場合でも良好な位置精度を得ることができる [国土地理院, 2005]。橘らは、河川堤防の MMS 計測において、FKP 方式による MMS の車両の自己位置の精度を具体的な数値で示した [橘菊生, 2015]。一方で、河川堤防において、VRS 方式により生成した MMS 点群の位置精度を具体的な数値で把握した事例は少ない。

堤防形状の計測に MMS を適用した既往研究がいくつかある、[吉岡裕嗣, 2013]、[東良慶, 2014]。そのほとんどは GNSS 信号の受信が良好な区間で評価されたものであった。道路橋が堤防跨ぐ区間や樹木などの隣接区間といった河川堤防で一般的に存在する GNSS 不可視区間において、MMS の計測精度を具体的な数値で示した事例はほとんどない。

(2)河川空間の全周囲画像データの作成

国土交通省は、2013年・2014年頃に、河川状況を把握するための基礎資料として、全国の直轄河川を対象に、360度カメラを用いて全周囲画像データを整備した[国土交通省水管理・国土保全局 河川情報企画室, 2013]。この全周囲画像データは、位置精度を確保した基準で計測されていないため、全周囲画像データから堤防形状を再現することは難しい。

(3) MMSを用いた地形図、管理図面の作成

MMS点群を用いた自動処理により、地図を整備する研究が行われている。川野や田中らは、MMS点群を用いて天端と法面の境界線（ブレイクライン）を生成する手法を提案し、地形図や維持管理の基礎データとして利用可能な3次元モデルが生成できることを示した[川野浩平, 2015], [田中成典, 2011]。この手法では、詳細な堤防高の再現ではなく、河川堤防の骨格形状の再現に主眼を置いた検討がなされている。しかし、堤防高や堤防の沈下・変形といった情報を取得する検討はなされていない。

(4) MMSを用いた河川堤防点検

MMSを堤防点検に適用した既往研究がいくつかある[橘菊生, 2015], [吉岡裕嗣, 2013], [東良慶, 2014]。これらの既往研究では、堤防天端走行で得られたMMS点群を用いて、従来の堤防点検項目の検出可否を検証している。主な点検項目は、ひびわれ亀裂や芝のはがれ、モグラ穴といった表層状態の点検、陥没・はらみだしといった形状の点検、および構造物目地の開きなどの局所的な変形の点検である。その結果、小段下部の法面や橋梁・樋門といった構造物の天端から見て裏側に計測欠損領域（計測死角）が発生しやすいこと、長大法面を持つ堤防の法尻付近で取得データの空間分解能が低くなる等の課題が確認された。一方で、堤防天端は、計測死角がほとんどなく、高い空間分解能を持つデータを安定して取得できることが確認された。

また、MMS点群による点検項目を抽出する解析手法が検討されている。MMS点群による3次元形状の可視化だけでは、点検項目を検出することが難しく、点検項目の種類、形状の大きさごとに適した処理手法や、把握したい範囲の広さに応じた表現手法を用いる必要がある。全ての点検項目をMMSで点検するには、複数の処理手法を行う必要があり、処理が煩雑になることが確認された。さらに、MMS点群といった3次元データから、河川堤防高や変化・沈下といった区間を抽出する手法が確立されていないこともわかった。

2.4. 河川堤防の維持管理に MMS を用いる必要性

本節では、堤防高や河川堤防の状態把握に MMS を適用するうえでの課題をとりまとめ、その課題に対する本研究のアプローチを述べる。

2.4.1. 河川堤防維持管理の課題と MMS の必要性

前節までに確認した河川堤防における維持管理の現状や既往研究の課題を、以下に整理する。

(1) 河川堤防の特徴と河川堤防管理に必要な計測精度

河川堤防は、帯状に長い構造物である。その構造は、土堤を基本とし、一部でパラペット構造を有する特殊堤が整備されている。土堤は、不同沈下を起こしやすく、変形・沈下する特徴がある。また、特殊堤は、小さいもので数十 cm 幅を持つ。

こうした河川堤防に関わる被害規模の大きい水害は、圧倒的に越流による破堤が原因であること、そして、それは洪水時の水位と堤防の高さから決まることが多いことが確認されている。そのため、河川の維持管理では、数十 km 以上におよぶ帯状に長い河川堤防で、計画高水位を確保できている堤防区間や、堤防越流が発生する可能性がある堤防区間を漏れなく把握する必要である。また、過去の災害事例や報告から、0.1m 程度の堤防高の変化を漏れることなく把握し、治水に必要な堤防高の維持や洪水時に土のうの嵩上げなどによる的確な対策を講じること、また、軟弱地盤地などでは、0.05m 程度の高さ変化を伴う変形・沈下状況を漏れなく把握することが必要なことが確認された。

(2) 河川堤防の維持管理に関する課題と MMS を河川堤防管理に用いる必要性

現在の河川の維持管理では、河川堤防高を把握するために、200m といった一定間隔ごとの縦横断測量と、目視による年数回の堤防点検により堤防高の把握が行われている。しかし、縦横断測量のような代表断面による管理は、測線間の堤防高や状態が把握されておらず、目視による点検は、広く連続的につながった低い箇所や変状を捉えることが難しい。

河川堤防の維持管理では、規模の小さいもので数十 cm 程度の天端幅をもつ堤防高を、約 0.1m の位置精度を確保しながら、漏れなく、連続的に把握することが求められる。こうした河川堤防の形状を捉えるには、航空レーザ測量で取得される点群の計測間隔では、十分な形状を再現できない場合があること、GNSS 測量やセンサを利用した観測では、漏れなく河川堤防全体の状況を把握することが難しいことが確認できた。

十 cm 以下の計測間隔を確保して連続的な地形を計測できる方法として MMS がある。堤防天端を走行しながら、周辺の形状を連続的に取得できる MMS の利便性を活かすことで、越流が発生する恐れが高い河川堤防区間の確実な把握に寄与できると考えられる。

(3) MMS を用いた河川堤防の把握に関する既往研究の課題

MMS の自己位置精度は、固定局からの基線長が長くなるにつれ位置精度が劣化しやすく、帯状に長い河川堤防で、位置精度が低下しやすい。こうした河川堤防の特徴と MMS の特性を考慮して、計測手法を整理した事例は少ない。また、道路橋が堤防を跨ぐ区間や樹木などとの隣接区間といった堤防区間といった一般的に存在する GNSS 不可視区間において、MMS の計測精度を具体的な数値で示した事例はほとんどない。さらに、MMS 点群を用いて、堤防の変形・沈下の状態を見える化する可視化や、自動処理で堤防高を把握する手法は確立されていない。

2.4.2. 研究課題と本研究のアプローチ

(1) 研究課題

河川堤防における維持管理の現状や既往研究の課題は、以下のようにまとめられる。

- **MMS で取得される点群の面的な位置精度の把握**: 堤防の高さや形状を漏れなく連続的に把握する手法を検討する。そのために、取得される MMS 点群全体の位置精度を把握する。
- **河川堤防における MMS 計測手法の検討**: 数十 km 以上におよぶ帯状に長い河川堤防に対し、堤防状況や堤防高が把握可能な MMS 点群を取得するための計測手法を確立する。その要求精度は、堤防高の把握で 0.1m、変形・沈下把握で 0.05m とする。これらの要求精度は、過去の災害事例や報告から確認された河川堤防の維持管理に必要な精度である。
- **変形・沈下把握手法の検討**: 堤防越流の可能性が高いと考えられる堤防沈下、変形状態、および堤防と河川構造物周辺の堤防状態を漏れることなく把握するとともに、視覚的にわかりやすく可視化する手法を確立する。
- **堤防高把握手法の検討**: 河川堤防の管理で必要となる堤防高の状態を迅速かつ効率的に把握するために、MMS 点群から自動処理により堤防高を把握する手法を確立する。
- **河川堤防モニタリングの検討**: 検討した河川堤防の沈下・変形状況や堤防高の把握手法を用いて、確実性の高い河川堤防モニタリング手法を確立する。

(2) 本研究のアプローチと本論文の構成

本項では、研究課題に対するアプローチ、本論文の構成とその位置づけを示す。

本研究では、被害が大きくなる越流による水害を軽減するために、堤防天端の沈下・変形や堤防高を漏れなく把握する手法を構築し、確実性の高い河川堤防モニタリング手法を提案することを目的とする。そのために、本研究では、MMS を用いた実験計測を行い、その結果を基に、MMS 点群全体の位置精度評価および計測手法の確立、河川堤防計測に適した MMS (河川計測用 MMS) の製作、さらに、MMS 点群から越流の恐れの高い状態や区間を抽出する手法を検討する。そして、最後に本研究で確立した手法を用いた河川堤防モニ

タリング方法を提案する。以降では、本論文の構成を示す。

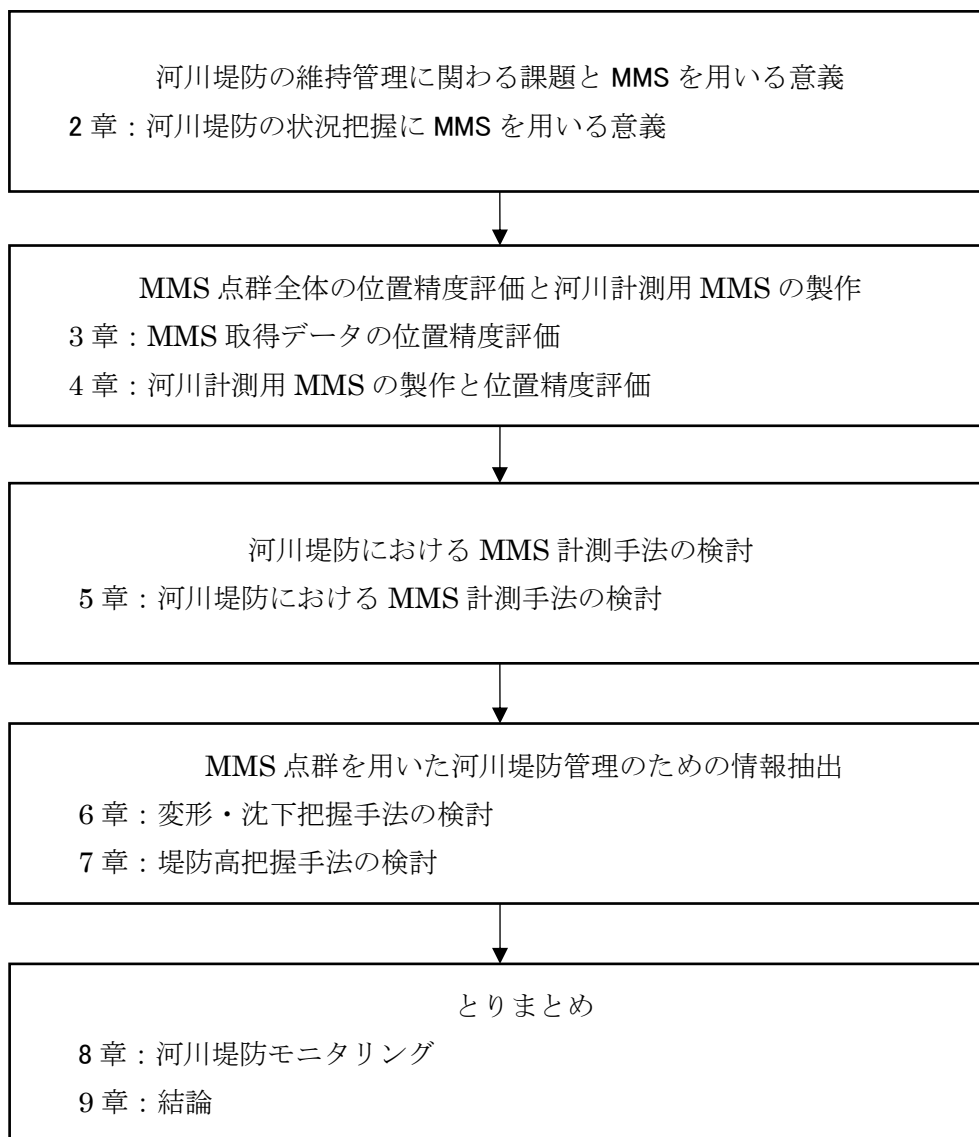


図 2-25 本研究の構成

● 河川堤防の維持管理に関わる課題と MMS の必要性

2章では、河川堤防の災害リスクと維持管理の現状を整理し、関連する既往研究の確認から課題を整理し、MMS の必要性を示した。そして、堤防高や河川堤防の状態把握に MMS を適用するうえでの研究課題をとりまとめ、それに対するアプローチを示した。

● **MMS 点群全体の位置精度評価と河川計測用 MMS の製作**

MMS 点群は、3次元座標が集合したデータであり、膨大な計測点から連続的な形状を再現できる。MMS 点群を用いて、河川堤防の連続的な状況把握に用いるためには、MMS 点群全体の位置精度を評価する必要がある。

そこで、3章では、地図や道路台帳の附図作成に利用される標準的な MMS を用いた実験計測から、MMS で取得される面的な点群の位置精度評価手法を提案し、MMS 点群全体の位置精度を評価する。研究課題の「MMS 点群の面的な精度の把握に関する検討」に相当する。さらに、実験計測による評価から本手法の妥当性と MMS の計測特性を確認する。

4章では、河川堤防の形状特性と MMS の計測特性を踏まえ、河川堤防の計測に適した河川計測用 MMS を製作した。この河川計測用 MMS に対して点群の位置精度評価手法を適用し、その位置精度を把握する。

● **河川堤防における MMS 計測手法の検討**

5章は、研究課題の「河川堤防における MMS 計測手法の検討」に相当する。帯状で長い河川堤防において、河川計測用 MMS を用いた実験計測を行い、固定局からの基線長による位置精度への影響、仮想的に基線長を短くする VRS 方式の効果を把握する。そして、河川全体で位置精度を確保しながら連続的な堤防天端形状を取得できる MMS 計測手法を整理する。

● **MMS 点群を用いた河川堤防管理のための情報抽出**

MMS 点群から、越流の恐れの高い区間を迅速に抽出するための手法を提案する。

6章では、実際に沈下が確認されている軟弱地盤地で取得した MMS 点群から堤防の変形や沈下状態を抽出・可視化する手法を検討する。研究課題の「変形・沈下把握手法の検討」に相当する。

7章では、実際の河川堤防で取得した MMS 点群を用いて、自動処理により堤防高を抽出する手法を検討する。研究課題の「堤防高把握手法の検討」である

● **とりまとめ (MMS を用いた河川堤防モニタリングの提案)**

8章では、検証した手法を用いて、越流の恐れの高い区間を抽出する河川堤防モニタリング手法を提案する。研究課題の「河川堤防モニタリングの検討」に相当する。本研究で確立した手法を生み合わせ、河川堤防の状態を漏れなく確実に把握するモニタリングの手順と、維持管理へ MMS 取得データを活用するための河川堤防管理システムを構築する。

最後に、9章では、研究課題への検討を通して得られた成果を総括する。さらに、河川堤防だけではなく河川全体の効率的な維持管理を実現するために、MMS と航空機を用いたレーザ計測技術の使い分けを整理し、河川全体のモニタリング手法を提案する

3. MMS 取得データの位置精度評価

3.1. はじめに

河川堤防の連続的な状況把握に MMS 点群を利用するには、点群全体の位置精度を評価する必要がある。そこで本章では、MMS 点群全体の位置精度を評価する手法を提案し、妥当性と有効性を評価する。

測量分野では、航空機や車両を利用したレーザ計測が公共測量として行われている。航空機を利用した 3 次元計測を航空レーザ測量、MMS を利用した 3 次元計測を車載写真レーザ測量と呼び、「公共測量 作業規程の準則」に生成する点群の位置精度を担保するための方法が定義されている。その方法は、1)GNSS・IMU の観測状況評価、2)コースごとに生成された点群の重複区間で検証地区をランダムサンプリングし、コース間における高さ方向の較差確認、3)対象地区内で地上測量による基準点をランダムサンプリングし、基準点と周辺の点群との高さ方向の較差確認の手順に従うものとされている [国土交通省国土地理院, 2016]。この評価は、ランダムサンプリングによる部分的な精度評価であり、点群全体が評価されていない。

MMS 点群の特徴は、道路上から見える路面、道路構造物、周辺の植生、地形、建物などの様々な形状を取得できることである。本章では、このような面を利用して、MMS 点群全体の位置精度を評価する手法を提案する。この手法では、2 つ以上の点群から位置合わせや位置のズレ量を評価する手法の一つである最小二乗 3D サーフェスマッチング (Least Squares 3D Surface Matching : LS3D) を利用する。LS3D の特徴は、点群に存在する面形状に着目して、位置合わせとズレ量を評価できることである。本章では、この LS3D を利用した点群全体の位置精度を評価する手法を提案する。そして、市販されている MMS で取得された点群に本手法を適用し、その有効性を検討する。さらに位置精度の評価結果から、MMS の計測特性を明らかにする。

3.2. MMS

本節では、MMS の概要として、道路施設管理のための地形図や道路台帳平面図作成に利用されている標準的な MMS について、機器や取得データなどの特徴を示す。

3.2.1. MMS の概要

MMS は、各種計測機器を車両に搭載し、走行しながら道路周辺の 3 次元形状を計測するシステムである。搭載する計測機器は、GNSS 受信機、IMU、走行距離計 (Distance measurement indicator : DMI)、デジタルカメラ、レーザスキャナなどが一般的である。MMS に搭載しているレーザスキャナはラインセンサであり、車両が移動することで車両移動方向に対する 3 次元計測を実現する。最近では、点群の高密化・計測範囲拡大のため、複数のレーザスキャナを搭載した MMS が多く見られる。また、レーザスキャナ以外で搭載する機器の組み合わせは様々で、多様性が高い計測システムといえる [Barber, 2008]。

3.2.2. 標準型 MMS

道路施設管理のための地形図や道路台帳平面図の作成に、MMS が利用されている。こうした平面図作成に使用されている MMS の一つに、図 3-1 に示す三菱電機株式会社製 MMS type-X640 がある。本機種は、GPS (Global Positioning System) 受信機、IMU、DMI、4 つのレーザスキャナ、デジタルカメラで構成された MMS であり、車両から 15m の範囲を対象とした計測システムである。搭載されているレーザスキャナは Sick 社製 LMS291 である。4 台のレーザスキャナは、前方向上と下、後方向上と下の 4 方向に向いて、図 3-2 に示す角度で取り付けられている。レーザスキャナで取得されたデータは、各種センサで取得される車両の位置・姿勢データを補正情報として複合的に解析を施すことで、地図座標を持つ MMS 点群として生成される。この MMS のカタログスペックは、GPS 受信状況が良い地区において、車両の位置算出精度は 0.06m、点群の位置精度は 7m 先で距離精度 : 0.1m と記されている [三菱電機株式会社, 2011]。

本章では、地形図や道路台帳平面図の作成に主に使用されている MMS type-X640 を標準型 MMS と位置づけ、この MMS で取得される点群の位置精度手法を検討するとともに、位置精度を検証した。

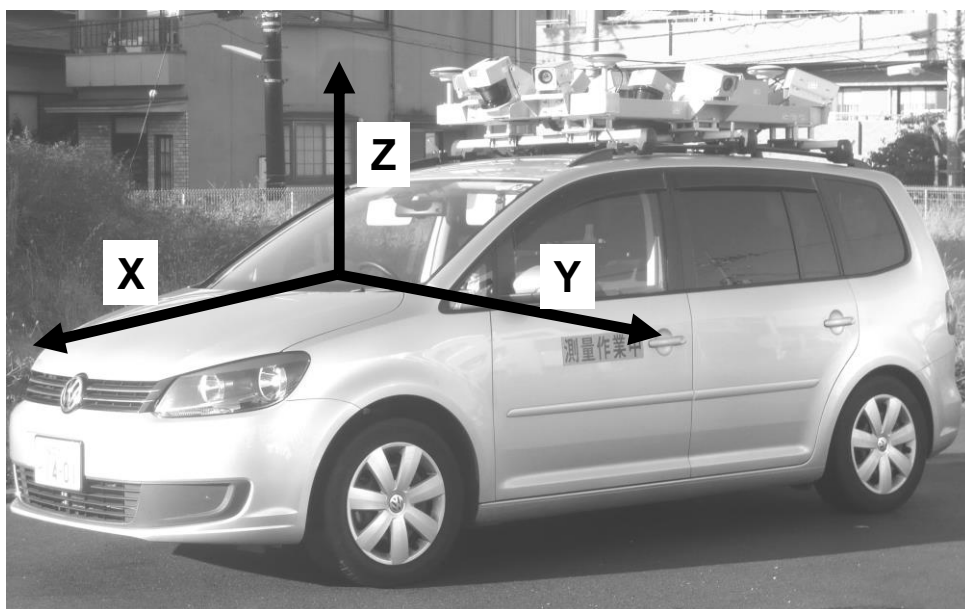


図 3-1 MMS Type-X640

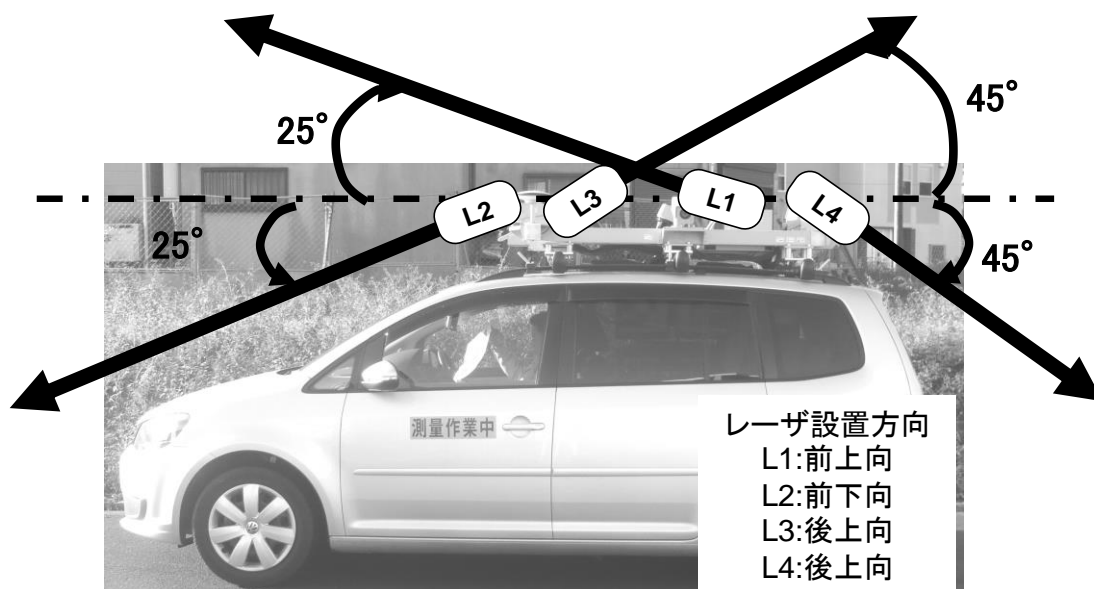


図 3-2 MMS レーザスキャナ取り付け角度

3.3. MMS 点群の位置精度評価手法

本節では、MMS 点群全体の位置精度を評価する手法を提案する。そして、この手法で利用する LS3D の概要と理論を示す。

3.3.1. 提案する位置精度評価手法

MMS 点群の精度は、データ処理過程の評価と生成されたデータ評価の2つから検証できる。データ処理過程の評価とは、データ処理工程ごとに基準を設けた評価を実施し、段階的評価することで MMS 点群の位置精度を評価手法である。一方、生成されたデータ検証は、計測最終成果として生成された点群に対し、幾何的な精度を直接評価する手法である。本提案手法では、データ処理過程の評価と生成されたデータ評価の両面に着目した MMS 点群の位置精度評価を行う。

MMS は、複数のレーザスキャナと GPS・IMU・DMI の機器で構成された複合計測システムである。そのため、各機器の関係性や MMS の計測特性を考慮して、MMS 点群全体の位置精度を評価する必要がある。図 3-3 に本評価において提案する位置精度評価手順を示す。図 3-3 の網掛け部分は、本評価で提案する 5 つの評価項目とその評価手順を示している。提案する評価手順を以下に記す。

1)軌跡解析によるデータ品質評価 (Data quality assessment by trajectory)

データ品質評価では、GPS 受信状況から利用に適さないデータをスクリーニングすることを目的とする。GPS 衛星数や DOP 値が著しく低下した区間を確認し、MMS 点群の位置精度に影響を及ぼす可能性のある区間を削除する。

2)安定度評価 (Precision assessment)

複数レーザスキャナが搭載されている MMS は、安定度評価を行う。安定度評価では、複数レーザスキャナで取得された MMS 点群が同一の位置精度(重なり度合い)を持って計測されているかを安定度と定義する。同じ計測時間、同じコース、複数のレーザスキャナで取得される MMS 点群の重ね合わせから、複数のレーザスキャナによる MMS 点群が一致するかを求める。

3)相対評価 (Relative accuracy assessment)

繰り返し計測において MMS 点群が同一の位置精度を保持しているかを相対精度と定義し、異なる計測時間、同じコース、同じレーザスキャナで取得された MMS 点群の重ね合わせから点群間の位置較差を求め、評価する。

4)絶対評価(Absolute accuracy assessment)

MMS 点群の持つ位置座標の正確さを絶対精度とし、MMS 点群の位置座標と実測された検証点の位置座標の比較から座標較差を求め、その大小から評価を行う。また、検討点

や図1で示すMMSの進行方向をX軸とした3軸(X,Y,Z軸)に直行した面が表現できるように検証面を選定し、3次元の幾何学性を評価できるようにする。

5)クロスセンサ評価(Cross-sensor accuracy assessment)

クロスセンサ評価では、MMS点群と地上レーザスキャナで計測された点群とを比較し、MMSの計測手法・レーザスキャナの違いによる固有性を評価する。
 なお、2), 3), 4), 5)での点群の重ね合せ評価にLS3Dを用いる。

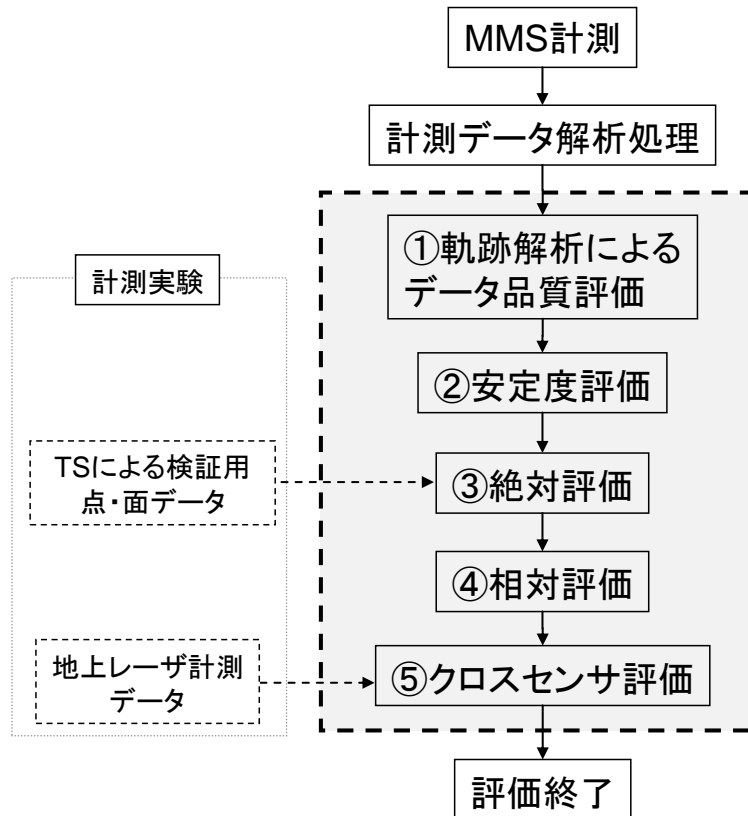


図 3-3 MMS 点群の位置精度評価手法

3.3.2. LS3D の概要

この評価手法で使用するLS3Dは、2つ以上点群の位置あわせ(マッチング)から、点群間の相対的な位置・姿勢量を算出する手法であり、点群間の相対的な位置・姿勢量によって点群の位置の確からしさを評価することができる。写真測量の画像ステレオマッチングで用いられる最小二乗マッチングは、ステレオペア画像を対象とした平均二乗法に基づいたエリアマッチングであり[Gruen, 1985]、LS3Dはマッチングの対象を写真から点群に置き換え、拡張した手法である。LS3Dでは、複数の点群を対象とし、それぞれの点群において面を抽出する。その際、レーザの照射順序(配列)情報を用いることで、より確実に面を抽出できる。こうして抽出された面の点群間における対応関係を最小二乗法に基づいて

算出することができる。

点群の位置合わせや位置のズレ量の評価には、すでにいくつかの手法が提案されており、そのほとんどが ICP (Iterative Closet Point) アルゴリズムを基本としたものである [Besl, 1992]。ICP とは、複数点群の重複部分を利用して点群間の位置あわせを行うためのアルゴリズムである。ICP では、1 つの点群をテンプレート点群 (基準)、もう 1 つの点群をリファレンス点群とし、リファレンス点群がテンプレート点群に重なり合うように回転・平行移動を繰り返し、位置あわせを行う。そのアルゴリズムは、2 つの点群間において対応点を求め、対応点較差を最小化するものである。LS3D も ICP のアルゴリズムを基本としているが、LS3D と ICP の大きな違いは対応点検索手法にある。ICP は、点对点による検索方法を採用しており、リファレンス点群の全ての点に対し、テンプレート点群上の最近傍点を検索することで求められる。一方、LS3D は面対面による検索方法を採用している。LS3D ではリファレンス点群で抽出された面の法線方向にあるテンプレート点群の面を対応する面と捉えることで求められる。ICP では座標値のみで利用できるため汎用性が高い。ただし、点对点による比較は誤認識を起こしやすく、面対面のほうが位置あわせ精度が高いとの報告がある [増田健, 2009], [Masuda, 1995], [Rusinkiewicz, 2001]。一方、LS3D では座標値とレーザの照射順序 (配列) 情報が必要となる。また、面対面の比較では、面を抽出する際異常点を排除する制限を設けることができ、面対面による比較はミス認識を軽減できる利点がある [Gruen A., 2005], [Akca, 2010]。

3.3.3. LS3D の理論

本項では、MMS 点群に対する位置精度評価手法で用いる LS3D の理論について説明する。

LS3D は、2 つの点群に対し、基準となる点群から抽出する面をテンプレート面: $f(x, y, z)$ 、位置あわせをする点群から抽出する面をリファレンス面: $g(x, y, z)$ と定義する。LS3D では、リファレンス面 $g(x, y, z)$ とテンプレート面 $f(x, y, z)$ の最小二乗マッチングを満たすような 3 次元変換のパラメータを推定する。ここで用いる面表現は、点群より 3D メッシュ又はグリッドメッシュによる表現手法を用いる。3D メッシュは隣接する 3 点より三角形メッシュを生成して面を表現する手法であり、グリッドメッシュは線形補間によりメッシュとして表現する手法である。こうした面の表現は、いかなる点群に対しても用いることができる [Gruen A., 2005], [Akca, 2010]。

テンプレート面、リファレンス面の関係が理想的な場合、次式を満たす。

$$f(x, y, z) = g(x, y, z) \quad (1)$$

しかしながらランダム誤差の影響により式(1) は成立しない。従って、テンプレートのノイズ (異常点) はリファレンスのノイズと独立であると仮定し、真の誤差ベクトル $e(x, y, z)$

を導入する.

$$f(x, y, z) - e(x, y, z) = g(x, y, z) \quad (2)$$

式(2) は, $g(x, y, z)$ を $f(x, y, z)$ をマッチング (位置合わせ) させる観測方程式である. このマッチング (位置合わせ) では, $f(x, y, z)$ と $g(x, y, z)$ の2面間のユークリッド距離の二乗和が最小, 又は閾値以下になるようなマッチング (位置合わせ) を行う. 最終的な位置は, $g(x, y, z)$ の初期位置と連続的なリファレンス面 $g^0(x, y, z)$ の関連性により推定される. ここで, 点群から連続的な面間の幾何的な関係を表現するために, 7変数の3次元相似変換を用いる.

$$\begin{aligned} x &= t_x + m(r_{11}x_0 + r_{12}y_0 + r_{13}z_0) \\ y &= t_y + m(r_{21}x_0 + r_{22}y_0 + r_{23}z_0) \\ z &= t_z + m(r_{31}x_0 + r_{32}y_0 + r_{33}z_0) \end{aligned} \quad (3)$$

ここで, $r_{ij} = \mathbf{R}(\omega, \varphi, \kappa)$ は直行回転行列, $[t_x \ t_y \ t_z]^T$ は変換ベクトル, そして m は一定の縮尺係数である. この縮尺係数 m は, 状況に応じて用いられる. 最小二乗法による推定を行うため, 式(2) をテイラー展開し, 線形化する.

$$\begin{aligned} f(x, y, z) - e(x, y, z) &= g^0(x, y, z) + \frac{\partial g^0(x, y, z)}{\partial x} dx \\ &+ \frac{\partial g^0(x, y, z)}{\partial y} dy + \frac{\partial g^0(x, y, z)}{\partial z} dz \end{aligned} \quad (4)$$

$$dx = \frac{\partial x}{\partial p_i} dp_i, \quad dy = \frac{\partial y}{\partial p_i} dp_i, \quad dz = \frac{\partial z}{\partial p_i} dp_i \quad (5)$$

ここで, $p_i \in \{t_x, t_y, t_z, m, \omega, \varphi, \kappa\}$ は式(3)における i 番目の変換パラメータである. 式(3)の微分は以下である:

$$\begin{aligned} dx &= dt_x + a_{10} dm + a_{11} d\omega + a_{12} d\varphi + a_{13} d\kappa \\ dy &= dt_y + a_{20} dm + a_{21} d\omega + a_{22} d\varphi + a_{23} d\kappa \\ dz &= dt_z + a_{30} dm + a_{31} d\omega + a_{32} d\varphi + a_{33} d\kappa \end{aligned} \quad (6)$$

a_{ij} は共分散項である. 以下の表記法を用いて,

$$g_x = \frac{\partial g^0(x, y, z)}{\partial x}, \quad g_y = \frac{\partial g^0(x, y, z)}{\partial y}, \quad g_z = \frac{\partial g^0(x, y, z)}{\partial z} \quad (7)$$

また、式 (6) を代入すると、式 (4) は以下の式となる。

$$\begin{aligned} -e(x, y, z) = & g_x dt_x + g_y dt_y + g_z dt_z + \\ & (g_x a_{10} + g_y a_{20} + g_z a_{30}) dm \\ & + (g_x a_{11} + g_y a_{21} + g_z a_{31}) d\omega \quad (8) \\ & + (g_x a_{12} + g_y a_{22} + g_z a_{32}) d\varphi \\ & + (g_x a_{13} + g_y a_{23} + g_z a_{33}) d\kappa \\ & - (f(x, y, z) - g^0(x, y, z)) \end{aligned}$$

ガウス-マルコフモデルでは、それぞれの観測値は未知の決定関数であり、パラメータの線形結合（一次結合）に関連付けられる。計算項 $\{g_x, g_y, g_z\}$ は、関数 $g(x, y, z)$ の1次微分である。式 (8) を行列式で表すと

$$-e = Ax - l, \quad P \quad (9)$$

ここで、 A はデザイン行列、 $P = P_{ll}$ は推定の重み行列、 $\mathbf{x}^T = [dt_x \ dt_y \ dt_z \ dm \ d\omega \ d\varphi \ d\kappa]$ はパラメータベクトル、そして $l = f(x, y, z) - g^0(x, y, z)$ は、テンプレート面と対応するレファレンス面の要素間における差分のベクトルである。

ここで統計的な期待値演算子 $E\{\}$ を導入する。

$$\begin{aligned} e & \sim N(0, \sigma_0^2 Q_{ll}) \quad , \quad (10) \\ \sigma_0^2 Q_{ll} & = \sigma_0^2 P_{ll}^{-1} = K_{ll} = E\{ee^T\} \end{aligned}$$

式 (9) と (10) は、ガウス-マルコフモデルである。 Q_{ll} と K_{ll} はそれぞれ推定余因子と共分散行列を表す。未知の変換パラメータは、適切な推定重みを用いた確率的な数値として扱うことができる。この拡張により変換パラメータ推定時の制御で利点をもたらす。本モデルは、システムのパラメータとして付加的な観測方程式を導入する。

$$-e_b = Ix - l_b, \quad P_b \quad (11)$$

ここで、 \mathbf{I} は単位行列、 \mathbf{l}_b はシステムパラメータに対する（仮想的な）観測ベクトル、そして \mathbf{P}_b は \mathbf{l}_b に関連した重み係数行列である。重み行列 \mathbf{P}_b は、パラメータ群の推定情報を考慮し、適切に与えなければならない。重み行列が $\mathbf{0}$ の場合 ($(\mathbf{P}_b)_{ii} = 0$)、 i 番目のパラメータを自由に変化させることができ、無限大の重み値 ($(\mathbf{P}_b)_{ii} \rightarrow \infty$) とすることで i 番目のパラメータを定数（一定）として扱うことが可能となる。

式 (9) と (11) を併用した最小二乗による解法は、ガウス-マルコフモデルであり、パラメータに偏りのない最小分散として推定できる。

$$\hat{\mathbf{x}} = (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A} + \mathbf{P}_b)^{-1} (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{l} + \mathbf{P}_b \mathbf{l}_b) \quad \text{solution vector} \quad (12)$$

$$\hat{\sigma}_0^2 = (\mathbf{v}^T \mathbf{P} \mathbf{v} + \mathbf{v}_b^T \mathbf{P}_b \mathbf{v}_b) / r \quad \text{variance factor} \quad (13)$$

$$\mathbf{v} = \mathbf{A} \hat{\mathbf{x}} - \mathbf{l} \quad \text{residual vector for surface observations} \quad (14)$$

$$\mathbf{v}_b = \mathbf{I} \hat{\mathbf{x}} - \mathbf{l}_b \quad \text{residual vector for parameter observations} \quad (15)$$

ここで、 $\hat{\mathbf{x}}$ は最小二乗推定量、 $r = n - u$ は余剰（冗長性）、 n は観測の数（テンプレートから生成した面要素の数）、そして u は変換パラメータの数（ここでは 7）を示す。推定式が収束するとき、解のベクトルは $\mathbf{0}$ ($\hat{\mathbf{x}} \rightarrow \mathbf{0}$) に収束する。そして、面の観測 v_i の残差は、推定されるレファレンス点群より生成した面とテンプレートより生成した面間の最終的なユークリッド距離になる。

$$v_i = \hat{g}(x, y, z)_i - f(x, y, z)_i, \quad i = 1, \dots, n \quad (16)$$

この関数モデルは非線形であり、解は反復計算により最小に近づく。ただし、線形化された関数モデルの解であり、局所的な最小値を見つけるという危険は常にある。全体における最小値は、パラメータの近似値が真値 ($p_i^0 \approx p_i \in \mathcal{R}^u; i = 1, \dots, u$) に十分近い点で関数がテイラー展開されている場合のみ保証される。

$$p_i^0 \in \{t_x^0, t_y^0, t_z^0, m^0, \omega^0, \varphi^0, \kappa^0\} \quad (17)$$

解ベクトル (12) が求められた後、レファレンス点群は更新された変換パラメータによって新しい座標へと変換され、デザイン行列 \mathbf{A} と残差ベクトル \mathbf{l} は再評価される。この反復処理は、式 (12) の変換済ベクトル $\hat{\mathbf{x}}$ のそれぞれの要素が閾値よりも下回ったときに終了する。

3.4. 標準型 MMS で取得された点群の位置精度評価

MMS 点群は、走行する道路沿い存在する地盤や建物などの地物形状が再現できる。ただし、河川堤防天端周辺には、建物が少ない。一方、市街地の道路沿いは、多くの建物が位置している。そこで本評価では、建物が存在する市街地において実験計測を行い、提案する位置精度評価手法の有効性を確認する。

3.4.1. 実験計測

実験計測では、位置精度評価のために MMS によるデータ取得を行い、GPS・トラバース測量による基準点の計測と、TS (Total Station : トータルステーション) による検証点の計測、地上据え置きレーザスキャナによる 3 次元計測を行う。MMS により取得したデータに基づき、軌跡解析を行い、更に MMS 点群生成のための後処理を行う。軌跡解析では、GPS・IMU・DMI で取得されたデータを用いて車両軌跡を求め、GPS 衛星数および DOP(Dilution of Precision : 精度低下率) 値から GPS 受信状況を確認する。次の後処理では、レーザスキャナの 3 次元データと車両の位置・姿勢データとを複合的に解析することで地図座標を持つ MMS 点群を生成する。計測実験は 2011 年 10 月 21, 22, 25 日、および 11 月 2 日に実施した。

3.4.2. データ取得の手順と対象地域の設定

(1) 対象地域の設定

MMS は複数の機器で構成された複合計測システムである。MMS により生成される点群は、様々な機器の様々な特性に起因する誤差が含まれている。また、実際に MMS 計測を実施する道路状況は、カーブや起伏などの変化に富んでおり、これらも MMS 点群に影響を与えている。実際に MMS で生成される点群に対し、このような多種多様な観点から位置精度を評価するには、多大な困難を伴う。したがって本評価では、MMS 点群における外的影響（道路状況）による誤差と様々な機器の特性に起因する誤差を最小化する理想的計測環境を以下に示すように定義し、対象地域の設定を行った。①上空視界が良好で GPS 信号が受けやすいこと、②絶対評価用のターゲット板や検証点の設置が可能であること、③ MMS 点群の評価を行うための地上構造物が存在すること、④交通量が少なく、MMS 計測が行いやすいこと。これらの条件を満たす地域として横浜市みなとみらい地区を選定した。対象地域を図 3-4 に示す。対象地域は、約 200×200m の区画とその周辺道路である。上空視界は基本的には開けた地域であるが、対象地域西側に高層マンション、南側に大型建物（展示場）があり、GPS 受信状況の悪い領域がある。

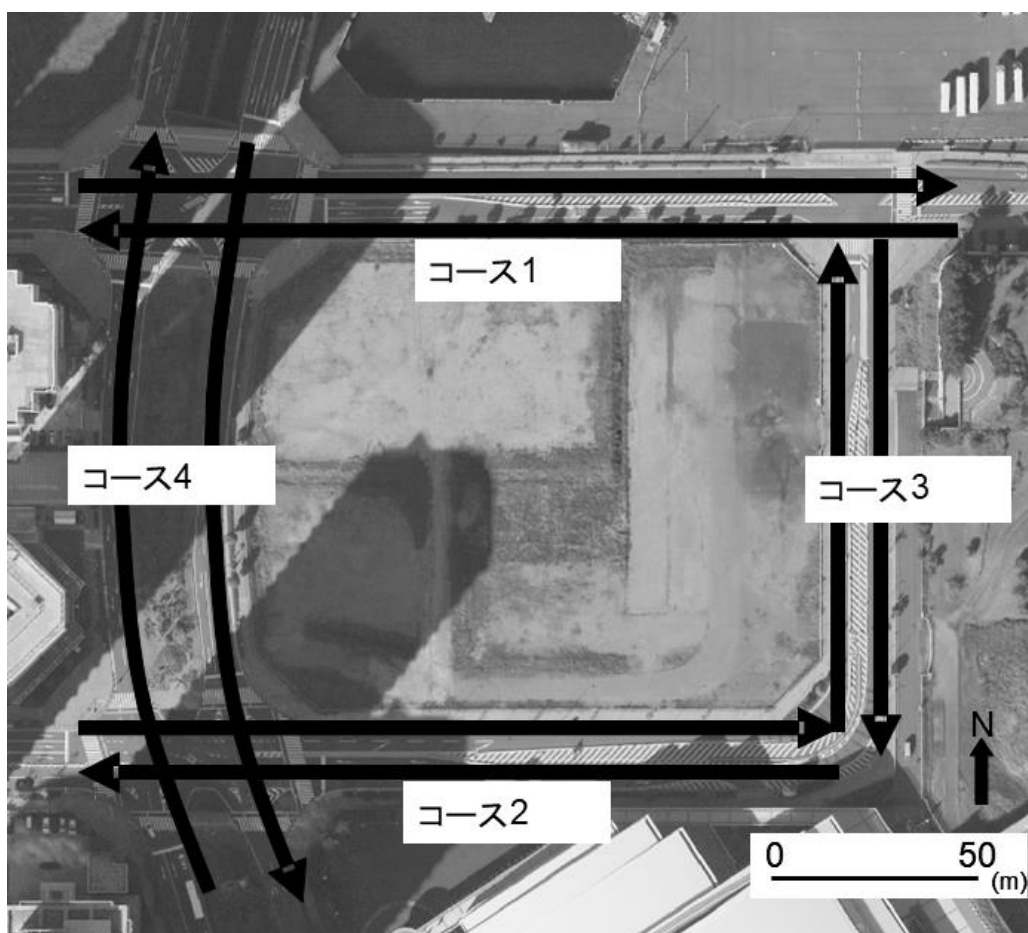


図 3-4 MMS 計測経路

(2) データ取得

1) MMS 点群の取得

本評価の MMS 計測は、2011 年 11 月 2 日に実施した。この時、理想的な計測環境下での経路と環境を劣化させた経路を複数種類設定した。地形図作成に用いる点群生成のための MMS 計測は、平均速度 30～40km/h で実施している。これを考慮し、車両姿勢が安定した状況を 10km/h とし、実作業を反映した状況を 30km/h とした。計測環境を劣化させた経路とは、GPS 受信状況の悪い（上空視界の悪い）経路である。コース 1・3 は理想的な計測環境下での経路、コース 2・4 は環境を劣化させた経路とした。図 3-4 にその MMS 計測経路を示す。ここで、コースとは設定した計測区間、シーンとは MMS の 1 回の計測で取得できるデータ単位を示す。

コース 1 は、東西に伸びる直線経路である。上空視界が開け GPS 受信状況が良好なコースである。また、交通量も比較的少なく、一定の速度での計測が可能である。コース 1 では、速度 10km/h で往復計 4 本、速度 30km/h で往復計 4 本の計測を行い、これをシーン

1,2,4,5,6,7,8,9 とした。更にコース 1 では、レーザが地物に照射される角度による位置精度への影響を評価するため、MMS の進行方向に対して、0 度(平行)、45 度(斜め)、90 度(垂直)の 3 つ設置角度の異なるターゲット板を計 9 枚設置した。

コース 2 は、対象地域南部の東西の直線経路である。コース南側に 3 階立ての展示場が立地しており、コース 1,3 に比べ、GPS 受信状況は悪いコースである。コース 2 では、速度 10 km/h で往復計 2 本の計測を行い、これをシーン 23,24,28,29 とした。

コース 3 は、対象地域東部、南北に伸びる直線経路である。上空視界が開け GPS 受信状況が良好なコースである。また、交通量も比較的少なく、一定の速度での計測が可能である。コース 3 では、速度 10 km/h で往復計 4 本、速度 30km/h で往復計 2 本の計測を行い、これをシーン 10,11,12,13,14,16 とした。

コース 4 は、対象地域西部、南北に伸びる直線経路である。コースの西部には高層のマンション群が存在し、他コースと比べると GPS 受信状況は最も悪いコースである。また交通量が多く、低速での計測ができない。コース 4 では、速度 30km/h で往復計 6 本の計測を行い、これをシーン 17,18,19,20,21,22 とした。

以上の計測データに対して後処理を施し、全 24 シーンの MMS 点群を生成した。

2) トラバース測量による骨格基準点網整備および TS による検証点の座標取得

絶対評価で用いる検証点の座標計測を行った。まずトラバース測量を用いた骨格基準点網を整備し、その基準点を与点とした TS 計測により検証点の座標を正確に取得した。

骨格基準点網の整備では、道路両側に 2 つの独立した基準点網を設定し、それぞれの網で 10 点・8 点の基準点を選定した。選定した基準点網の 2 点 (計 4 点) に対して 10 月 20 日に約 3 時間のスタティック GPS 測量を実施し、座標取得を行った。用いた機材はニコントリンブル社製 Trimble 5700 である。次にそれぞれの基準点網において、GPS 測量により求めた 2 点の基準点を始終点とした閉合トラバースによる誤差配分計算を行うことで、2 つの骨格基準点網を整備した。更に、検証点座標計測のための補助点を 20 点設け、2 つの網上の基準点から与点を選び、それぞれの網から補助点の座標を取得した。補助点の座標較差は、最大較差で水平 0.016m、高さ 0.024m であり、良好な位置精度であることが確認できた。この計測はトータルステーションにはニコントリンブル社製 S6 を使用して、10 月 20、21、25 日に実施した。

こうして取得した骨格基準点および補助点を与点とし、TS による計測で地盤と周辺構造物から構成する検証点の位置座標を取得した。この位置座標取得は、10 月 21、22、25 日、11 月 2 日に実施した。用いた機材はニコントリンブル社製 Trimble S6 である。地盤における検証点の取得では、道路などの地盤上で 128 点の座標を取得した。また、周辺構造物の検証点計測では、建物などの平坦な面を選定し、面ごとに四隅の座標を取得し、計 492 点 (123 面) の座標を取得した。更に、レーザが地物に照射される角度による位置精度への影響を評価するために設置したターゲット板の四隅の座標を取得した。

3.4.3. 軌跡解析におけるデータ品質評価

MMS で取得された GPS・IMU・DMI データを用い軌跡解析を行った。軌跡解析で用いた GPS 地上参照局として、対象地区から最も近い電子基準点「横浜」を使用し、その基線長は最大 3.4km であった。表 3-1 に実験計測により走行した全走行シーンの計測状況、GPS 衛星数、DOP 値、衛星不可視区間の割合を示す。今回の MMS では、4 コースで計 24 シーンのデータを取得した。また、衛星不可視区間の割合とは、計測コース区間内で、建物などの影響により GPS 情報が取得できなかった区間の割合を示す。表 3-1 の衛星不可視区間の割合を確認すると、コース 1, 3 では全シーンにおいて平均 5 個以上取得できており、衛星不可視区間もほとんどなく良好に計測できていることが確認できる。一方、コース 2, 4 においては、建物等の影響により上空の視界があまり開けていない場所を走行するため、GPS 衛星数の平均値が 5 個以下のシーンがある。特にコース 4 は、衛星不可視区間の割合が高く、GPS 受信不足による車両の位置・姿勢結果に精度劣化が高いと確認できる。シーン 20 は、全区間衛星不可視地区であり、GPS による車両位置の測位ができていない。そのため、以降の評価ではシーン 20 以外を対象とする。

以降の MMS 点群の位置精度評価を行うにあたり、車両軌跡解析の品質を確認しておくことは重要となる。時々刻々と GPS 衛星の配置条件変わる中で GPS 受信状況の違いが MMS 点群の位置精度へどう影響するのかも考慮して検討すべきである。ここでは、GPS 受信状況が良好であり走行シーン数の最も多いコース 1 と GPS 受信状況の最も悪いコース 4 に絞って検討する。

表 3-1 軌跡解析におけるデータ品質評価・重複率・安定度評価結果

コース	シーン	計測状況		軌跡解析におけるデータ品質評価			安定度評価											
		走行方向	走行距離 (m)	計画速度 (km/h)	実施速度 (km/h)	平均衛星数	平均DOP値	衛星不可視区間の割合 (%)	レーザの重複率 (%)									
									L1-L3 比較			L2-L4 比較						
								L1-L2	L1-L3	L1-L4	L2-L3	L2-L4	L3-L4	参照点数	RMS値 (cm)	参照点数	RMS値 (cm)	
コース1	1	W→E	321.5	10	5.9	5.4	3.27	0.0	0.8	71.6	0.0	1.5	85.9	0.1	76,758	8.7	1,378,034	3.5
	2	E→W	326.5	10	9.5	5.8	3.01	0.0	0.4	73.5	0.0	0.4	88.8	0.0	132,683	9.3	1,412,255	3.5
	4	E→W	314.2	10	9.7	6.6	4.02	0.1	0.5	71.0	0.1	0.7	87.5	0.1	123,373	9.5	1,309,975	3.7
	5	W→E	322.4	10	7.9	6.9	3.37	0.0	1.5	74.8	0.0	1.4	85.9	0.1	72,590	9.0	1,260,414	3.5
	6	E→W	325.0	30	12.7	6.8	2.95	0.0	0.7	64.7	0.1	0.9	86.1	0.1	44,827	9.6	553,673	4.7
	7	W→E	351.8	30	27.4	6.1	6.12	5.0	1.5	68.2	0.1	1.3	85.3	0.1	28,119	9.8	499,164	3.5
	8	E→W	316.2	30	25.2	6.6	3.12	0.0	0.4	72.0	0.1	0.4	87.8	0.0	51,636	9.6	503,956	3.8
	9	W→E	332.8	30	21.5	7.1	2.06	0.0	1.5	69.2	0.0	1.2	85.4	0.0	30,419	9.4	558,114	3.7
	最大値	-	351.8	30	27.4	7.1	6.1	5.0	1.5	74.8	0.1	1.5	88.8	0.1	132,683	9.8	1,412,255	4.7
	平均値	-	326.3	20	15.0	6.4	3.5	0.6	0.9	70.6	0.0	1.0	86.6	0.1	70,051	9.4	934,448	3.7
コース2	23	E→W	232.0	10	6.9	5.0	2.96	0.0	0.2	40.1	0.0	0.0	89.2	0.0	28,327	9.2	899,104	3.6
	24	W→E	253.1	10	12.2	5.6	2.41	12.6	0.7	61.3	0.1	0.3	88.5	0.1	89,781	9.5	860,674	3.8
	28	E→W	237.3	10	9.9	4.6	4.30	13.7	0.1	67.4	0.0	0.1	89.2	0.0	110,751	9.7	981,854	3.4
	29	W→E	281.4	10	16.8	2.7	4.56	50.3	1.0	62.8	0.1	0.4	87.9	0.1	66,048	9.6	673,930	3.5
	最大値	-	281.4	10	16.8	5.6	4.6	50.3	1.0	67.4	0.1	0.4	89.2	0.1	110,751	9.7	981,854	3.8
	平均値	-	250.9	10	11.4	4.5	3.6	19.2	0.5	57.9	0.1	0.2	88.7	0.0	73,727	9.5	853,891	3.6
コース3	10	N→S	160.1	10	9.7	7.9	2.40	0.0	0.6	90.0	0.1	0.4	88.5	0.0	63,562	8.4	699,253	3.2
	11	S→N	143.1	10	9.6	8.0	2.32	0.0	3.4	60.4	0.3	1.2	86.5	0.2	25,908	6.0	575,492	2.8
	12	N→S	165.6	10	8.2	7.3	2.28	0.1	0.6	90.3	0.1	0.5	89.7	0.0	78,681	8.5	869,283	3.1
	13	S→N	146.9	10	9.0	7.3	2.19	0.0	4.5	69.0	0.4	2.3	84.5	0.2	31,483	5.8	635,614	2.8
	14	N→S	167.6	30	19.3	6.9	2.44	0.0	0.6	82.8	0.1	0.4	81.5	0.1	24,802	9.2	315,437	3.6
	16	S→N	147.6	30	18.5	7.0	2.34	0.0	4.0	70.1	0.3	3.0	82.7	0.2	13,987	6.3	276,347	3.1
	最大値	-	167.6	30	19.3	8.0	2.4	0.1	4.5	90.3	0.4	3.0	89.7	0.2	78,681	9.2	869,283	3.6
	平均値	-	155.2	17	12.4	7.4	2.3	0.0	2.3	77.1	0.2	1.3	85.6	0.1	39,737	7.4	561,904	3.1
コース4	17	N→S	381.0	30	14.6	5.0	3.02	11.8	1.1	54.2	0.2	0.4	84.2	0.1	32,681	12.8	643,217	3.9
	18	S→N	283.0	30	9.4	0.7	3.09	87.7	0.5	54.1	0.1	0.1	88.0	0.0	58,343	11.1	611,057	3.9
	19	N→S	383.6	30	14.2	4.3	3.53	21.9	1.3	67.5	0.2	0.6	86.9	0.1	53,520	11.8	815,953	4.1
	20	S→N	334.8	30	27.9	No data	No data	100.0	0.6	60.7	0.0	0.4	85.4	0.1	79,180	12.1	483,506	4.9
	21	N→S	379.0	30	16.5	4.4	2.32	17.8	1.1	69.3	0.2	0.5	87.1	0.1	48,805	13.2	691,330	4.0
	22	S→N	332.9	30	9.3	2.1	2.64	57.5	1.1	56.8	0.1	0.6	88.6	0.1	137,673	10.8	916,431	3.5
	最大値	-	383.6	30	27.9	No data	No data	100.0	1.3	69.3	0.2	0.6	88.6	0.1	137,673	13.2	916,431	4.9
	平均値	-	349.1	30	15.3	3.3 ※	2.9 ※	49.5	1.0	60.4	0.1	0.4	86.7	0.1	68,367	11.9	693,582	4.1

※コース20を除いた値

全コース RMS値最大値(cm) 13.2 4.9
全コース RMS値平均値(cm) 9.5 3.6

3.4.4. 安定度評価

安定度評価では、同じ計測時間・同じコースにおいて、4台のレーザスキャナで取得されたMMS点群を用いて評価した。表3-1にシーン毎での軌跡解析におけるデータ品質評価・レーザスキャナの重複率、評価に使用したMMS点群の点数(参照点数)および安定度評価結果を示す。レーザの重複率とは、4台のレーザスキャナのうち2台を組み合わせ、これらのレーザスキャナで取得されるMMS点群間の重なりを割合で示した数値である。また、RMS値とは $\sqrt{\sum x^2/n}$ で算出する。ここで x は対応点間の較差距離、 n は参照点数である。

これを見ると、上向きレーザ2台の組み合わせ(L1-L3)、下向きレーザ2台の組み合わせ(L2-L4)の重ね合わせ以外には、L1-L2, L1-L4, L2-L3, L3-L4の4通りがあり、これら

の重複率はいずれも5%未満であり、ほとんど重複する区間が無いことが確認できる。上向きレーザ同士(L1-L3)、下向きレーザ同士(L2-L4)を見ると重複率が大きいので、重複区間が多くあることがわかる。表3-1の右端にこの2つのレーザスキャナの組み合わせL1-L3およびL2-L4比較によるMMS点群間較差のRMS値を示す。LS3Dでは、MMS点群間の対応面較差が0.6m以上の点についてはノイズと見なし、その点を比較対象外として2つのMMS点群間の較差を算出した。下向きレーザL2-L4比較では、RMS値は最大0.049m、平均0.036mの較差である。使用しているSICKレーザの距離精度0.035m [ジック株式会社, 2011]と同等の値を示しており、レーザの距離精度0.035mと同等の値を示しており、良好な結果といえる。一方、上向きレーザL1-L3比較では、RMS値は最大0.132m、平均0.095mの結果となり、L2-L4に比べ高い値を示している。本対象地区は、上向きレーザで照射できる物体は建物が少なく、ほとんど街路樹である。街路樹は複雑な形状や風等で揺らぎやすい性質のため、高い較差を示す結果になったと推測される。そこで以降の評価では、重複率が高くかつ較差の小さい下向きレーザ(L2-L4)の組み合わせに着目することとした。

MMS点群の空間的安定度は、下向きレーザ(L2-L4)の組み合わせで計測された幾つかのMMS点群から位置較差の空間分布から評価した。その結果の一例として、コース1・シーン1のMMS点群を選択し、L2-L4の位置較差の空間分布を図3-5に取りまとめた。(a)は車両軌跡位置を中心とした較差の2次元分布、(b)は車両速度、(c)は位置較差の3次元分布をそれぞれ示す。(a)からは、L2-L4で較差が $\pm 0.03\text{m}$ 以内(黄色・水色)であり、安定した計測が行われたことが確認できる。ただし、一部区間においては、0.03m以上の較差を示す区間が存在する。(a)の計測距離50m付近では、 -0.09m 程度(濃い青色)の較差を示す区間が存在した。50m付近は、交差点があり、車両の速度の変化が変化していることが(b)より読み取ることができる。一般に車両走行時、ブレーキを踏むと車両の前部が沈み、加速すると車両後部沈む。シーン全体の平均速度を表3-1の実施速度に示している。表3-1のようにシーン全体で評価すると走行速度の違いによる位置精度への影響は少ないが、図3-5のように部分的に評価すると速度変化による車両の姿勢変化が、MMS点群の位置精度に影響を与えたことが確認できる。走行速度の変化による影響を差し引くと、L2-L4のレーザスキャナ間の安定度は良好な結果が得られていることが確認できた。

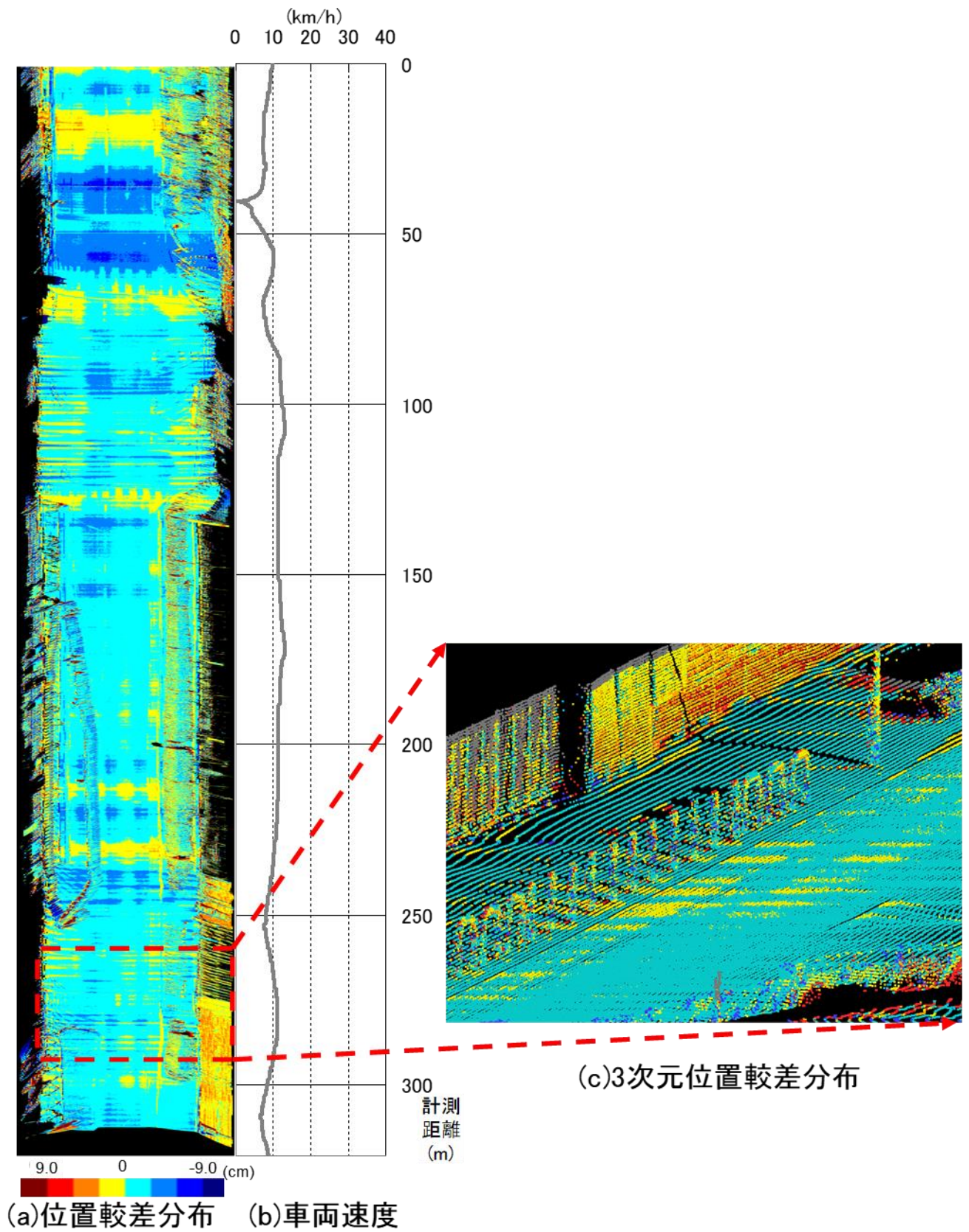


図 3-5 安定度評価結果

3.4.5. 相対評価

相対評価では、異なる計測時間、同じコース、同じレーザスキャナの MMS 点群を対象とした重ね合わせから、MMS 点群が一致するか評価を行った。表 3-2 にコース 1,4 の下前向き (L2) レーザスキャナの MMS 点群を比較した位置較差評価結果を示す。GPS 受信状況が良いコース 1 では、RMS 値 (5.2 と同様の算出式に従う) は 0.02~0.06m であった。一方、GPS 受信状況が悪いコース 4 の RMS 値は、0.03~0.13m を示す結果となった。ここでは、GPS 受信のなかったシーン 20 を除き、最も RMS 値が大きかったシーン 17 と 19 の比較を図 6 に示す。図 3-6 (a)には位置較差分布、(b)には車両速度、(c)には GPS 衛星数、(d)には DOP 値の分布を示しており、黒線がシーン 17、グレー線がシーン 19 における値を示している。(b)~(d)の図は、横軸は示している項目の各単位、縦軸は計測距離(m)となっている。また(a)の縦方向の単位は、(b)~(d)の各図の縦軸と対応している。

図 3-6 (a)をみると、基本的には $\pm 0.03\text{m}$ 程度の較差となっている。ただしコース内に縞状のバラツキがいくつか見られる。例えば、計測距離 30~50m 付近である。この付近の図 6(b)を確認すると、シーン 17 と 19 で車両速度が異なっていることが確認できる。シーン 19 の車両速度の変化は信号待ちによるものである。走行における減速、ブレーキ、加速の各行為は、車両の姿勢変化を大きくする要因となる。また付近は高層マンションの立地した箇所にもなっており、図 3-6 (c)、(d)においても 30~50m 付近で GPS 衛星数、DOP 値に変化がみられる。縞状のバラツキは、速度の変化による車両姿勢の変化、GPS 受信状況の変化が原因だと推測される。

図 3-6 (a)の計測距離 250m 以降の箇所において、一定区間較差分布がマイナス側に強く表示されている。この付近の図 3-6 (b)を確認すると両シーンとも一定の速度で計測されている。よってこの付近での較差のバラツキの要因は、30~50m 付近にみられたような車両姿勢による変化が原因でない。図 3-6 (c)、(d)をみてみると、GPS 衛星数が 0、すなわち GPS による車両位置の測位ができていない箇所がある。MMS は、GPS による車両位置が測位できない場合、軌跡の位置取得精度が劣化する。そのため GPS 測位精度の違いにより、測位精度が悪い区間について MMS 点群の面的な較差が現れたと考えられる。

以上より、相対評価を行うことで、GPS 受信状況が良好な地区では MMS 点群の重なり具合は高いことを確認することができた。また、図 3-6 の位置較差分布でバラツキが大きい箇所は、速度による影響、GPS 衛星数、DOP 値による GPS 受信状況変化の影響があることが分かった。

表 3-2 相対評価結果

コース名	走行方向	比較シーン		参照点数	RMS値 (cm)
		シーン名	シーン名		
コース1	W→E	1	5	1,406,678	2.2
		1	7	1,432,956	2.5
		1	9	1,433,451	2.9
		5	7	1,318,837	2.2
		5	9	1,319,063	2.7
		7	9	513,889	1.9
		E→W	2	4	1,389,927
	2		6	1,404,034	2.9
	2		8	1,359,208	2.8
	4		6	1,343,213	4.6
	4		8	1,323,500	5.5
	6		8	552,125	3.5
			最大値	1,433,451	5.7
			平均値	1,233,073	3.3
コース4	N→S	17	19	678,801	9.6
		17	21	678,259	3.4
		19	21	828,508	7.5
	S→N	18	20	614,920	13.1
		18	22	614,917	7.1
		20	22	441,403	9.8
			最大値	828,508	13.1
			平均値	642,801	8.4
					全コース RMS最大値
				全コース RMS平均値	5.0

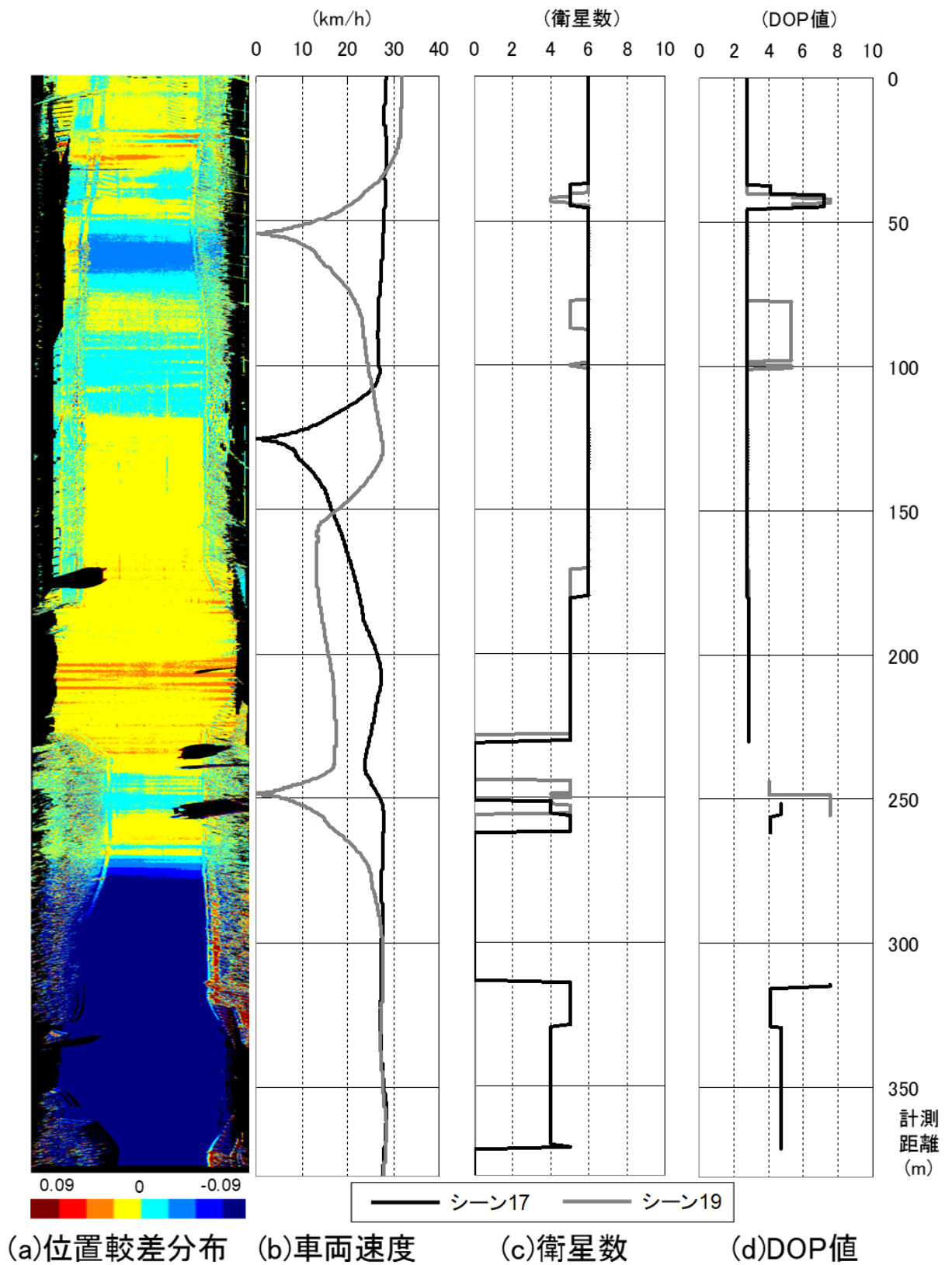


図 3-6 相対評価結果

3.4.6. 絶対評価

絶対評価では、検証点と MMS 点群による比較より、位置精度を評価した。ここでは、コース 1 とコース 4 の交差点付近、コース 1 とコース 3 の交差点付近の 2 地区を検証地区と設定した。TS により取得した検証点のうち、車両に対し直行する 3 軸 (図 3-1) に沿うようにターゲット板・建物壁面・地盤を選定した。なお、今回実証実験で用いた MMS のレーザスキャナは計測距離が最大約 30m である。コース 4 では、建物走行位置から建物までは 15m 程度あり、また、道路周辺に植栽が多く存在した。MMS 点群は、道路周辺は植栽を取得した点が多く、建物まで到達する点群が少なかった。そのため、コース 4 については Z 軸と直行した面の地盤のみ評価した。コース 1 については、車両走行軌跡より約 5~7m 離れた場所に取得した X・Y 軸方向の 6 面 (24 点) の検証点、地盤の検証点を 45 点用いて、絶対評価を行った。表 3-3 に各軸方向における位置較差評価結果を示す。コース 1 は、X・Y 軸方向の較差は最大で 0.07m であり、GPS 受信状況が良好な地区では、使用した MMS の持つ距離精度 7m 先で 0.1m と同等以上の位置精度であることが確認できた。特に、X・Y 軸の較差にくらべ、Z 軸の較差は全体的に高い値を示している。コース 4 については、隣接する建物の影響により GPS 受信状況が悪く、その影響でコース 1 に比べ位置精度が低下したと考えられる。特にシーン区間で GPS による車両位置の測位できなかったシーン 20 が最も較差が大きく RMS 値 (3.4.4 と同様の算出式に従う) とは 0.122m であったが、それ以外のシーンは 0.1m 以内であり、精度が十分満足できることが確認できる。こうした Z 軸較差が高くなる要因として、GPS の測位精度と Roll, Pitch の姿勢算出精度が挙げられる。ただし、いずれの経路も平坦且つ直線的な道路であるため、姿勢変化は少なく Roll, Pitch の姿勢算出精度が Z 軸較差に与える影響は少ないと考えられる。一方、GPS による測位精度は、一般に平面位置に比べ高さの精度が低い傾向がある。GPS 測位の影響により Z 軸方向の較差が高い値を示したと考えられる。更に、下前向き (L2) と下後向き (L4) の違いも絶対評価の差は少なく、同等の値を示していることが確認できた。そこで以降の評価については、下前向き (L2) レーザスキャナに着目した評価を行う。

表 3-3 絶対評価結果

コース名	シーン	X軸と直行面								Y軸と直行面								Z軸と直行面							
		参照点数		平均値 (cm)		最大較差 (cm)		RMS値 (cm)		参照点数		平均値 (cm)		最大較差 (cm)		RMS値 (cm)		参照点数		平均値 (cm)		最大較差 (cm)		RMS値 (cm)	
		L2	L4	L2	L4	L2	L4	L2	L4	L2	L4	L2	L4	L2	L4	L2	L4	L2	L4	L2	L4	L2	L4	L2	L4
コース1	1	803	201	-3.5	1.2	-5.5	2.4	3.5	1.3	334	29	1.8	2.3	4.8	4.1	2.1	2.6	69	57	2.1	3.3	5.5	4.0	4.5	3.4
	2	389	246	0.5	0.0	-1.9	-1.4	0.7	0.4	208	59	-0.4	-0.2	-5.2	-2.1	1.2	1.1	110	117	3.0	1.8	9.3	10.8	4.1	3.4
	4	386	237	2.8	-2.1	4.7	-3.3	2.9	2.2	209	56	-0.1	0.0	-4.4	3.3	1.7	0.6	114	123	8.7	7.0	11.5	12.9	9.0	8.3
	5	360	224	-2.0	0.8	-3.8	3.5	2.0	1.0	147	31	1.9	2.4	4.6	4.6	2.2	2.7	63	54	3.1	2.8	6.7	3.9	4.2	2.9
	6	118	72	1.5	0.0	5.1	4.0	1.7	0.5	58	19	-0.1	-0.4	-4.0	-5.4	1.6	1.4	114	117	5.0	3.6	10.4	13.9	5.5	4.6
	7	119	72	-1.2	-0.2	-2.7	7.0	1.3	0.5	53	10	2.2	2.4	4.6	4.9	2.6	2.7	42	54	6.8	4.2	10.8	5.2	7.5	4.3
	8	127	82	1.8	-1.0	2.8	-2.9	1.9	1.1	67	19	0.0	0.3	-3.7	-1.6	1.6	0.9	99	111	2.7	2.7	11.6	8.9	4.7	3.4
	9	119	142	-1.6	1.0	-3.6	2.2	1.7	1.1	52	20	1.9	2.6	5.6	5.2	2.5	3.0	60	51	-1.5	4.5	-7.0	9.8	5.7	5.9
	最大値	803	246	2.8	1.2	5.1	7.0	3.5	2.2	334	59	2.2	2.6	5.6	5.2	2.6	3.0	114	123	8.7	7.0	11.6	13.9	9.0	8.3
	平均値	303	160	-0.2	0.0	-0.6	1.4	2.0	1.0	141	30	0.9	1.2	0.3	1.6	1.9	1.9	84	86	3.7	3.7	7.4	8.7	5.7	4.5
コース4	17	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	63	63	6.1	3.7	11.5	-16.7	6.4	6.1
	18	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	63	51	6.0	5.3	9.2	7.1	6.5	5.5
	19	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	63	66	4.0	4.1	7.2	11.1	4.4	4.8
	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	63	39	12.0	12.2	15.3	13.8	12.2	12.2
	21	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	63	66	7.2	7.0	13.9	12.0	7.5	7.3
	22	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	63	51	7.2	7.9	11.3	9.4	8.8	8.0
	最大値	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	63	66	12.0	12.2	15.3	13.8	12.2	12.2
平均値	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	63	56	7.1	6.7	11.4	6.1	7.6	7.3	

L2・・・前下向きレーザーキャナを用いた位置較差比較
 L4・・・後下向きレーザーキャナを用いた位置較差比較

全コース RMS値最大値(cm) 12.2 12.2
 全コース RMS値平均値(cm) 7.4 6.7

3.4.7. クロスセンサ評価

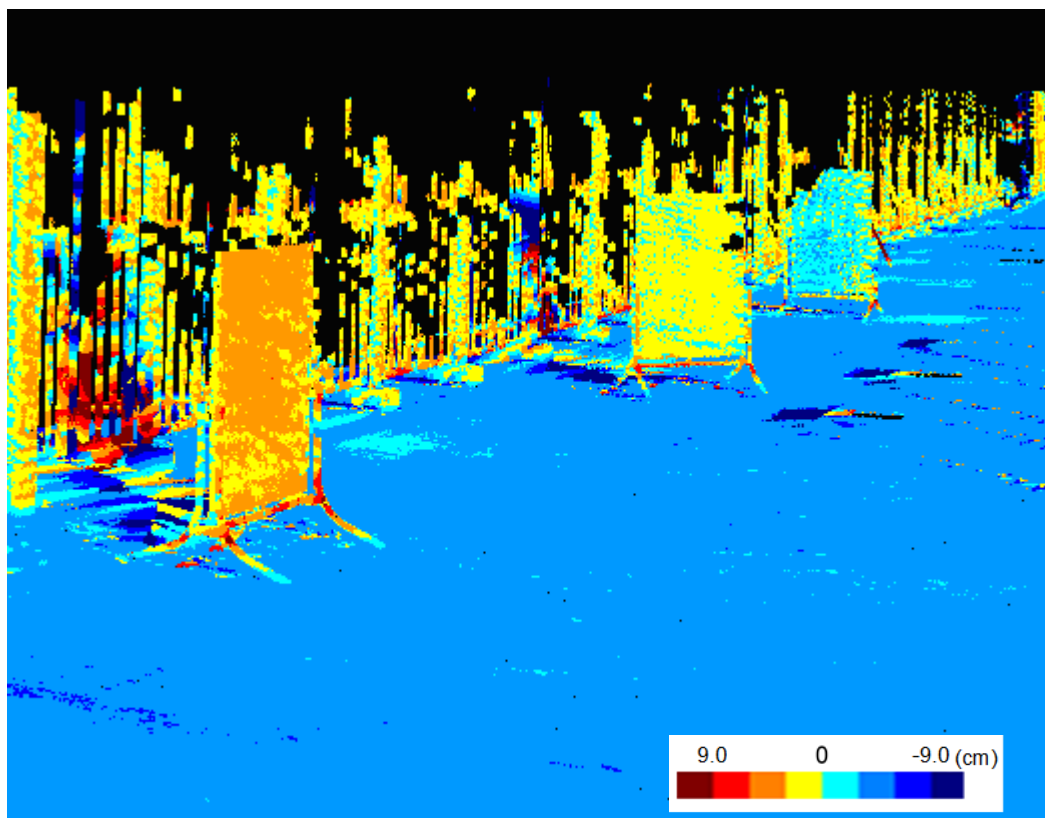
クロスセンサ評価では、MMS 点群と地上据え置きレーザスキャナ [Riegl Japan 株式会社, 2011]で計測された点群とを比較し、MMS の計測手法・レーザスキャナの違いによる固有性を評価した。ここでは、コース1と3の交差点区間を検証地区とし、MMS 点群と地上レーザ計測で取得した点群を用いてLS3Dによる評価を行った。図3-7(a)にターゲット板の実際の配置を示す。ここでは図3-7(a)の右端の道路をMMSで走行した。図中最も手前に見えるターゲット板は、車両進行方向に対して平行に設置したもので、次が45°、一番奥が90°である。図3-7(b)に位置較差分布、表3-4にMMS点群と地上レーザ計測で取得された点群間のRMS値(3.5.2と同様の算式に従う)を示す。表3-4のRMS値は、両進行方向に対して平行(設置角度0°)に設置したターゲット板を取得したMMS点群との較差が最も大きく0.044mであることが確認できる。図3-7(b)を見ると、ターゲットの設置角度による較差の違いは明瞭であり、図3-7(b)でも進行方向と平行に設置されたターゲット板の較差が一番大きいことがわかる。ただし、異なる位置における地上レーザ計測で取得された点群同士で比較した場合、図3-7(b)のようなターゲット板の設置角度の違いによる位置精度への影響は確認できなかった。MMSに搭載されているレーザスキャナは、距離精度 $\pm 0.035\text{m}$ を有し、一方、地上レーザスキャナは $\pm 0.005\text{m}$ である。一般にレーザ計測では、レーザが反射する際の角度が浅いと取得される座標は遠くに取得される傾向がある。ここでは、進行方向と平行に設置されたターゲット板はレーザ反射角度が最も浅く、距離精度の低いMMS点群で、反射角度が浅いと座標は遠くに取得される傾向がより顕著に現れた結果と考えられる。そのため、今回使用したMMS点群に対する位置精度評価では、走行方向と平行した面による位置精度への影響を留意する必要があると言える。

表 3-4 クロスセンサ評価結果

ターゲット板の設置角度(°)	0	45	90
地上据え置きレーザ点群の比較に用いた点数	6173	4089	2328
MMS点群の比較に用いた点数	120	629	334
平均値(cm)	4.2	1.5	-2.1
最大較差(cm)	8	6	6
RMS値(cm)	4.4	2.1	3.2



(a) ターゲット板の配置図



(b) 位置較差分布

図 3-7 クロスセンサ評価結果

3.4.8. 考察

表 3-5 に点群の位置精度評価のまとめを示す。表には、評価名、用いた指標、評価方法、RMS 値、評価により得られた知見の 5 項目を示している。

安定度評価においては、RMS 値が平均で 0.036m である。SICK レーザの距離精度 0.035m と同等な値を示めており、良好な結果が得られている。

相対評価では、位置較差の RMS 値の平均値が 0.05m 程度となった。GPS 衛星数、DOP 値の変化が大きい箇所で、較差が大きくなっていることが確認できる。該当箇所で MMS 点群の重ね合わせを行うことで、表 3-5 に示すより位置精度の高い MMS 点群を生成できることが示唆された。

絶対評価においては、X, Y, Z 軸方向(図 3-1 参照)それぞれでの較差を示している。ここで Z 値が X, Y 値に比べ、較差が大きい結果となった。GPS 測位においては、Z 値が一般に X, Y に比べ測位誤差が大きくなることが知られており、ここでもその影響が出たものと推測される。

クロスセンサ評価では、配置方向の異なるターゲット板毎に MMS 点群と地上据え置きレーザ点群間の位置較差の違いが確認でき、MMS 点群がレーザ照射方向において固有な特性を有していることがわかった。一般にレーザスキャナにより取得される点群は、照射距離が遠くなると位置精度・点密度がともに低下し、照射距離が近いと位置精度・密度がともに高くなると言われている。また、7m 先における MMS 点群の位置精度は 0.1m を有するとされている。いずれの評価においても RMS 平均値が 0.1m を上回る良好な結果が得られたことは、本評価で用いた MMS 点群の約 8 割が車両軌跡から 7m 以内で取得されたことから考えても、妥当な結果であると判断できる。

MMS 点群に対し、提案した位置精度評価を適用した結果から、MMS 点群全体の位置精度を定量的に把握できることが確認された。面的な評価結果は、GPS 受信状況や車両の速度・姿勢と MMS 点群との関係について、可視的かつ定量的に把握できることがわかった。さらに、市販されている MMS を用いた MMS 点群の面的な評価から、道路に隣接する壁などで反射角が深くなり誤差の少ない点群が取得でき、道路や地盤などでレーザの入射角度が浅くなり、MMS の走行位置から遠くなると点群の誤差が大きくなるといった課題が確認された。

表 3-5 点群の位置精度評価のまとめ

評価名	用いた指標	評価方法	RMS値(cm)		評価により得られた知見
①軌跡解析におけるデータ品質評価 Data Quality Assessment	・軌跡解析結果 ・GPS衛星数 ・DOP値	軌跡解析により得られた指標(衛星数、DOP値)を確認	-		・衛星数、DOP値などGPSの測位状況、軌跡解析結果を確認することで、MMS点群の位置精度に影響のある可能性のある区間を選定できる
②安定度評価 Precision Assessment	・LS3Dを用いた点群の位置較差 ・車両速度	同一シーン、複数MMS点群同士を対象に、MMS点群の位置較差を比較	平均値	3.6	・MMS点群間の位置較差分布は、±3cm程度と結果は良好 ・計測速度が変化した箇所では、車両姿勢変化の影響でMMS点群間の位置較差が大きくなる傾向にある
			最大較差	4.9	
③絶対評価 Absolute Accuracy Assessment	・実測で取得した検証点 ・GPS衛星数 ・DOP値	コース内に設定した検証物の実測座標とMMS点群による座標を比較	平均値	x:1.5 y:1.9 z:-5.1	・衛星数やDOP値が安定な箇所した箇所では、MMS点群の絶対位置正確度は高い
			最大較差	x:7.0 y:5.6 z:13.9	
④相対評価 Relative Accuracy Assessment	・LS3Dを用いた点群の位置較差 ・車両速度 ・GPS衛星数 ・DOP値	異なる計測時間、同じレーザスキャナを対象に、MMS点群の位置較差を比較	平均値	5.0	・計測速度が変化した箇所、衛星取得数やDOP値の変化がある地区は、車両姿勢変化の影響でMMS点群間の位置較差分布が縞状となる傾向にある ・衛星数やDOP値が不安定な箇所では、MMS点群間の位置較差が面的に大きくなる
			最大較差	13.1	
⑤クロスセンサ評価 Cross-sensor Accuracy Assessment	・地上据え置きレーザスキャナで取得した点群 ・LS3Dを用いた点群の位置較差	地上据え置きレーザスキャナで取得した点群とMMS点群の位置較差を比較	平均値	1.2	・ターゲットの設置角度を変えて検討した結果、MMS進行方向に対し、平行に置いたターゲット板で最も大きな位置較差が確認された
			最大較差	8.0	

3.5. 本章のまとめ

本評価では、MMS 点群全体の位置精度を評価手法の確立を目的として、軌跡解析によるデータ品質評価、安定度評価、絶対評価、相対評価およびクロスセンサ評価で構成する MMS 点群の位置精度評価手法を提案した。この手法の新規性は、MMS 点群全体の位置精度の評価を行うことである。実際のデータ取得および位置精度評価から、以下の知見を得ることができた。軌跡解析によるデータ品質評価では、GNSS の受信状態が著しく低下する区間を確認できることがわかった。安定度評価と相対評価では、異なるレーザスキャナと異なる時間で取得された点群の重複区間の重なり具合を評価し、点群全体で位置精度が低下する区間を確認できる。絶対評価では、確からしい値として TS などの地上測量で取得した検証点と比較し、位置精度を数値として評価できることがわかった。最後に、クロスセンサ評価では、移動計測を行う MMS の計測特性を評価するために、MMS 点群と地上設置型レーザ計測による点群の比較を行い、進行方向と横断方向において、位置精度の傾向が異なる MMS の固有性を確認できた。これら 5 つの評価により、GPS 受信状況や車両の速度・姿勢と MMS 点群との関係について、面的かつ定量的に把握でき、MMS 点群全体の位置精度を視覚的に評価できることが確認された。これらの結果から、本手法は MMS 点群全体の位置精度が評価できることが明らかになった。

また、本位置精度評価手法を用いて、MMS の計測特性と標準型 MMS の特性を明らかにした。MMS の計測特性は、標高の位置精度が平面位置に比べ誤差が大きい傾向があること、GPS 衛星数・DOP 値の変化が大きい箇所では誤差が大きくなる傾向を示すこと、レーザが反射する際の角度が浅い場合、角度が深いデータに比べ誤差が大きい傾向を示すことが確認された。標準型 MMS の特性は、図 3-2 で示すように取り付け角度が 25 度と 45 度のレーザスキャナで取得される点群が、道路に隣接する壁などで反射角が深くなり誤差の少ない点群が取得できること、道路や地盤などでレーザの入射角度が浅くなりやすく、MMS の走行位置から遠くなると点群の誤差が大きくなることが確認された。

4. 河川堤防計測用 MMS の製作と位置精度評価

4.1. はじめに

前章では、地形図や道路台帳平面図の作成に使用されている MMS type-X640 を標準型 MMS と位置づけ、MMS 点群全体の位置精度評価手法を確立するとともに、標準型 MMS の特性を明らかにした。その結果、標準型 MMS は、複数のレーザスキャナで取得される点群は GNSS 衛星数・DOP 値の変化が大きい箇所ではズレが生じること、角度が 25 度と 45 度のレーザスキャナで取得される点群は、地盤で角度が浅くなりやすく誤差が生じる恐れがある特徴が明らかになった。さらに、MMS type-X640 は、車両から 15m を計測対象としており、堤防全体やその周辺の地形を取得できない恐れがあることも確認された。これらの計測特性を踏まえ、河川計測用 MMS を製作した。本章では、河川計測用 MMS で取得した MMS 点群に対し、位置精度評価手法を適用し、点群全体の位置精度を確認した。

4.2. 河川計測用 MMS の製作

本節では、標準型 MMS の特徴を踏まえた河川計測用 MMS の改良点と搭載したセンサ、および車両の特徴を示す。

4.2.1. 河川計測用 MMS の改良点

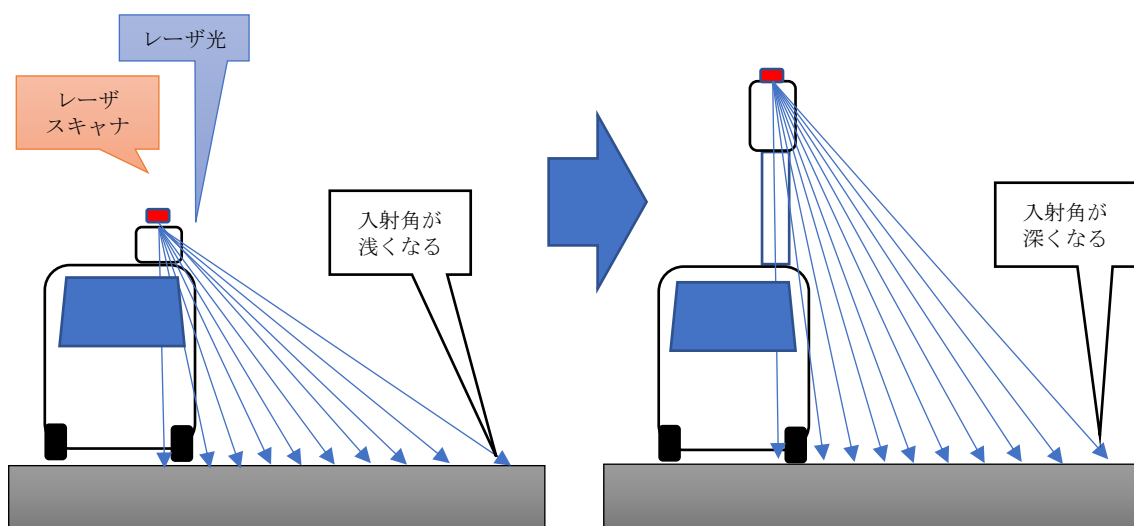
河川計測用 MMS の主な改良点を以下に示す。

- 1つのレーザスキャナの採用
複数のレーザスキャナを用いる MMS は、GNSS 衛星数・DOP 値の変化が大きい箇所では MMS 点群の重ね合わせ部分にズレが生じる。そのため、一台で 360 度方向に照射できるレーザスキャナを採用し、点群の重ね合わせによるズレの軽減を図る。
- 高精度 IMU の採用
標準型 MMS で取得される MMS 点群の位置精度は、走行速度の変化に影響を受けることが確認された。こうした走行速度の変化を捉える精度は、IMU の姿勢精度に依存する。そこで標準型 MMS より細かい時間間隔で且つ細かい姿勢精度が検出できる高精度 IMU を採用する。
- 拡散角が小さいレーザスキャナの採用
標準型 MMS は、レーザ入射角が浅い場合、正対した照射に比べ誤差が大きくなることが確認された。入射角度による誤差を軽減するために、標準型 MMS より拡散角が小さいレーザスキャナを採用する。標準型 MMS のレーザ径 (フットプリント) は、理論値で、10m 離れた位置の正対した面で 0.03m、70 度斜めの面で 0.088m となる。

河川計測用 MMS のレーザフットプリントは、 正対した面で 0.003m, 70 度斜めの面
で 0.009m となる。

● レーザスキャナの高所設置. 設置角度の設定

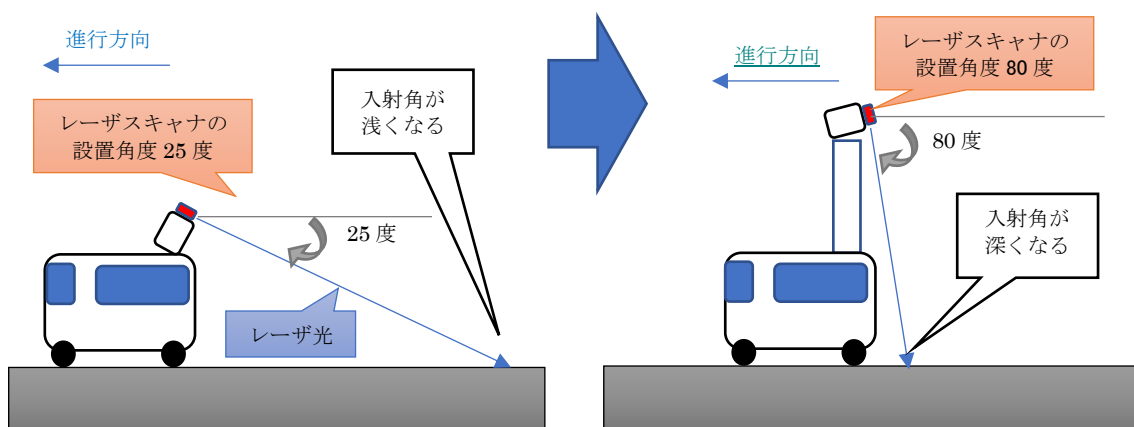
堤防天端に対して正対に近いレーザ照射ができるように, レーザスキャナの設置高
さと設置角度を改良する. レーザスキャナの高所設置の概念図を図 4-1 に, 設置角度
改良の概念図を図 4-2 に示す. レーザスキャナを高い位置に設置することで, 天端や
堤防法面へのレーザ照射角度を浅くなり難くする. また, 地面に対し垂直に近いレー
ザ照射ができるようにレーザスキャナの設置角度を設定することで, 堤防天端周辺に
対し正対に近づけたレーザ照射を行うことができる.



(a) 標準型 MMS のレーザスキャナ設置位置

(b) レーザスキャナの高所設置

図 4-1 レーザスキャナの高所設置による効果



(a) 標準型 MMS のレーザスキャナ設置角度

(b) レーザスキャナの設置角度の改良

図 4-2 レーザスキャナの設置角度の改良

4.2.2. 河川計測用 MMS に搭載したセンサ

河川計測用 MMS に搭載したセンサの仕様を表 4-1 に示す。使用した GNSS・IMU システムは、Applanix 社製 POSLV520 である [Applanix, 2017]。車両の自己位置を計測するセンサは、2 周波の GNSS アンテナを使い、車両の右側前後に 2 台を設置することで、自己位置のほか方位角の決定に用いる。自己位置は、キネマティック - GNSS 方式、又は VRS 方式で位置座標を算出することができる。また、車両の姿勢計測装置は IMU を用いて、長距離レーザスキャナの筐体内に 1 台を設置する。この IMU は、加速度および角加速度を 1 秒間に 200 回計測する性能がある。車速および走行距離を計測するために、1 台のオドメータを車道側後輪へ設置する。

搭載するセンサは、6 台のカメラと長距離レーザスキャナである。カメラは、Point Grey 社製で、 $2,448 \times 2,048$ のピクセル数を持ち、1 秒間に最大 10 フレームの撮影が可能である。レーザスキャナは、Riegl 社製の VQ-450 である。VQ-450 は 1 秒間に 55 万回 (550KHz) レーザを照射する能力があり、レーザの回転軸の全周 360 度を 1 秒間に最大 200 回転 (200Hz) して計測できる [Riegl Japan 株式会社, 2017]。この照射数をパルスレートおよび回転数をスキャンレートとよぶ。MMS のレーザ点の間隔は、車速と、パルスレートおよびスキャンレートで決定される。進行方向の点間隔はスキャンレートと走行速度で決定される。時速 10km/h で走行した場合の 1 秒間の走行距離は 2.8m で、この間、200 回転でスキャンした場合、1 回転あたりの走行距離すなわち点間隔は 0.014m となる。一方、進行方向直角方向のデータ間隔は、パルスレートとスキャンレートで決定される。パルスレートが 55 万回でスキャンレートが 200 回の場合、1 回転あたりのレーザ照射数は 2,750 回となり、 0.131° 間隔でレーザが照射され、10m 離れた位置の壁面上の点間隔は、0.023m となる。レーザ光の広がり角は 0.0003rad で、10m 離れた位置のフットプリントの直径は 0.003m、100m 離れた位置でのフットプリントの直径は 0.03m となる。

表 4-1 搭載センサの仕様

		性能
GNSS	取得間隔 計測方法	2周波 GNSS アンテナ 2台 RTK 又は VRS
IMU	取得間隔	200Hz
	姿勢精度	ロール&ピッチ角 0.005° ヘディング角 0.015°
オドメータ		1台
カメラ	台数	6台
	取得間隔	最大 10 フレーム/秒
	ピクセルサイズ	2,448×2,048 ピクセル
レーザスキャナ	台数	VQ450 1台
	パルスレート	最大 550KHz
	スキャンレート	最大 200Hz
	レーザ光の広がり角	0.3mrad
	計測精度	±0.008m
	照射角度	360°
	到達距離	最大 800m
	設置角度	可変
	設置高さ	地盤から 2.3m, 又は 3.6m

4.2.3. フレーム型 MMS と昇降型 MMS

河川計測用 MMS は、フレーム型 MMS と昇降型 MMS の 2 台を製作した。図 4-3 にフレーム型 MMS と昇降型 MMS を示す。河川堤防の堤体計測を行う際には、均等かつ高密な 3 次元点群を取得することや、堤防の堤体に垂直に近い形でレーザが照射されるのが理想となる。また、路肩等に設置されたガードレール等の構造物によってレーザが遮られることによる欠損域を低減させ、堤防法面等への照射角度を垂直（正対）に近く保つために、レーザスキャナを高い位置に設置した。レーザスキャナの設置高は、道路交通法の制限を超えない範囲の 3.6m とした。

2 台の河川用 MMS のうち、フレーム型 MMS は、レーザスキャナの架台をフレームで組み上げた構造で、比較的剛性が高く、車両の揺動等に対して耐性がある。計測対象地までは、フレームを倒した状態で固定して移動し、現地でフレームを立ち上げ、フレーム上にレーザスキャナの筐体を人力で設置する。このため、計測開始前の準備に時間がかかり効率性に問題がある。これに対し、昇降型 MMS は油圧式の昇降装置を車両内部に設置しており、機器設置は容易である。しかしながら、昇降装置に駆動部があることから、車両揺動の影響を受ける可能性がある。車両の揺動の影響を排除するため、河川計測用 MMS では、姿勢計測を行う IMU をレーザスキャナ本体付近に固定し、レーザスキャナの挙動を正確に測る構造とした。



図 4-3 フレーム型 MMS と昇降型 MMS (左：フレーム型 MMS, 右：昇降型 MMS)

4.3. 河川計測用 MMS で取得された点群に対する位置精度評価手法

前章で提案した MMS 点群の位置精度評価方法を用いて、河川計測用 MMS で取得された点群の位置精度を評価した。位置精度の評価手順を図 4-4 に示す。この評価は、前章で提案した安定度評価とクロスセンサ評価を実施しない。河川計測用 MMS で搭載しているレーザスキャナは1つであり、複数レーザスキャナで取得された MMS 点群の重なり度合いを評価する安定度評価は必要がないためである。クロスセンサ評価は、車両を用いた移動計測の計測特性を明らかにするために、地上据え置き型レーザ計測と MMS で取得された点群を比較した。河川計測用 MMS は、前章で評価した MMS type-X640 と同様に、車両に GNSS・IMU・DMI を搭載して自己位置と姿勢を取得する機種であるため、本評価は行わないものとした。

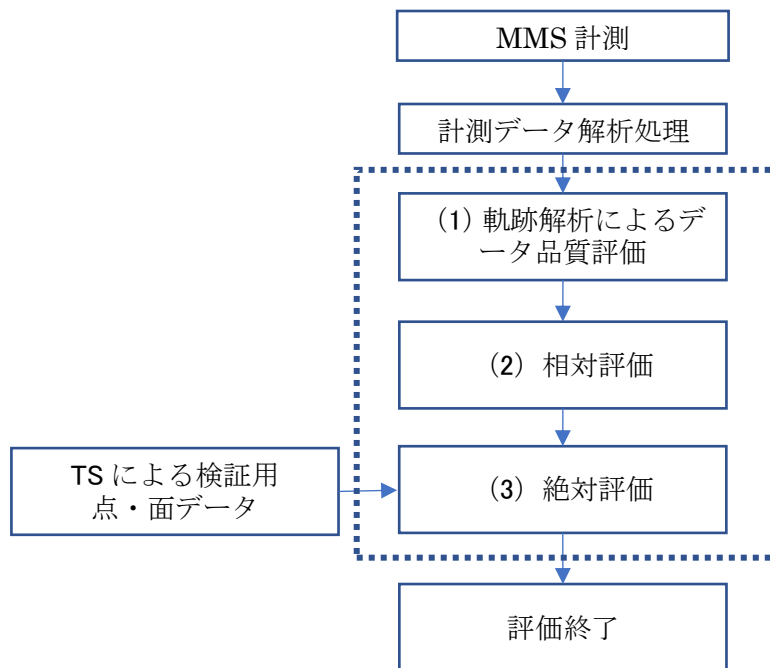


図 4-4 MMS 点群の位置精度評価手法

4.4. 河川計測用 MMS で取得された点群に対する位置精度評価

本節では、河川計測用 MMS を用いて、建物が存在する市街地において実験計測を行い、MMS 点群全体の位置精度を評価する。

4.4.1. 実験計測

本評価では、前章と同じ横浜市のみなとみらい地区で実証実験を実施した。GNSS の受信が良好に確保できるコースを対象に MMS による計測を実施した。GNSS の解析のためには、近傍に国土地理院設置の電子基準点「横浜」(電子基準点観測点番号 93032)があり、サイトまでの距離は約 4km である。図 4-5 は実証実験サイトの位置図を示す。本サイトでは、走行車線上の路面標示(横断歩道白線)の位置、建物の壁面の角等の 3 次元位置座標がトータルステーションにより実測されている。検証点の位置は、計測精度と距離の関係を把握するために、レーザの測定距離で 10m から 200m 程度となる範囲で選点している。図中の白線、建物 1、建物 2、建物 3 に検証点が設置されており、青線が MMS の 2 本の走行経路である。コース A は、前章で設定したコース 1 から西側に 150m 程度計測範囲を長くし、高層ビルや建物を計測できるようにした。コース A から路面標示(横断歩道白線)までの距離は 10m、建物 2、3、1 までの距離はそれぞれ 50m、100m および 150m である。コース B は、前章のコース 2 と 3 に大きな違いがないため、これらを合わせた計測範囲とした。コース B から建物 1 までが 20m である。データ取得時の走行速度を約 20km/h、レーザスキャナのパルスレートを 550KHz、スキャンレートを 50Hz に設定した。この設定での進行方向の点間隔は 0.11m、20m 先の壁面上の縦方向の点間隔は 0.011m となる。

データ取得は、フレーム型 MMS を 2013 年 10 月 3 日に、昇降型 MMS を 2014 年 9 月 3 日に行った。データ取得日に 1 年の違いがあるが、道路や検証に用いた建物・路面標示に経年的な変化はないことを確認している。

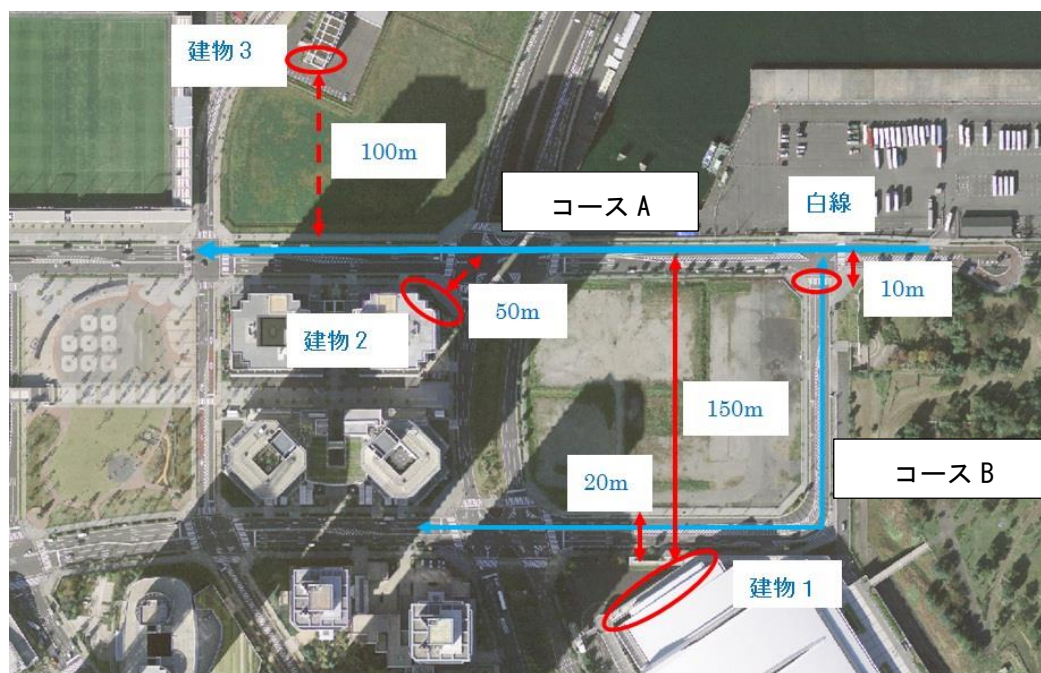


図 4-5 検証点位置と走行経路

4.4.2. 軌跡解析におけるデータ品質評価

この評価は、GNSS 受信状況が良好な区間において実施する。時々刻々と GNSS 衛星の配置条件変わる中で GNSS 受信状況の違いが MMS 点群の位置精度へどう影響するのかも考慮して検討すべきである。こうした GNSS 受信状況による位置精度への影響は、次章で検証で行う。

表 4-2 に実験計測により走行した全走行シーンの計測状況、GNSS 衛星数、DOP 値、衛星不可視区間の割合を示す。なお、GNSS による測位解析では GPS の衛星情報を、DOP 値は、PDOP(position dilution of precision)の値をそれぞれ用いた。今回の MMS では、2 コースで計 8 シーンのデータをそれぞれの MMS ごとに取得した。衛星不可視区間の割合とは、計測コース区間内で、建物などの影響により GNSS 情報が取得できなかった区間の割合を示す。表 1 の衛星不可視区間の割合を確認すると、全シーンにおいて、衛星不可視区間もほとんどなく計測できている。つぎに、衛星数 4 個以下の区間割合は、平成 26 年 9 月 3 日のシーン 11 と 12 の一部で受信した衛星数が 4 以下の区間が存在する。建物により一部の GNSS 情報が受信できなかった区間と考えられるが、区間が短いため、DOP は良好な値を示している。以上の評価から、全てのデータは、GNSS 受信状況が良好な区間で取得されたことが確認できた。

表 4-2 軌跡解析におけるデータ品質評価

機器名 ／ 実施日	コース	シーン	走行方向	走行距離 (m)	計画速度 (km/h)	実施速度 (km/h)	平均衛星数	平均DOP値	衛星不可視区間の割合(%)	衛星数4個以下の区間割合(%)
フレーム型 MMS ／ 平成 25 年 10 月 3 日	A	1	E→W	424	20	18.6	10.4	2.03	0.0	0.0
		2	W→E	380	20	26.8	10.2	2.18	0.0	0.0
		3	E→W	430	20	17.8	10.4	2.19	0.0	0.0
		4	W→E	453	20	14.7	10.1	2.33	0.0	0.0
		最大値	-	453	20	26.8	10.4	2.33	0.0	0.0
	平均值	-	422	20	19.5	10.3	2.18	0.0	0.0	
	B	5	N→S⇒ E→W	457	30	16.5	10.4	2.16	0.0	0.0
		6	E→W⇒ S→N	416	30	26.5	10.2	2.25	0.0	0.0
		7	N→S⇒ E→W	503	20	11.0	9.9	2.67	0.0	0.0
		8	E→W⇒ S→N	399	20	17.5	8.7	2.01	0.0	0.0
最大値		-	503	30	26.5	10.4	2.67	0.0	0.0	
平均值	-	444	25	17.9	9.8	2.27	0.0	0.0		
昇降型 MMS ／ 平成 26 年 9 月 3 日	A	11	E→W	507	20	23.8	9.57	2.13	0.0	1.3
		12	W→E	451	20	27.1	9.63	1.99	0.0	1.6
		13	E→W	507	20	12.0	9.84	1.89	0.0	0.0
		14	W→E	425	20	15.8	9.95	1.82	0.0	0.0
		最大値	-	507	20	27.1	9.9	2.13	0.0	1.6
	平均值	-	473	20	19.7	9.7	1.96	0.0	0.7	
	B	15	N→S⇒ E→W	378	20	19.2	10.46	1.77	0.0	0.0
		16	E→W⇒ S→N	394	20	21.4	9.54	2.06	0.0	0.0
		17	N→S⇒ E→W	418	30	20.5	9.72	2.11	0.0	0.0
		18	E→W⇒ S→N	389	30	22.9	9.61	2.13	0.0	0.0
最大値		-	418	30	22.9	10.5	2.13	0.0	0.0	
平均值	-	395	25	21.0	9.8	2.02	0.0	0.0		

4.4.3. 相対評価

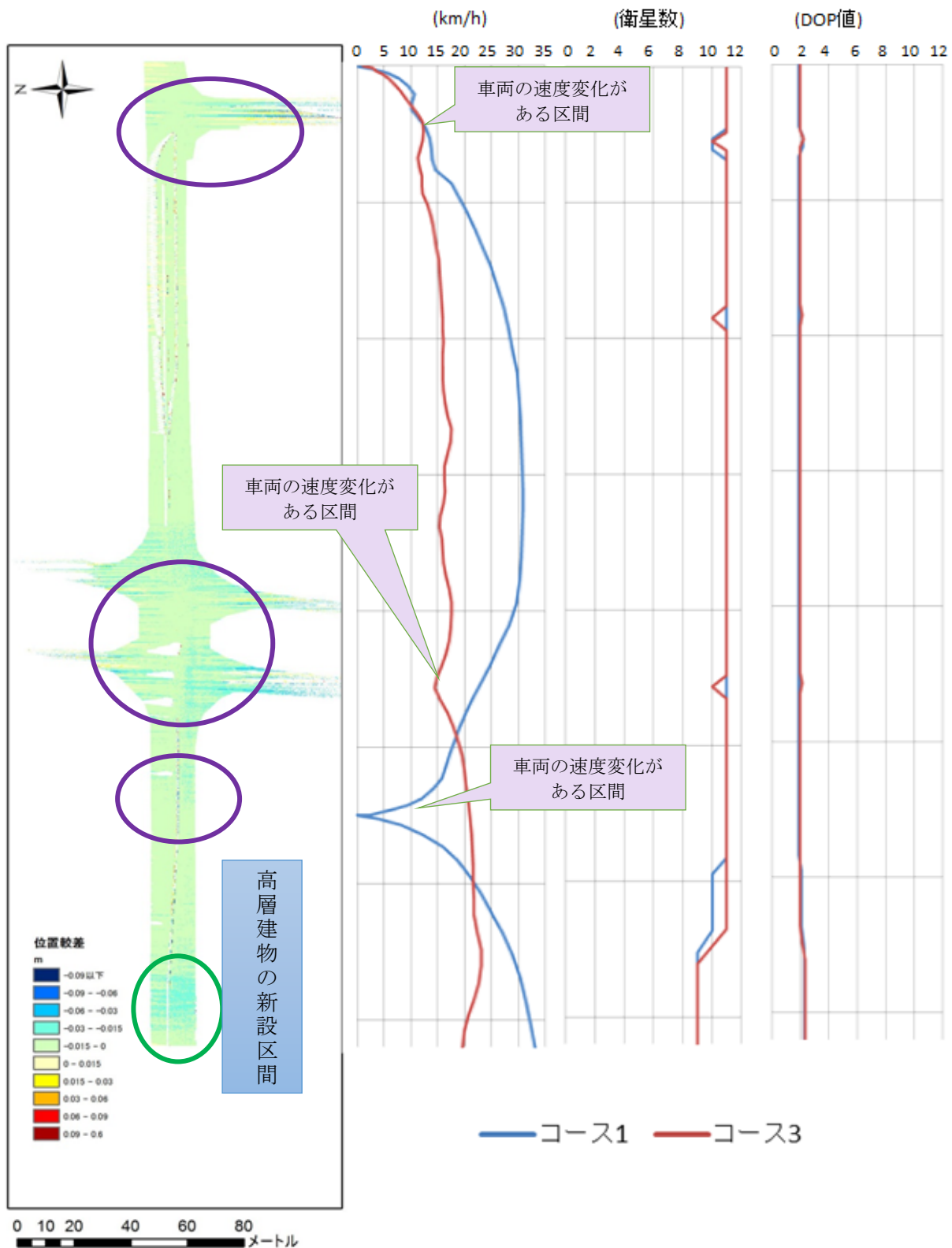
相対評価では、異なる計測時間、同じコース、同じレーザスキャナの MMS 点群を対象とした重ね合わせから、MMS 点群が一致するかの評価を行った。この評価は、MMS 点群から形状起伏が少なく、広い面を生成できる道路を評価対象とした。表 4-3 にフレーム型 MMS と昇降型 MMS のコース A,B ごとに MMS 点群から面を生成し、高さ方向の較差を比較した結果を示す。この結果、全ての標準偏差は 0.015m 以下の値を示すことが確認できた。河川計測用 MMS で使用しているレーザスキャナにおける計測誤差カタログ数値は、

±0.008m である。カタログで示される計測精度と同等な精度で計測できていることが確認できた。

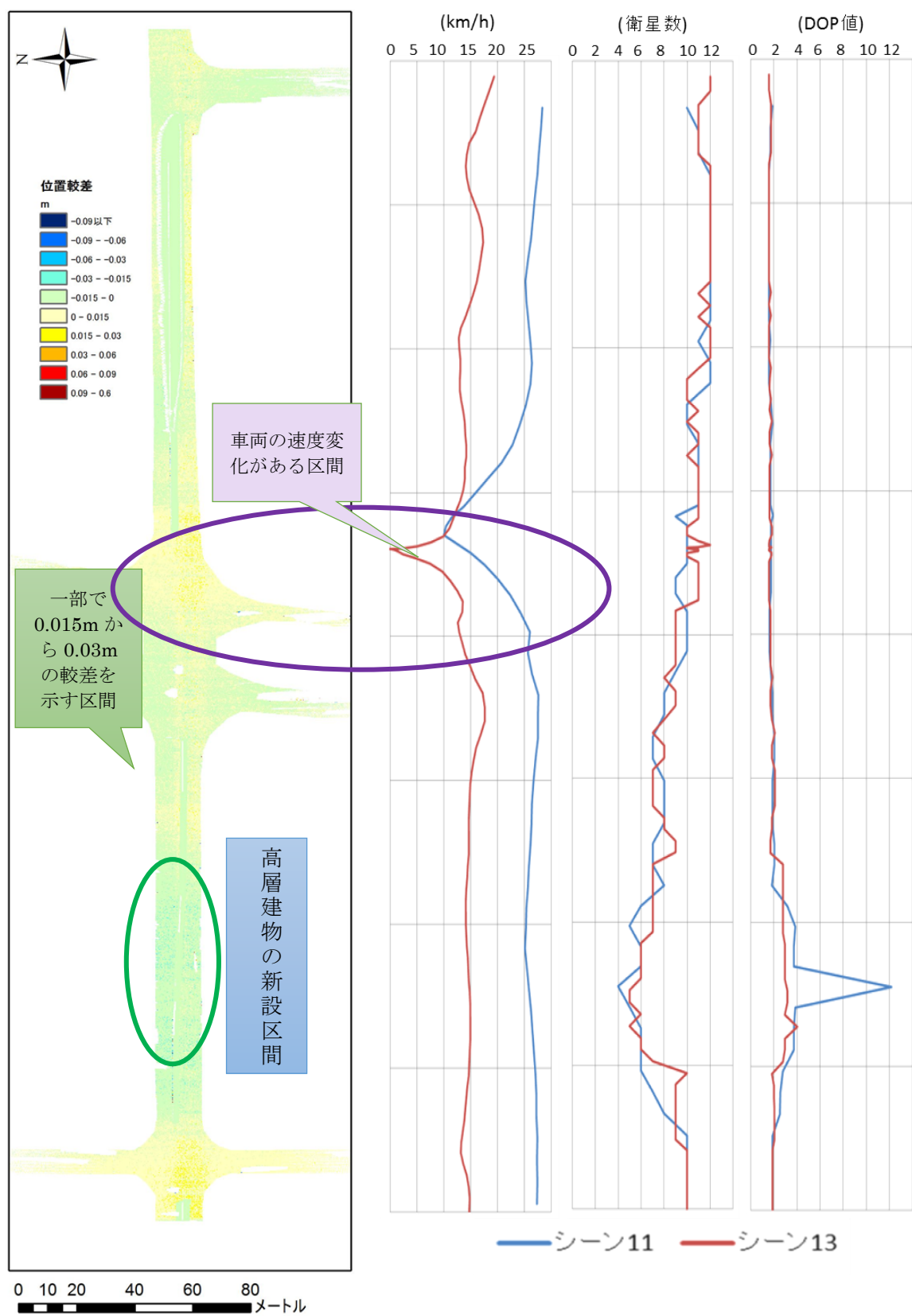
表 4-3 相対評価結果

機器名/ 実施日	コース	走行方向	比較シーン		参照点数	標準 偏差(m)
			シーン名	シーン名		
フレーム型 MMS / 平成 25 年 10 月 3 日	コース A	E→W	1	2	1,266,226	0.009
		W→E	3	4	931,661	0.012
	コース B	N→S⇒E→W	5	6	1,033,826	0.011
		E→W⇒S→N	7	8	993,606	0.014
昇降型 MMS / 平成 26 年 9 月 3 日	コース A	E→W	11	12	1,435,824	0.007
		W→E	13	14	1,417,832	0.013
	コース B	N→S⇒E→W	15	16	1,412,381	0.011
		E→W⇒S→N	17	18	1,252,166	0.016

つぎに、軌跡解析におけるデータ品質評価にて、衛星数 4 個以下の区間が確認されたコース A の東から西方向の走行に着目し、MMS 点群の重ね合わせ結果の分布図を確認する。フレーム型 MMS を用いて取得したシーン 1 と 3 の比較結果と、昇降型 MMS を用いて取得したシーン 11 と 13 の比較結果を図 4-6 と図 4-7 に示す。これらの図(a)には位置較差分布、(b)には車両速度、(c)には GNSS 衛星数、(d)には DOP 値の分布を示す。また、(b)~(d)の縦軸は計測距離(m)を示す。また(a)の縦方向の単位は、(b)~(d)の各図の縦軸と対応している。この結果、基本的には薄い緑色と黄色を示す±0.015 以内の較差であることが確認される。図 4-6 の紫丸で示す走行速度の変化がある区間では、周辺より較差が大きく 0.02m を示している。速度変化による機器の姿勢変化により若干 MMS 点群の位置精度が低下したと考えられる。一方、図 4-7 で示す昇降型 MMS は、速度変化による影響はフレーム型 MMS に比べ少ないことが分かった。ただし、いずれの結果も 0.02m 以下の較差であり、良好な精度であることが確認できた。つぎに、図 4-7 に示す緑の丸枠で示す高層建物が隣接する約 60m 区間に着目する。この区間は、建物のより一部の GNSS 衛星信号が遮断され、GNSS 衛星数と DOP 値が低下していると考えられる。この区間の相対評価結果は、周辺に比べ若干の較差が劣化しているもののフレーム型 MMS と昇降型 MMS とともに、0.015m から 0.03m 程度の較差に収まっていることが確認できる。MMS の位置情報は、GNSS による測位情報と IMU による慣性測位情報の結合処理により、高精度化を図る。約 60m 区間の GNSS 受信が不良な区間であれば、IMU の慣性測位情報により良好な位置精度を確保できていることがわかる。標準型 MMS の相対評価は、GPS 受信が良好な区間において、標準偏差で 0.019~0.057。河川計測用 MMS は、0.007~0.016 を示した。河川計測用 MMS に実施した改良により位置精度が向上したことも確認できた。



(a)位置較差分布 (b)車両速度 (c)衛星数 (d)DOP値
 図 4-6 相対評価結果 (フレーム型 MMS シーン 1 と 3 の比較結果)



(a)位置較差分布 (b)車両速度 (c)衛星数 (d)DOP値
 図 4-7 相対評価結果 (昇降型 MMS シーン 11 と 13 の比較結果)

4.4.4. 絶対評価

絶対評価では、前節で GNSS 衛星数や DOP 値が良好な値を示したシーンの MMS 点群と検証点による比較した。レーザ計測点には反射強度が記録されている。反射強度で色付けして表示することにより、白線とアスファルト路面のような反射強度が異なる部分を明確に判読できる。河川計測用 MMS は、点密度が高いため、3次元表示を行って検証点の位置を確認し計測を行うことが可能である。図 4-8 に検証点の計測例を示す。図中の緑の点が検証点の実測位置、赤の点が 3次元点群上の計測位置である。

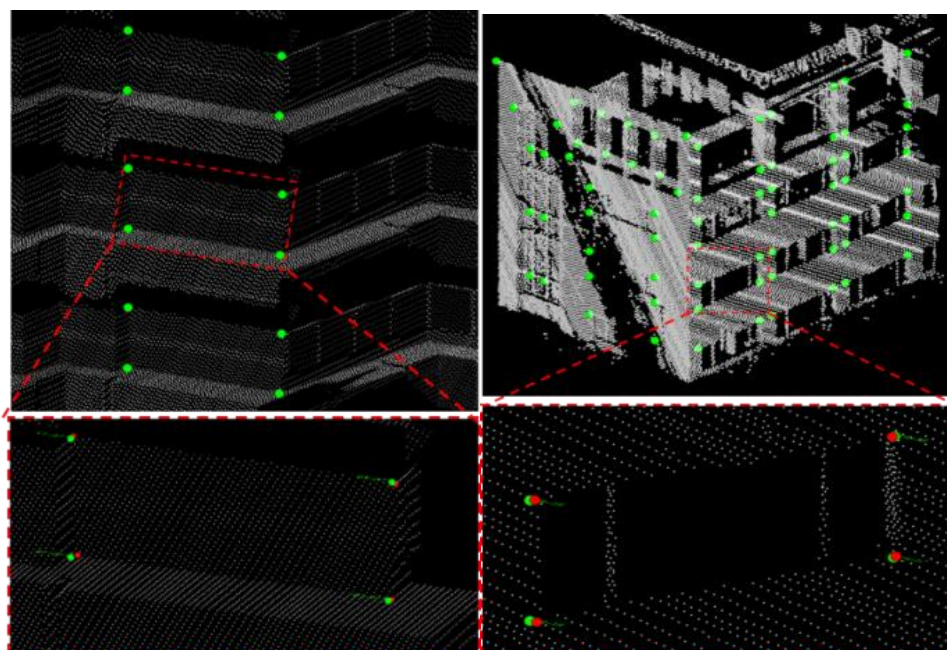


図 4-8 検証点の計測例 (左 : 50m 先, 右 100m 先)

表 4-4 と表 4-5 にレーザ点群上で計測した座標値と実測で計測された座標値による検証結果をまとめた。表中の dx , dy , dxy , dz , $dxyz$ はそれぞれ X 軸方向の較差, Y 軸方向の較差, 平面位置の較差, 標高の較差, 3次元較差である。個々の MMS の誤差量を, 最大較差, 最小較差, 較差の平均, 平均二乗誤差, および, 標準偏差で表す。それぞれの値を算出した式は, 以下の通りである。

$$DIS = OBS - TV \quad (4-1)$$

$$\overline{DIS} = (\sum DIS)/n \quad (4-2)$$

$$RMS = \sqrt{(\sum DIS^2)/n} \quad (4-3)$$

$$SD = \sqrt{(\sum (DIS - \overline{DIS})^2)/n} \quad (4-4)$$

ここで, DIS : 較差, OBS : 観測値, TV : 真値, \overline{DIS} : 較差の平均, RMS : 平均二乗誤差, SD : 標準偏差, n : 点数である。

表 4-4 フレーム型 MMS の検証点較差

フレーム型					単位 (m)
	dx	dy	dxy	dz	dxyz
検証点数	90	90	90	90	90
最大較差	0.101	0.082	0.102	0.057	0.154
最小較差	-0.076	-0.051	0.004	-0.080	0.014
較差平均	-0.005	-0.003	0.037	-0.013	0.049
平均二乗誤差	0.036	0.023	0.043	0.030	0.057
標準偏差	0.036	0.023	0.021	0.027	0.029

表 4-5 昇降型 MMS の検証点較差

昇降型					単位 (m)
	dx	dy	dxy	dz	dxyz
検証点数	107	107	107	107	107
最大較差	0.045	0.047	0.128	0.052	0.146
最小較差	-0.126	-0.085	0.006	-0.071	0.011
較差平均	-0.007	-0.011	0.036	0.006	0.042
平均二乗誤差	0.028	0.031	0.042	0.023	0.047
標準偏差	0.027	0.029	0.022	0.023	0.022

表 4-4 と表 4-5 から、平面上の較差および、標高の較差の平均二乗誤差は、フレーム型 MMS および昇降型 MMS 双方とも 0.05m 以下である。平面位置と標高の最大較差でも 0.13m と -0.08m で、検証点の位置を正確に精度高く計測できていることがわかる。

次に平面位置の 2 次元の誤差分布および、距離ごとの標高の誤差分布で確認した。平面位置の 2 次元の誤差分布を、図 4-9 に示す。この図は、河川計測用 MMS の結果で、左がフレーム型 MMS, 右が昇降型 MMS である。縦方向が南北を、横方向が東西を示している。誤差が小さい場合は、分布は原点に集中する。この結果から河川計測用 MMS の誤差が原点を中心として分布しており、偏りがなく系統誤差が無いことが確認できる。

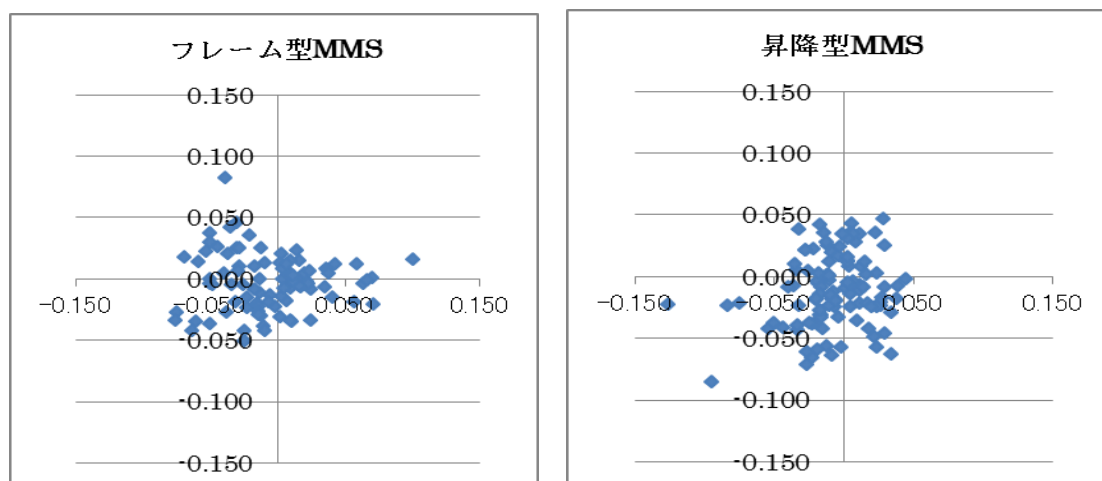


図 4-9 河川計測用 MMS の平面誤差分布

距離毎の標高誤差分布は、図 4-10 に示す。縦軸が標高誤差、横軸が計測距離である。この図より標高の誤差も縦軸 0 を中心に分布しており、系統誤差もなく精度が高いことが確認できる。

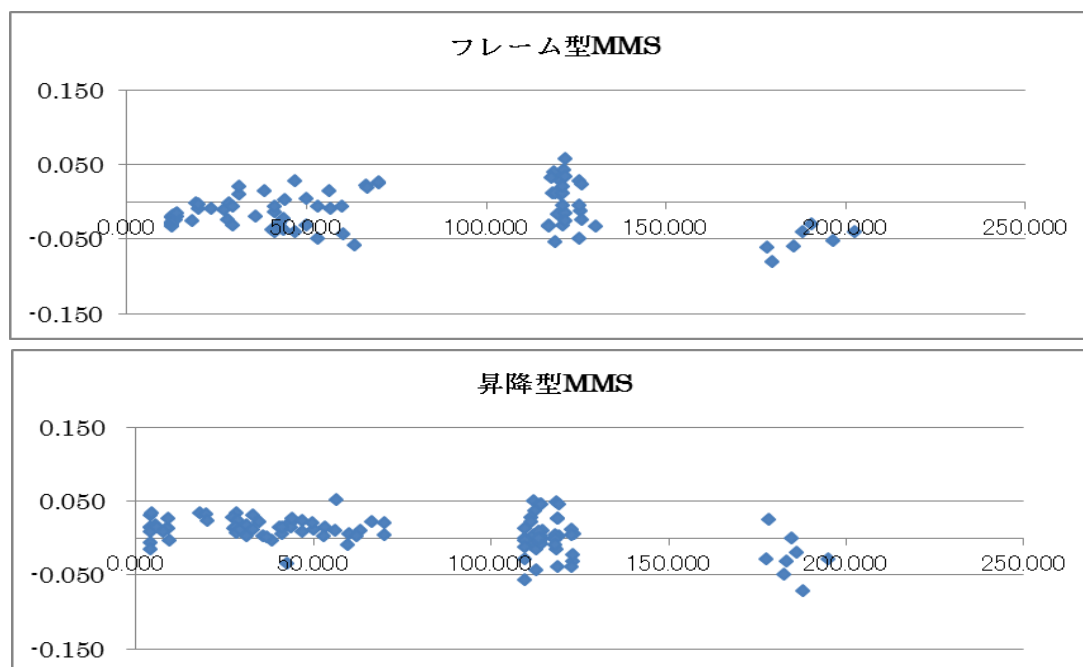


図 4-10 河川計測用 MMS の標高誤差分布

検証点の誤差の3次元較差を距離毎にまとめたものが、表 4-6 である。MMS からの距離に対するの誤差量を、最大較差、最小較差、較差の平均、平均二乗誤差、および、標準偏差で表す。20m 程度の近距離における平均二乗誤差は、0.03~0.04m 程度である。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

が得られている。また、標準偏差はすべてのケースで 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る。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、高い計測性能を有していることが確認できた。

表 4-6 精度検証の結果

		10m 付近	20m 付近	50m 付近	100m 付近	150m 付近	全体
フレーム 型 MMS	検証点数(m)	18 点	12 点	26 点	27 点	7 点	90 点
	最大較差(m)	0.052	0.057	0.090	0.086	0.154	0.154
	最小較差(m)	0.021	0.022	0.014	0.016	0.102	0.014
	較差の平均(m)	0.036	0.032	0.039	0.057	0.127	0.049
	平均二乗誤差(m)	0.037	0.034	0.042	0.059	0.128	0.057
	標準偏差(m)	0.008	0.010	0.018	0.018	0.019	0.029
昇降型 MMS	検証点数(m)	15 点	11 点	30 点	43 点	8 点	107 点
	最大較差(m)	0.045	0.056	0.081	0.076	0.146	0.146
	最小較差(m)	0.022	0.018	0.016	0.011	0.031	0.011
	較差の平均(m)	0.034	0.040	0.051	0.035	0.069	0.042
	平均二乗誤差(m)	0.035	0.041	0.053	0.038	0.083	0.047
	標準偏差(m)	0.007	0.010	0.017	0.017	0.049	0.022

4.4.5. 考察

絶対評価では、20m 程度の近距離における平均二乗誤差が、0.03~0.04m 程度である。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ている。また、標準偏差はすべてのケースで 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る。

相対評価では、走行した路面周辺における位置較差の標準偏差が 0.015m 程度であり、GNSS 衛星数、DOP 値の変化が大きい箇所、若干較差が大きくなっていることが確認できる。[橋菊生, 2015]は、これらの検証結果から、河川計測用 MMS で取得される点群の誤差は、式 (4-5) に示すように GNSS による自己位置測定誤差、IMU による自己姿勢測定誤差、レーザの測距誤差、および、レーザの取り付け後のキャリブレーション角度誤差に起因することを示した。

$$RES_{xyz} = \sqrt{E_{GNSS}^2 + E_{IMU}^2 + E_S^2 + E_C^2} \quad (4-5)$$

ここで、 E_{GNSS} : GNSS による自己位置の誤差

E_{IMU} : IMU による自己姿勢誤差に起因する誤差

E_S : レーザの性能に起因する誤差

E_C : レーザの取り付け後のキャリブレーション角度誤差に起因する誤差

表 4-7 に、河川計測用 MMS の機器仕様を示す。この仕様数値を各誤差要因の誤差量として上記の式に代入し、理論精度を計算した。レーザのフットプリントの大きさに起因する誤差は、フットプリントの直径の 1/2 と仮定して計算している。

表 4-7 レーザスキャナのカatalog仕様

誤差要因	仕様
GNSS による自己位置測定誤差 (E_{GNSS})	60mm
IMU による自己姿勢測定誤差	
ロール (E_r)	0.005 度
ピッチ (E_p)	0.005 度
ヘディング (E_h)	0.015 度
レーザの測距誤差 (E_{ld})	10mm
レーザの姿勢計測誤差 (E_{la})	0.001 度
レーザ光の広がり角 (D_v)	0.0003rad
キャリブレーション誤差	
ロール (E_{mr})	0.005 度
ピッチ (E_{mp})	0.005 度
ヘディング (E_{mh})	0.015 度

また、図 4-11 は、表 4-6 に示した距離毎の検証点の 3 次元較差と、上記の理論精度を示した。縦軸が検証点の 3 次元較差、横軸が測定距離である。レーザの取り付け後のキャリブレーション誤差が無いと仮定した場合の理論精度を青の線で、レーザの取り付け後のキャリブレーション誤差が IMU の自己姿勢測定誤差の 2 倍と仮定した場合の理論精度を緑の線で示す。図 4-11 より、MMS の理論精度は、レーザの取り付け後のキャリブレーション誤差がないと仮定した場合、測定距離が 20m 程度までは GNSS による自己位置測定の誤差とレーザの測距誤差が支配的であり、角度の測定誤差による位置精度の劣化はほとんどない。測定距離 20m 位置における理論精度は 0.06m 程度となる。以降、測定距離が長くなるに従って比例的に誤差が増大し、測定距離 200m で 0.09m 程度の精度となる。また、レーザの取り付け後のキャリブレーション誤差が IMU の自己姿勢測定誤差の 2 倍と仮定した場合においても理論精度は、20m 付近まではほとんど影響を受けない。

以上より、河川計測用 MMS では、20m 程度までの近距離においては GNSS の位置計測精度が最終的な計測精度に影響を及ぼし、20m 以遠では IMU の姿勢計測誤差およびレーザの取り付け後のキャリブレーション誤差の影響等を受けて徐々に精度が劣化することが明らかになった。河川計測用 MMS の計測精度は、近距離においては GNSS の位置計測精度と同等の精度が得られること、IMU は車両の揺動や振動によるレーザの挙動を正確に計測できること、遠距離の計測精度は、IMU による姿勢計測精度とレーザスキャナの性能、およびレーザの取り付け後のキャリブレーション精度に影響を受けることが確認できた。

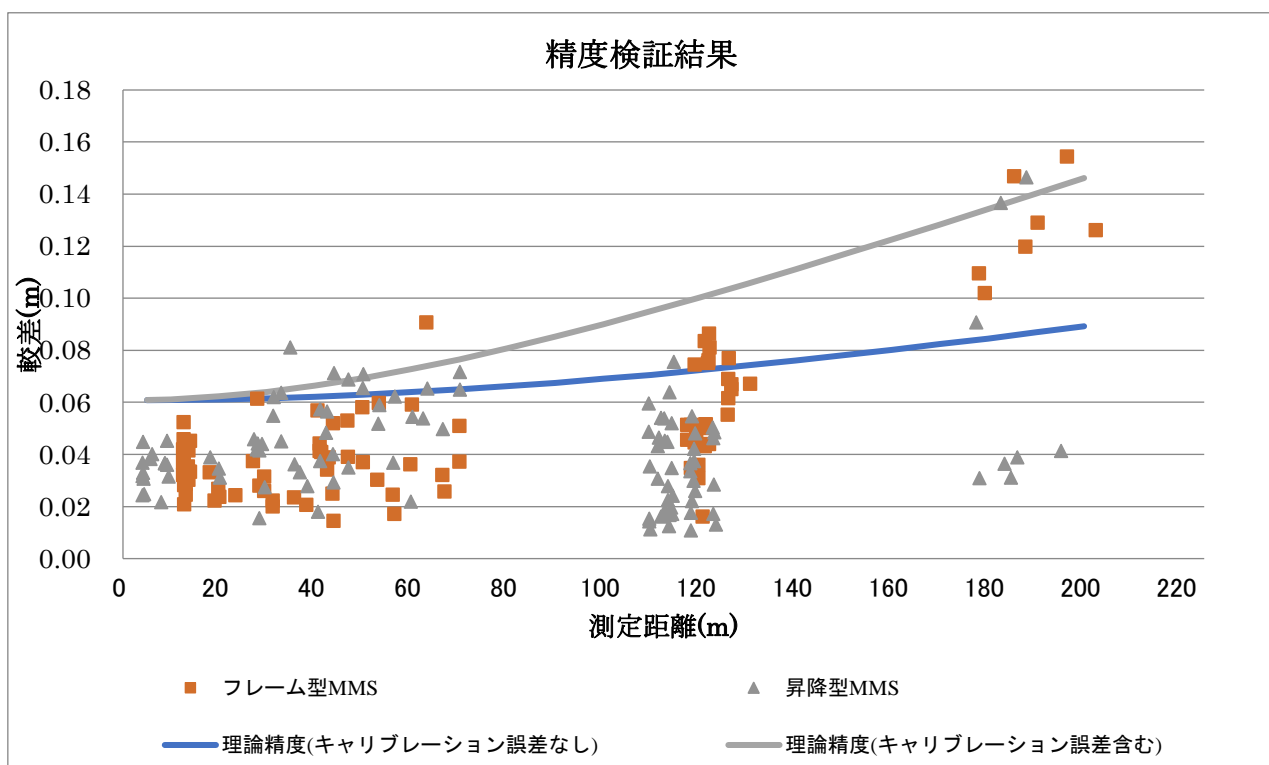


図 4-11 精度検証結果

4.5. 本章のまとめ

本章では、河川計測用 MMS を製作し、取得される点群の位置精度を検証した。

河川計測用 MMS の製作では、前章で確認した標準型 MMS の計測特性を踏まえ、レーザスキャナ 1 台と高精度 IMU を搭載し、さらに、レーザスキャナの設置高さや設置角度の改良を実施した。そして、河川計測用 MMS で取得した MMS 点群に対し、位置精度評価手法を適用し、点群全体の位置精度を確認した。

レーザスキャナの高所設置や設置角度の改良を加えた MMS で取得した点群は、20m 程度までの近距離においては GNSS の位置計測精度が最終的な計測精度に影響を及ぼし、20m 以上では IMU の姿勢計測誤差およびレーザの取り付け後のキャリブレーション誤差の影響等を受けて徐々に精度が劣化することが明らかになった。河川計測用 MMS の計測精度は、近距離においては GNSS の位置計測精度と同等の精度が得られること、IMU は車両の揺動や振動によるレーザの挙動を正確に計測できること、遠距離においてはレーザの取り付け後のキャリブレーションの精度に計測精度が影響されることが確認できた。この結果より、MMS が堤防天端を走行する場合、天端周辺は GNSS の位置計測精度と同等の精度を確保した面的（連続的）な 3 次元データを得られることがわかった。

ただし、本検証は、対象範囲約 1 km の市街地区間での実験計測である。河川堤防は、その長さが数 km 以上におよび、帯状に長い構造物がある。こうした河川堤防特有の環境下において、維持管理に必要な位置精度を確保した連続的な 3 次元データを取得するための MMS 計測手法を整理する必要がある。

5. 河川堤防における MMS 計測方法の検討

5.1. はじめに

2章にて、河川堤防における過去の災害とその要因を整理し、河川の維持管理では、0.1m程度の堤防高の変化を漏れることなく把握し、治水に必要な堤防高の維持や洪水時に土の嵩上げなどによる的確な対策を講じることが求められた。また、軟弱地盤地で破堤した区間で、0.05m から数十cmの沈下や変状が堤防点検により把握されたことから、0.05m程度の高さ変化を伴う変形・沈下状況を漏れなく把握する必要があることも確認された。3章にて MMS 点群の位置精度評価方法を確立し、4章にて、河川に最適な河川堤防計測用を製作し、その MMS 点群に対し位置精度を評価した。しかし、これらの検証は、対象範囲約 1 kmの市街地区間での実験計測である。数 km 以上におよぶ帯状に長い河川堤防の環境下において、MMS 点群の位置精度は評価されていない。

そこで本章では、実際の河川堤防において MMS 計測を行い、MMS 点群の位置精度を具体的な数値で評価する。さらに、維持管理に必要な要求精度を確保した連続的な 3次元データを取得するための MMS 計測手法を整理する。その要求精度は、河川堤防高の把握で 0.1m の位置精度、変形・沈下の状態把握で 0.05m の位置精度である。

5.2. 河川堤防の MMS 計測で想定される誤差要因と検証内容の整理

本節では、河川堤防における MMS 計測で想定される誤差要因を整理し、位置精度を確保した MMS 計測を実現するために必要な検証内容を整理する。

5.2.1. 河川堤防の MMS 計測で想定される誤差要因の整理

本項は、河川堤防での MMS の計測精度に影響を及ぼす誤差要因を整理する。まず、MMS 点群のデータ生成方法を整理する。4章では、MMS が堤防天端を走行する場合、天端周辺における MMS 点群の位置精度は、GNSS の測位精度と同等であることが確認された。そこで、GNSS 観測に及ぼす誤差要因を整理する。さらに河川の維持管理と MMS 計測における標高の基準の違いによる影響も具体的な数値で把握する。

(1) MMS 点群のデータ生成

MMS 点群のデータ生成工程は、MMS の位置姿勢算出と、MMS 点群生成の 2 つに分けられる。MMS の位置姿勢算出では、GNSS、IMU および DMI で計測した結果から MMS 車両の位置姿勢情報を算出する。位置情報は、GNSS 受信データからキネマティック解析により算出した測位結果、IMU による慣性航法結果、および DMI の距離情報を結合し、それらの較差が最小となる位置情報を確からしい値として算出する。また、姿勢情報は IMU の取得データから算出する。MMS 点群生成では、得られた車両の位置姿勢情報とレーザスキャナの距離情報からレーザ計測点を再現し、MMS 点群を生成する。

(2) 車両位置計測の誤差要因

車両の位置情報に影響を及ぼす GNSS 観測の誤差要因を整理する。主な誤差要因は、電波伝搬関連の誤差、建物や地表からの反射波（マルチパス）による誤差、および GNSS 信号が遮断される衛星不可視の誤差に分類できる [中川雅史, 2015], [小白井亮一, 2010]。

電波伝搬関連の誤差は、電波が電離層や対流圏を通過する際に受ける影響に起因する。一般に、既知点（固定局）と未知点（MMS）の距離（基線長）が短ければ、電離層や対流圏の状態はほぼ同じなので、高い精度確保した測位ができる [臼井澄夫, 2011]。GNSS を利用した基準点測量では、既知点と未知点の基線長が 10 km 程度であれば、高い精度で測位できることが確認されている [国土交通省国土地理院, 2016]。しかし、帯状に長い河川堤防では、基線長が長くなり、MMS 取得データの位置精度が低下しやすい。こうした基線長による MMS 計測への位置精度の影響を具体的な数値で示した事例は少ない。また、基線長を仮想的に短くする GNSS の測位技術として、VRS 方式や FKP 方式がある。著者らは、FKP 方式による MMS を用いた精度検証を行い、河川堤防における MMS 計測での位置精度を示した [橘菊生, 2015]。一方で、VRS 方式による MMS 点群の位置精度を具体的な数値で把握した事例はない。

マルチパスによる誤差を軽減する対策として、車両の位置計測における結合処理では、短い区間で GNSS 測位結果と IMU の慣性航法結果に大きな較差がある場合、GNSS にマルチパスがあると判断して、GNSS 測位結果を用いないことで、位置精度の向上を図る。特に、加速度の観測性能が高い IMU を用いる場合は、その向上効果が高いことが確認されている [小島祥子, 2015]。高精度な加速度観測精度を持つ IMU を採用している河川計測用 MMS は、マルチパスによる誤差の影響は少ないと考えられる。

衛星不可視に対する誤差を軽減する対策として、MMS を用いた地図生成では、地上測量により位置座標を取得した標定点を用いて、位置合わせ処理が行われる [今西暁久, 2011] [国土交通省国土地理院, 2016]。一方で、MMS を堤防形状の計測に適用した既往研究がいくつかあるが [吉岡裕嗣, 2013], [東良慶, 2014], そのほとんどは GNSS 信号の受信が良好な区間で評価されたものであった。道路橋が河川堤防を跨ぐ区間や樹木などとの隣接区間といった河川堤防で一般的に存在する GNSS 不可視区間において、MMS の計測精度を

具体的な数値で示した事例は少ない。河川堤防において、位置精度を確保した MMS 計測手法を整理するためには、一般的に存在する GNSS 不可視区間における MMS 点群の位置精度を具体的な数値で評価する必要がある。

(3)河川堤防の維持管理と MMS の標高の基準の違い

上記以外の誤差要因として、河川堤防の維持管理と MMS 計測における標高の基準の違いによる影響が考えられる。河川堤防の維持管理では、位置基準に河川距離標を用いている。河川距離標の標高は、河川ごとに標高の基準となる水準標から水準測量により比高を計測し、水準標の標高値を加算して算出する。一方、MMS で取得されるデータの標高は、GNSS 測位の楕円体高として算出され、国家水準点を基に生成されたジオイド高を減算することで換算される。多くの河川では国家水準点と水準標の標高の整合が図られているが、一部の地域では、整合が図られていない場合がある。数cmオーダの位置精度で堤防高を連続的に把握するために、河川距離標と MMS で取得される標高の基準の違いが及ぼす位置精度への影響を把握することは重要である。しかし、こうした影響を具体的な数値で示した事例は少ない。

5.2.2. 検証内容の整理

前項にて MMS 計測に影響を及ぼす誤差要因を整理した結果、以下の 4 つの項目について、計測精度への影響や有効性が整理できていないことを確認できた。

- 河川距離標と GNSS 測量の標高較差による影響
- 基線長による位置精度への影響
- VRS 方式の有効性
- 河川堤防における GNSS 不可視区間での位置精度への影響

以降では、実際の河川堤防で河川計測用 MMS を用いた実験計測から、4 つの項目に関する検証し、位置精度を確保した MMS 計測に必要な計測方法や計測諸元を整理する。

5.3. 実験計測による検証

実際の河川堤防において実験計測を行い、その取得データから河川距離標と GNSS 測量の標高較差、基線長による位置精度への影響、VRS 方式の有効性、および河川堤防における GNSS 不可視区間での位置精度への影響を検証する。その結果から、河川全体で位置精度を確保する MMS 計測手法を整理する。

5.3.1. 実験計測

実験計測では、特徴の異なる河川堤防を複数選出し、河川計測用 MMS を用いたデータ取得と取得データの確からしさを確認するための検証点を計測した。

(1) 計測地区

本実験計測は、様々な河川の地域における MMS の計測精度を把握するため、河口・平野部、盆地部、山間部において計測地区を設定した。河口・平野部は岡山県の南部を流れる吉井川河口部分の堤防を、盆地部は、兵庫県の日本海側に位置する豊岡盆地を流れる円山川の中流域を、山間部は京都府を流れる由良川の中・上流域を対象地区とした。円山川は、河川距離標 11 k.p～14k.p を、吉井川は河川距離標 0 k.p～12k.p を、由良川は 25 k.p～33.6k.p をそれぞれ計測地区とした。

(2) MMS 計測

本検証では、河川計測用 MMS を用いた。この MMS は、Nikon-Trimble 社製 MX-8 を基に、特殊堤天端の法尻付近の計測を容易にするためにレーザスキャナの設置高さを改良したものである。図 5-1 に外観を示す。

MMS の計測諸元は、走行速度 20 km/時間、レーザ照射数 55 万発/秒、回転数 50 回転/秒とし、5m 離れた位置で、特殊堤の天端幅より細かい点間隔 0.02m を確保できる設定とした。計測緒元を表 5-1 にまとめた。計測時期は、堤防の除草・集草が終わった冬季に実施した。また、由良川は事前評価として地上測量による GNSS 基準点測量のみを実施した。

表 5-1 MMS 計測諸元



項目	内容	
走行速度	20 km/h	
走行箇所	堤防天端	
MMS 機材	Trimble MX-8 改良版	
レーザ スキャナ	設置高さ	3.6(m)
	照射数	55 万発/秒
	回転数	50 回転/秒
	計測精度	±0.008m
MMS 点群の点間隔	進行方向	0.11m
	横断方向	0.02m (5m 先)

図 5-1 使用した河川計測用 MMS

(3) 検証点の設置と計測

MMS 点群の位置精度を確認するために、検証点および河川距離標の位置座標を地上測量により取得した。検証点は、路面に検証用ターゲットまたは埋鋲を設置し、その中心の位置座標を 4 級基準点測量に相当する VRS-GNSS 測量とトータルステーション測量を用いて取得した。河川距離標は、河川管理で用いられている近傍の水準点を既知点とした 4 級水準測量で高さを計測し、平面位置を RTK-GNSS 測量で取得した。図 5-2 に検証点として用いたターゲットを示す。計測に使用した機器は、Nikon-Trimble 社製 NetR9, S6 5+, および DL-502 である。



図 5-2 検証点の設置風景

図 5-3 検証点付近の MMS 点群

5.3.2. 河川距離標と GNSS 測定の標高較差

円山川と由良川において、河川距離標の標高と GNSS 測量で得られる標高の較差を確認した。

円山川では、左岸 14.2~14.8k.p 区間を対象に、水準測量、RTK-GNSS による基準点測量および MMS 点群の標高の較差を確認した。その比較結果を表 5-2 に示す。以降で示す表の値は次の式で算出した。

$$DIS = OBS - TV \quad (5-1)$$

$$\overline{DIS} = (\sum DIS)/n \quad (5-2)$$

$$SD = \sqrt{(\sum (DIS - \overline{DIS})^2)/n} \quad (5-3)$$

$$RMS = \sqrt{(\sum DIS^2)/n} \quad (5-4)$$

ここで、 DIS : 較差、 OBS : 観測値、 TV : 真値、 \overline{DIS} : 較差の平均値、 n : 検証点数、 SD : 標準偏差、 RMS : 平均二乗誤差である。この結果、MMS 点群と VRS-GNSS 測定の標高の較差が 0.01m 以下であることに対し、水準測量成果と MMS 点群および VRS-GNSS 測定の標高は、共に 0.014m 程度の系統的な較差を示した。

由良川では、左岸 25k.p~33.6k.p の一部区間を対象に、水準測量と RTK-GNSS による基準点測量の較差を確認した。この検証では、スタティック観測による 2 級基準点相当の基準点測量と、4 級基準点測量に相当する VRS-GNSS 測量を行った。結果を表 5-3 に示す。すべての GNSS を用いて取得した基準点と MMS 点群の標高は、河川距離標に比べ 0.03m 程度低い値を示し、系統的な較差があることが確認できた。

5.2.1 で述べたように、MMS 点群の標高は、GNSS 測位の楕円体高として算出され、国家水準点を基に生成されたジオイド高を減算することで標高に換算される。一方、河川距離標の標高は、河川ごとに標高の基準となる水準標から水準測量により比高を計測し、水準標の標高値を加算して算出する。多くの河川では国家水準点と水準標の標高の整合が図られているが、一部の地域では、整合が図られていない場合や地殻変動や沈下による較差が生じる恐れがある。本検証でも河川距離標と GNSS 測定の高さの系統的な較差が存在し、その較差量が数 cm 程度であることが確認できた。0.1m 程度の堤防高の把握や 0.05m 程度の変形・沈下状態をとらえる為には、数 cm オーダとなる河川距離標と MMS 点群の標高の系統的な較差量を把握することが重要であることが確認できた。

表 5-2 RTK-GNSS 測量と水準測量の比較

河川距離標	標高値(m)			標高較差(m)		
	水準 測量	VRS- GNSS 測量	MMS 点群	VRS GNSS 測量 — 水準測量	MMS 点群 — 水準測量	MMS 点群 — VRS GNSS 測量
14.2	9.253	9.266	9.270	0.013	0.017	0.004
14.4	9.273	9.281	9.285	0.008	0.012	0.004
14.6	9.358	9.376	9.366	0.018	0.008	-0.010
14.8	9.631	9.648	9.644	0.017	0.013	-0.004
平均値(m)				0.014	0.013	-0.001
最大較差(m)				0.018	0.012	-0.010
標準偏差(m)				0.005	0.004	0.007
平均二乗誤差(m)				0.017	0.015	0.007

表 5-3 GNSS 測量と水準測量の比較

点 名	水準測量	GNSS 測量		標高較差 (m)
	標高 (m)	標高 (m)	計測方法	
左岸 25.8	11.977	11.944	スタティック	-0.033
右岸 25.8	8.845	8.808	スタティック	-0.037
左岸 27.2	9.954	9.913	スタティック	-0.041
左岸 27.4	10.191	10.164	スタティック	-0.027
左岸 33.2	20.143	20.112	VRS	-0.031
右岸 33.2	20.293	20.279	VRS	-0.014
左岸 33.4	20.328	20.307	VRS	-0.021
右岸 33.4	20.326	20.295	VRS	-0.031
左岸 33.6	20.406	20.393	VRS	-0.013
右岸 33.6	20.506	20.484	VRS	-0.022
平均値 (m)				-0.027
最大値 (m)				-0.041
標準偏差 (m)				0.009
平均二乗誤差 (m)				0.030

5.3.3. 基線長による位置精度への影響

固定局からの基線長による MMS 点群の位置精度への影響を把握するために、吉井川と円山川の計測地区で検証を行った。

吉井川では、私設基準点と計測地区周辺にある 4 箇所の電子基準点をそれぞれ固定局に用いたキネマティック解析を行い、自己位置を算出した。そして、その結果と IMU およびレーザスキャナの取得データを用いた解析から点群を生成した。MMS 点群と、検証点の平面位置と標高を比較した結果を図 5-4 と図 5-5 に示す。これらの平面位置と標高の最大較差を比較すると、平面位置の最大較差が約 0.07m であるのに対し、標高は約 0.12m を示し、平面位置に比べ、標高の較差が大きいことを確認できた。次に、基線長と平面位置および標高の精度の関係に着目する。図 5-4 の黒色で示すキネマティック解析を用いた MMS 点群の平面位置精度は、基線長が 15 km 以下となる私設基準点、岡山 2、および邑久では 0.05m 以内となり、基線長が 15 km 以上になる岡山御津と和気では 0.08m 程度と若干低下した。一方、図 5-5 の標高精度は、基線長が長くなるに従って劣化するとともに、ばらつきが大きくなる傾向が見られた。吉井川の検証では、0.1m の位置精度を確保するには、水平方向の精度は基線長 23 km まで、高さ方向の精度は基線長約 20 km までであることが、0.05m の位置精度を確保するには、水平方向の精度は基線長 13 km まで、高さ方向の精度は基線長 5 km までであることが確認された。

円山川では、2013 年 11 月に取得したデータを用いて、基線長約 4km の私設基準点と基線長が 10 km、15 km、25 km となる電子基準点を固定局として用いたキネマティック解析を行い、MMS 点群を生成した。これらの MMS 点群と検証点との平面位置較差を図 5-6 に、高さ較差を図 5-7 にそれぞれ示す。この結果から、0.1m の位置精度を確保するには、水平方向の精度が基線長 15 km まで、高さ方向の精度が基線長 10 km までであることが、0.05m の位置精度を確保するには、水平方向の精度が基線長 15 km まで、高さ方向の精度が基線長 5 km までであることがそれぞれ確認された。また、一般に GNSS を用いた測量は水平方向に比べ高さ精度が低いと言われ [臼井澄夫, 2011], 吉井川と円山川の両結果でもその傾向が確認できた。

以上の結果から、固定局からの基線長が長くなるにつれ、標高精度が劣化しやすい傾向が確認できた。今回の検証結果では、円山川と吉井川ともに、基線長が概ね 15 km 以上の場合に標高誤差が 0.1m 以上を示すことがわかった。

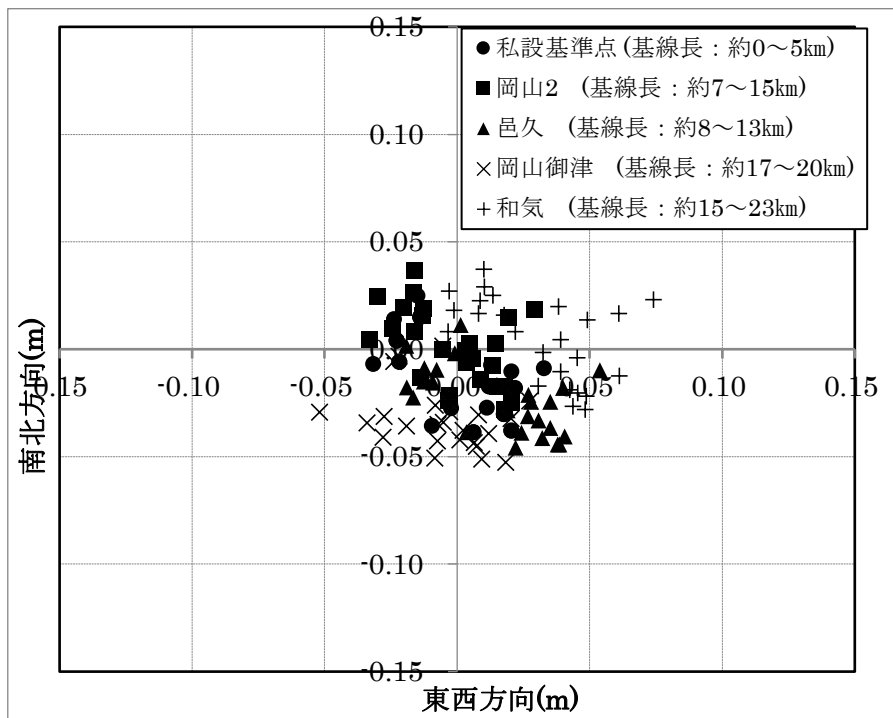


図 5-4 基線長による平面位置精度への影響 (吉井川での検証結果)

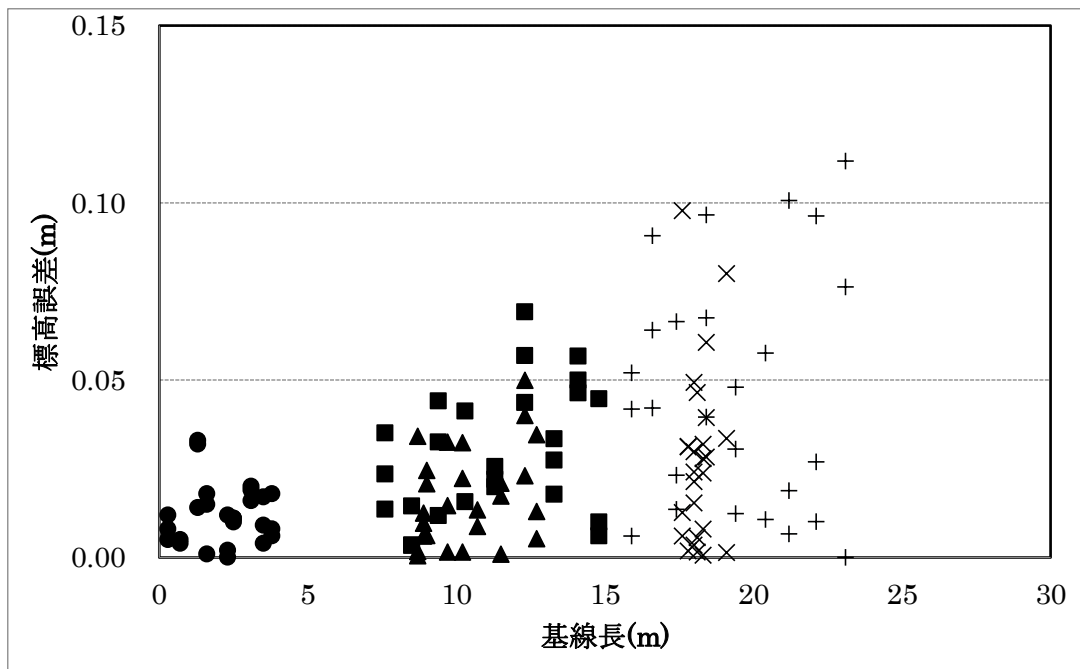


図 5-5 基線長による標高精度への影響 (吉井川での検証結果)

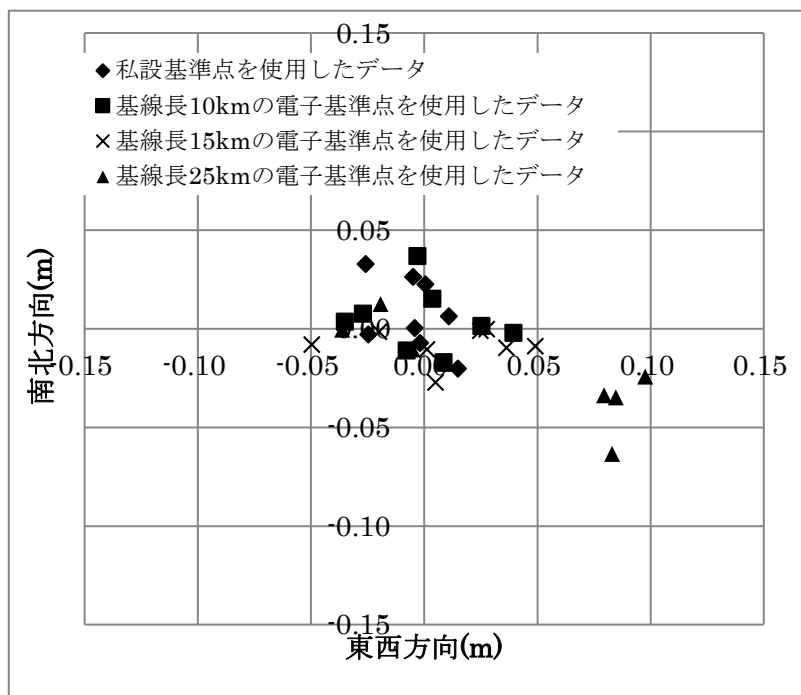


図 5-6 基線長による平面位置精度への影響 (円山川での検証結果)

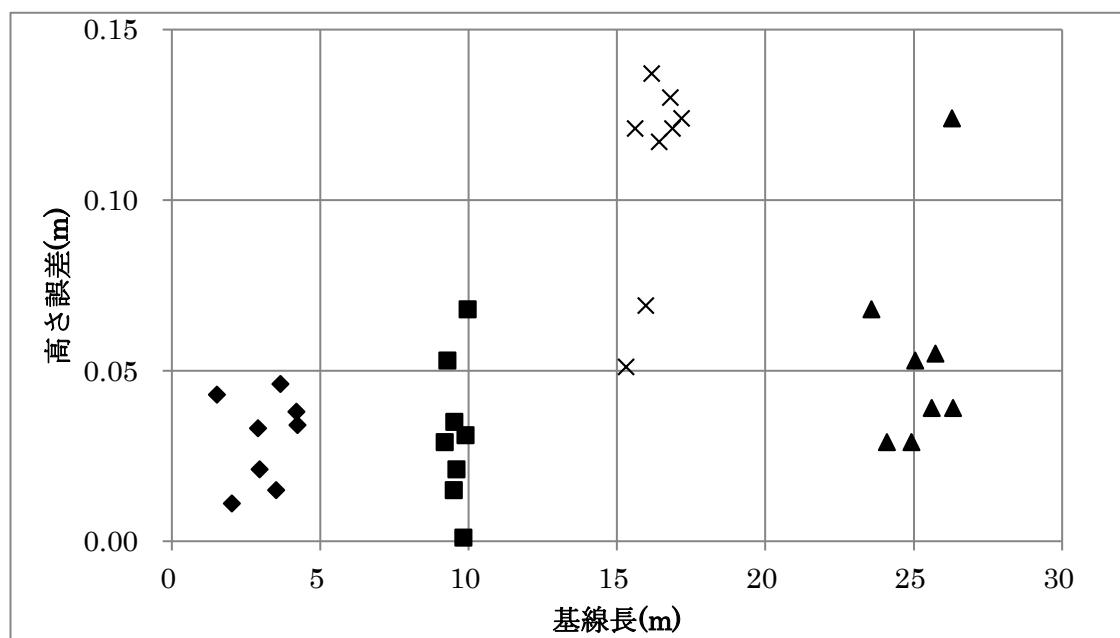


図 5-7 基線長による標高精度への影響 (円山川での検証結果)

5.3.4. VRS方式の有効性

吉井川の実験計測において、VRS方式の有効性を確認した。私設基準点を設置した位置に、VRS方式による仮想基準点を設定し、電離層と対流圏によるGNSS信号の遅延や衛星軌道の誤差を補正したGNSS観測データを固定局に使用した。これらのデータから自己位置を算出し、MMS点群（VRS-MMS点群）を生成した。キネマティック解析から生成したMMS点群（キネマティック-MMS点群）およびVRS-MMS点群と、GNSSの受信が良好な地区に設置した検証点との平面位置と標高を比較した結果を表5-4、図5-8、および図5-9に示す。

まず、表5-4で示す位置精度の評価結果に着目する。キネマティック-MMS点群とVRS-MMS点群は、最大較差と平均二乗誤差ともに0.11m以下を示した。その中で、基線長が長い岡山御津や和気を固定局として用いた結果の最大較差と平均二乗誤差は、他の地点に比べ高い値を示すことも確認できる。基線長を10~15kmより短く保つことで、0.1m程度の堤防高の変化をとらえることが可能な精度を有することを確認できた。

つぎに、基線長と平面位置および標高の精度の関係に着目する。図5-8の黒色で示すキネマティック-MMS点群の平面位置精度は、基線長が15km以下となる私設基準点、岡山2、および邑久では0.05m以内となり、基線長が15km以上になる岡山御津と和気では0.08m程度と若干低下した。一方、図5-9の黒色で示すキネマティック-MMS点群の標高精度は、基線長が長くなるに従って劣化するとともに、ばらつきが大きくなる傾向が見られた。

最後に、基線長の影響が受けやすい標高に着目し、仮想的に基線長を短くするVRS方式による位置精度への効果を確認する。VRS方式の仮想基準点を固定局に用いることで、最長23kmあった基線長は5km以下になる。その結果、図5-9の標高最大較差は、基線長が約12km以上の区間で約0.12mあったキネマティック-MMS点群が、VRS-MMS点群で約0.06mに改善された。逆に、基線長が12kmより短い区間の最大較差は、キネマティック-MMS点群で約0.04mと良好な値を示すのに対し、VRS-MMS点群で約0.06mと若干精度が劣化する結果が確認できた。

以上の結果から、VRS-MMS点群は、0.1m程度の堤防高の変化をとらえることが可能な精度を有することを確認できた。また、固定局からの基線長に応じて、キネマティック解析とVRS方式を適切に用いることで、帯状に長い河川堤防で安定した精度のMMS点群が取得できることが確認できた。

表 5-4 MMS 点群と検証点の位置較差

測位方式	VRS 方式	RTK-GNSS 測位				
		私設 基準点	岡山 2	邑久	岡山御津	和気
固定局	私設 基準点	私設 基準点	岡山 2	邑久	岡山御津	和気
基線長(km)	0~5	0~5	7~15	8~13	17~20	15~23
平均値(m)	0.036	0.032	0.040	0.043	0.048	0.062
最大値(m)	0.060	0.047	0.072	0.071	0.073	0.108
標準偏差(m)	0.013	0.007	0.016	0.016	0.014	0.019
平均二乗誤差(m)	0.039	0.034	0.044	0.046	0.051	0.066

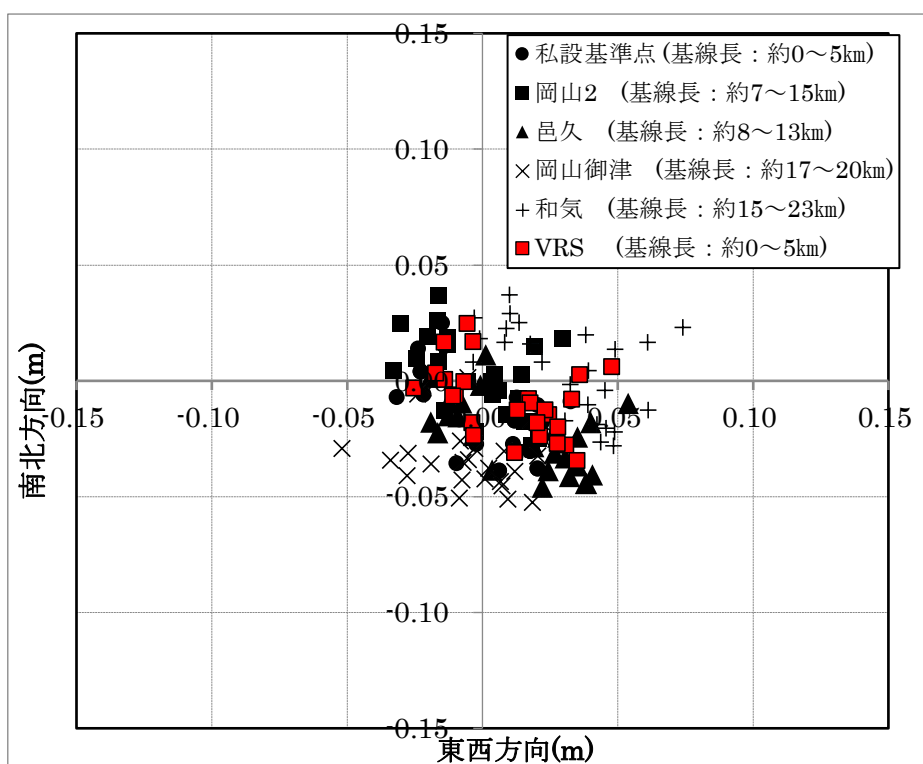


図 5-8 VRS 方式による平面位置精度への影響 (吉井川での検証結果)

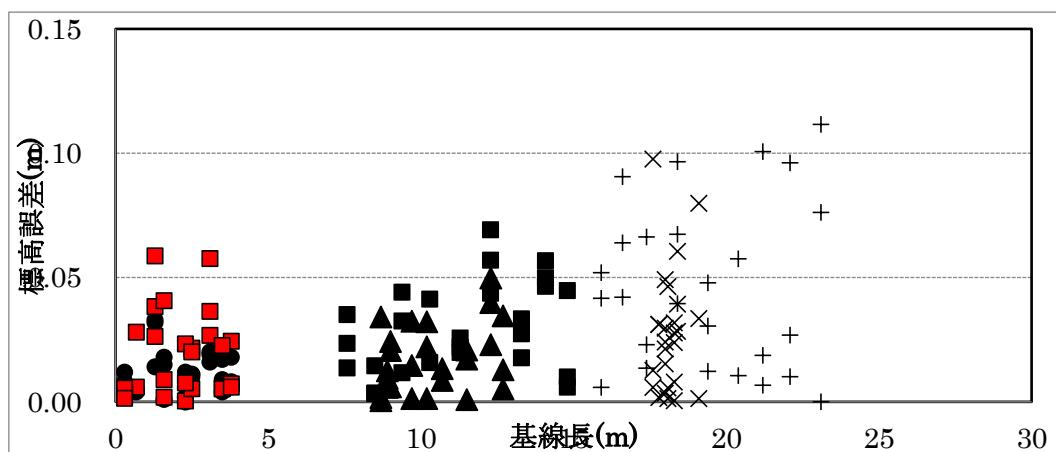


図 5-9 VRS 方式による標高精度への影響 (吉井川での検証結果)

5.3.5. 河川堤防における GNSS 不可視区間での位置精度結果

吉井川の実験計測において、GNSS 不可視区間における位置精度を確認した。この確認では、実験計測区間の中で、最も GNSS 不可視区間が長かった吉井川の幅 20m 程度の道路橋が河川堤防を跨ぐ区間と 400m 程度樹木に覆われた 2つの区間を対象とした。さらに、GPS と GLONASS の衛星情報を併用した (GPS+GLONAS) 測位と GPS 単独の測位結果を比較し、GPS+GLONAS を利用する効果もあわせて確認した。

図 5-10 に道路橋が跨ぐ区間、図 5-11 に樹木に覆われた区間における GPS+GLONAS と GPS のみを用いて解析した Position Dilution of Precision (PDOP) の空間分布を示す。PDOP とは、GNSS を用いた測量の品質指標として利用されており、PDOP が 3 以下であれば概ね良好な品質の成果が得られると言われる [小白井亮一, 2010]。図 5-10 の PDOP 3 以上を示す区間に着目すると、GPS+GLONAS が道路橋から概ね 10m の範囲を示すのに対し、GPS 単独が 25m の範囲を示し、GPS+GLONAS での PDOP 3 以下の範囲が広がっている。また、図 5-11 でも、GPS+GLONAS の PDOP 3 以下を示す区間が、GPS 単独の結果に比べ、広がっていることが確認できる。GPS+GLONAS 測位に関する研究は多く行われており、GNSS を用いた基準点観測では、GPS 単独と同等の測定精度があること、GPS 単独よりも PDOP が向上するが示されている [財団法人 日本測量協会, 2005] [沖田孝介, 2008]。MMS でも GPS+GLONAS を用いることで、安定した精度を確保できる区間が広がることを確認できた。

次に、GPS+GLONAS による測位を用いて生成した MMS 点群 (GPS+GLONAS 点群) と GPS 単独による測位を用いて生成した点群 (GPS 点群) の位置精度を確認した。衛星可視域と衛星不可視区間周辺に検証点を設置し、MMS 点群との位置較差を確認した。その結果を表 5-5 に示す。この結果より、GPS+GLONASS 点群と GPS 点群の較差は、衛星可視域で 0.01m 以下と同等な値を示し、衛星不可視域で最大較差 0.02m 程度の位置精度が劣化しているが、平均二乗誤差は 0.01m 以下を示す結果となった。この結果から、GPS+GLONAS 点群の位置精度は、GPS 点群と同等であることが確認できた。

最後に、GPS+GLONAS 点群に着目し、衛星不可視域における PDOP と位置精度の空間的な変化を確認した。図 5-12 に道路橋が跨ぐ区間、図 5-13 に樹木に覆われた区間の PDOP と位置較差を示す。図 5-12 では、道路橋通過前の位置較差が 0.03m 以下であったが、通過後 150m 区間にかけて 0.03m から 0.04m と若干大きい較差を示した。道路橋の通過後は、百数十 m の区間にかけて若干の精度劣化が生じることが確認できた。図 5-13 の樹木に覆われた区間では、-120m~-150m 付近で、PDOP が 2.5 以上を示し、位置較差が 0.06m と周辺より高い値となった。一方、125m 付近では PDOP が 2.0 以下を示すものの、位置較差は 0.04m を示し、逆に 50m 付近では、PDOP が 2.5 から 3.0 の値を示しているにも関わらず位置精度は 0.01m 以下を示した。MMS の自己位置算出は、GNSS による測位成果と IMU による慣性航法結果の結合処理を行う。IMU の慣性測位による補正効果が働

いたため、GNSS の受信状態が不良な状況でも、大きな位置精度の劣化が見られなかったと考えられる。自己位置測定機器のカタログスペックは、1 分の GNSS 不可視での標高精度が 0.07m と示されている [Applanix, 2017]。GNSS 不可視区間の通過時間は、道路橋が跨ぐ区間で約 5 秒、樹木に覆われた区間で約 1 分 30 秒であった。本実験計測でも、1 分 30 秒の断続的な GNSS 受信不良区間でカタログスペックと同等な位置精度を確保できることが分かった。また、本計測は、GNSS 可視区間で PDOP の予測値が 3 以下になる時間帯に絞って計測を行った。こうした計測時間の選定も安定した結果を得た一つの要因と考える。

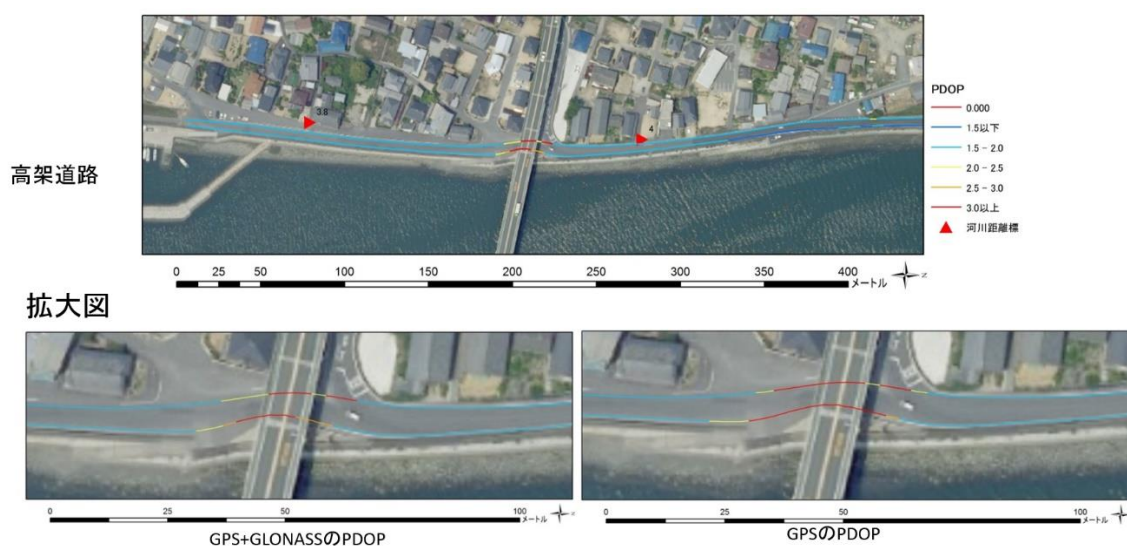


図 5-10 高架道路を跨ぐ区間における GPS+GLONASS と GPS のみの PDOP

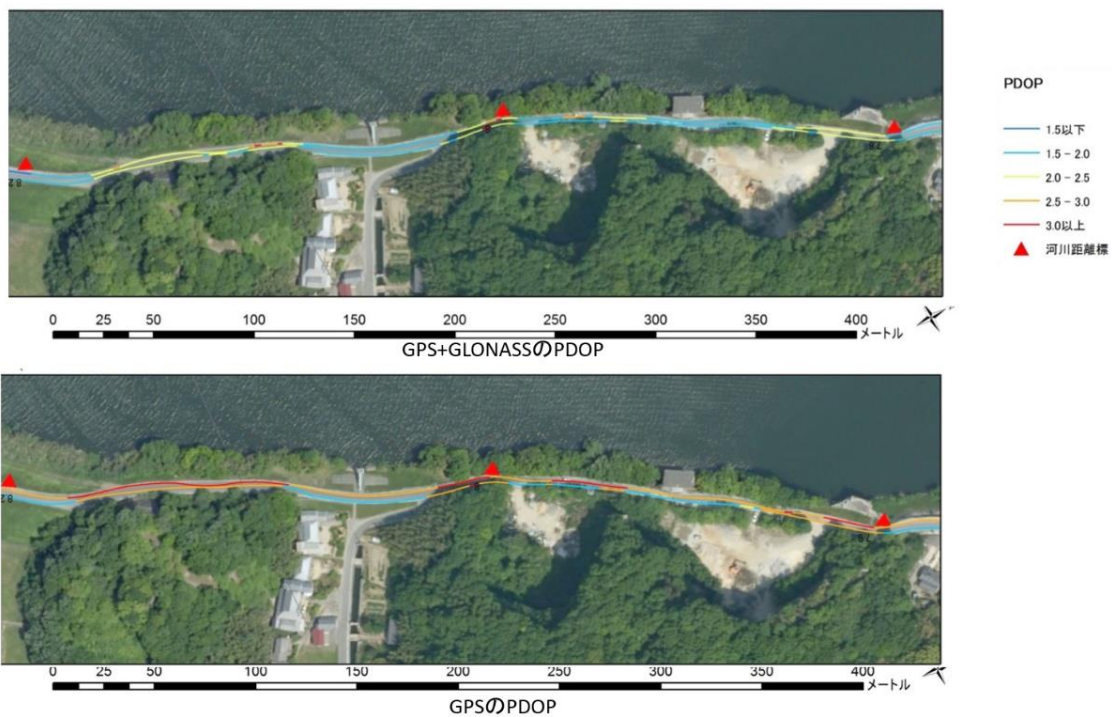


図 5-11 樹木に覆われた区間におけるGPS+GLONASSとGPSのみのPDOP

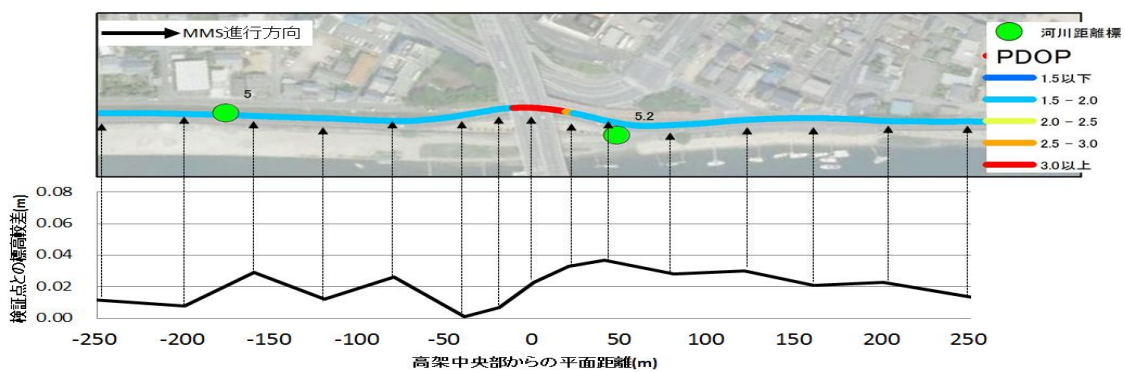


図 5-12 道路橋を跨ぐ区間のPDOP, 検証点との標高較差

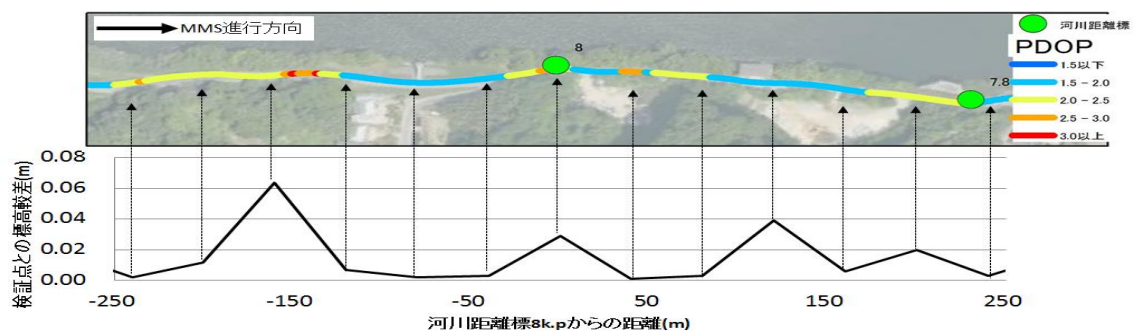


図 5-13 樹木に覆われた区間のPDOP, 検証点との標高較差

表 5-5 GPS+GLONAS と GPS 単独による測位を用いて生成した点群の位置精度

	点名	GPS+GLONASS 測位					GPS 測位					GPS+GLONASS 測位 と GPS 測位の較差				
		X方向 誤差 (m)	Y方向 誤差 (m)	高さ方 向 誤差 (m)	PDOP	衛星 数	X方向 誤差 (m)	Y方向 誤差 (m)	高さ方 向 誤差 (m)	PDOP	衛星 数	X方向 誤差 (m)	Y方向 誤差 (m)	高さ方 向 誤差 (m)	PDOP	衛星 数
GNSS 受信良 好区間	検証点数	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26
	最大値(m)	0.048	-0.010	0.033	2.1	15.0	0.047	-0.010	0.036	2.7	9.0	0.002	0.001	0.001	-0.1	6.0
	最小値(m)	-0.017	-0.064	-0.018	1.5	9.0	-0.017	-0.064	-0.018	1.7	7.0	-0.001	-0.002	-0.003	-1.2	2.0
	平均値(m)	0.016	-0.040	0.005	1.6	13.4	0.015	-0.040	0.005	2.2	7.6	0.000	0.000	0.000	-0.6	5.8
	標準偏差 (m)	0.019	0.018	0.014	0.1	1.3	0.019	0.018	0.014	0.4	0.8	0.001	0.001	0.001	0.4	0.8
	平均二乗誤 差(m)	0.047	0.085	0.028	3.1	25.9	0.046	0.084	0.029	4.3	14.8	0.002	0.001	0.002	1.3	11.2
GNSS 受信不 良区間	検証点数	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
	最大値(m)	0.048	0.008	0.044	8.3	15.0	0.048	0.008	0.044	6.9	9.0	0.010	0.013	0.016	4.3	6.0
	最小値(m)	-0.084	-0.102	-0.068	1.5	5.0	-0.084	-0.102	-0.068	1.7	2.0	-0.008	-0.013	-0.009	-4.5	2.0
	平均値(m)	-0.002	-0.053	-0.011	2.0	11.9	-0.002	-0.053	-0.010	2.5	7.0	0.000	0.000	-0.001	-0.6	5.0
	標準偏差 (m)	0.028	0.020	0.021	0.9	2.0	0.027	0.020	0.022	0.8	1.2	0.003	0.003	0.003	0.9	1.1
	平均二乗誤 差(m)	0.028	0.057	0.024	2.2	12.2	0.027	0.057	0.024	2.7	7.1	0.003	0.003	0.004	1.0	5.1

5.3.6. 河川堤防における MMS 計測手法の整理

本節では、実験計測から、河川距離標と GNSS 測量の標高較差、基線長による位置精度への影響、VRS 方式の有効性、および河川堤防における GNSS 不可視区間での位置精度への影響を検証した。その結果、河川堤防の MMS 計測では、以下に留意することで、河川全体の堤防高を安定した位置精度で把握できることが明らかになった。

- 0.1m 程度の堤防高の把握や 0.05m 程度の変形・沈下状態をとらえる為には、河川距離標と MMS 点群の標高較差量を把握することが重要である。
- 固定局からの基線長に応じて、キネマティック解析と VRS 方式を適切に用いることで、帯状に長い河川堤防で安定した精度の MMS 点群が取得できることが確認できた。
- PDOP の予測値が 3 以下になる時間帯に絞って計測し、GPS+GLONAS による測位から MMS 点群を生成する。これにより、河川堤防で一般的に存在する 20m 程度の道路橋が跨ぐ区間や 400m 程度の植生が隣接する GNSS 不可視区間でも、位置精度の劣化が少なく、0.1m 程度の位置精度を確保できる。
- 河川堤防で一般的に良く存在する GNSS 不可視区間では、PDOP の予測値が 3 以下になる時間帯に絞って計測した場合、20m 程度の道路橋や 400m 程度の断続的な GNSS 不可視区間で、0.1m 程度の位置精度を確保できることが確認できた。

5.4. 軟弱地盤地の河川堤防におけるMMS点群の位置精度評価

前項までに整理した河川堤防のMMS計測手法と計測諸元を用いることで、0.1mの位置精度を確保したMMS点群を取得できることがわかった。本節では、実際に沈下や変形が確認されている軟弱地盤地の河川堤防区間において、複数年のMMSによる実験計測を行い、取得データを用いた検証から、0.05mの位置精度を確保するためのMMS計測手法を整理する。

5.4.1. 実験計測

実験計測は、円山川と吉井川の沈下や変状が確認されている河川堤防を選定し、三年間のMMS計測、確からしさを確認するための検証点、および位置補正のための調整点の位置座標を地上測量で計測した。

(1) 計測地区

本検証では、実際に沈下の発生が確認されている兵庫県の豊岡盆地を流れる円山川の中流域と、岡山県の南部を流れる吉井川の河口域の堤防を対象地区とした。前者は土堤区間であり、後者は河口域の特殊堤区間である。図5-14に対象区間を示す。円山川の計測地区は、2007年に堤防改修工事が行われた河川距離標11～14k.pを対象とした。この付近の地盤は、地上から泥層、砂層、泥層、砂泥層、および砂礫層の互層で形成され、特に40m程度の厚みがある中部泥層で圧密沈下の恐れが土質試験から明らかにされている。また地上部では長期にわたり年数cm程度の沈下の発生が報告されている[国土交通省, 2005]。吉井川は、天端幅40cmの特殊堤が整備されている右岸河川距離標0.0～2.0k.p区間を対象区域とした。この区間は、高潮対策と堤防液状化対策のための堤防工事が行われている。0.2～1.1k.p付近までの区間が2012年に、1.2～2.0k.p区間が2015年に改修された比較的新しい河川堤防である。

(2) 検証点・調整点の設置と計測

MMS点群の位置精度を確認するための検証点と、位置補正をするための調整点を設置し、その平面位置座標を4級基準点測量に相当するVRS-GNSS測量とトータルステーション測量を用いて取得した。また、調整点の標高座標は、沈下が発生していないと考えられる河川距離標を与点とし、4級水準測量で取り付けた。



図 5-14 対象地区

(3) MMS 計測

MMS 計測は、河川計測用 MMS を用いた。前節までの MMS 点群の位置精度検証にて、0.05m の位置精度を確保できる固定局からの基線長は、水平方向で 15 km、標高方向で 5 km までであることが確認された。そこで、基線長 5 km 以下に保った計測コースを設定して、データ取得を行うこととした。

MMS の計測諸元は、走行速度 20 km/時間、レーザ照射数 55 万発/秒、回転数 50 回転/秒とし、5m 離れた位置で、特殊堤の天端幅より細かい点間隔 0.02m を確保できる設定とした。その計測諸元は表 5-1 と同じである。計測時期は、堤防の除草・集草が終わった冬季に実施した。

さらに、両河川ともに、河川距離標と GNSS 測量の高さに系統的な較差が存在し、その較差量が数cm程度であることも確認している。そこで、MMS 点群と河川距離標の標高を整合させるために、MMS 計測区間の始終点付近にある 2 点の調整点に対して、MMS 点群との位置較差を把握し、その平均較差を補正量として平行移動する補正処理を行った。

5.4.2. 円山川での位置精度評価

本節では、MMS 点群の位置精度を検証した。この検証では、MMS 点群から読み取った検証点の位置座標と地上測量で得られた座標値を比較・評価した。

円山川では、2013 年 12 月、2014 年 12 月および 2015 年の 11 月に、MMS 計測を実施した。MMS 自己位置測定に用いた固定局の最大基線長は 4.5 km である。表 5-6 に、補正前後の MMS 点群と水準測量の比較結果を示す。その値は次の式で算出する。

$$DIS = OBS - TV \quad (6-1)$$

$$\overline{DIS} = (\sum DIS)/n \quad (6-2)$$

$$SD = \sqrt{(\sum (DIS - \overline{DIS})^2)/n} \quad (6-3)$$

$$RMS = \sqrt{(\sum DIS^2)/n} \quad (6-4)$$

ここで、DIS：較差，OBS：観測値，TV：真値， \overline{DIS} ：較差の平均値，n：検証点数，SD：標準偏差，RMS：平均二乗誤差である。

表 5-6 円山川 MMS 点群位置精度検証結果

取得時期	2013 年		2014 年		2015 年	
	補正無	補正有	補正無	補正有	補正無	補正有
検証箇所数	8	8	8	8	8	8
平均誤差(m)	0.012	0.003	0.033	0.003	0.038	0.013
最大誤差(m)	0.031	0.024	0.052	0.022	0.048	0.023
標準偏差(m)	0.015	0.016	0.011	0.011	0.007	0.007
平均二乗誤差(m)	0.020	0.016	0.037	0.011	0.041	0.015
補正量 (x, y, z)(m)	0.010, 0.020, 0.015		0.000, 0.030, 0.030		0.020, -0.020, 0.025	

MMS 点群は、補正処理なしの平均二乗誤差が最大で 0.041m を示したのに対し、補正処理を加えることで平均二乗誤差が 0.020m 以下に向上することが確認できた。補正処理なしの MMS 点群は、計測日ごとに系統的な誤差を示した。河川距離標と MMS 点群の標高の基準の違いだけではなく、GNSS 測量における衛星配置状況や電離層などの状況の違いにより、日ごとで異なる系統的な標高誤差が発生したと考えられる。そのため、補正処理は計測日ごとに実施することにした。

5.4.3. 吉井川での位置精度評価

吉井川では、2016年1月と12月に取得したMMS点群と、同日に計測した堤防天端道路上と特殊堤天端上の検証点の位置座標を比較した。表5-7に2016年1月の比較結果を、表5-8に2016年12月の比較結果をそれぞれ示す。両計測日ともにMMS計測における固定局の最大基線長は5kmである。

表5-7表5-7では、道路天端と特殊堤天端に設置した検証点とMMS点群の比較を行った。図5-15に、道路天端と特殊堤天端の検証点の設置位置図を示す。MMS点群は、補正処理なしの場合の平均二乗誤差の最大値が0.041mを示したのに対し、補正処理を加えることで0.015m以下に向上した。また幅の狭い特殊堤も堤防天端道路と同等な精度で再現できることが確認できた。表5-8では、特殊堤天端に設置した検証点とMMS点群の比較を行った。4つの計測コース（往復2回）で取得されたMMS点群を用いて、その再現性を確認した。この際のMMS点群でも、補正処理なしの場合の平均二乗誤差の最大値が0.038m以下を示したのに対し、補正処理を加えることで0.012m以下に向上し、異なる時期に取得したMMS点群が概ね同じ位置精度が確保できることを確認した。

表 5-7 吉井川 2016年1月 MMS点群位置精度検証結果

部位	特殊堤天端		天端道路	
	補正無	補正有	補正無	補正有
検証箇所数	16	16	16	16
平均誤差(m)	0.038	0.008	0.034	0.007
最大誤差(m)	0.055	0.025	0.045	0.018
標準偏差(m)	0.011	0.011	0.009	0.009
平均二乗誤差(m)	0.041	0.015	0.036	0.012
補正量(x, y, z)(m)	0.020, -0.025, -0.030		0.020, -0.020, -0.027	

表 5-8 吉井川 2016年12月 MMS点群位置精度検証結果

部位	特殊堤天端							
	コース1往路		コース1復路		コース2往路		コース2復路	
補正処理	補正無	補正有	補正無	補正有	補正無	補正有	補正無	補正有
検証箇所数	9	9	9	9	9	9	9	9
平均誤差(m)	0.028	-0.001	0.027	-0.001	0.03	-0.002	0.035	-0.002
最大誤差(m)	0.041	0.021	0.035	0.007	0.044	0.015	0.043	0.015
標準偏差(m)	0.011	0.011	0.004	0.004	0.011	0.011	0.012	0.012
平均二乗誤差(m)	0.032	0.011	0.029	0.004	0.034	0.011	0.038	0.012
補正量(m) (x, y, z)	-0.017, -0.023, 0.029		0.025, -0.022, 0.028		0.019, -0.030, 0.032		0.021, -0.022, 0.037	

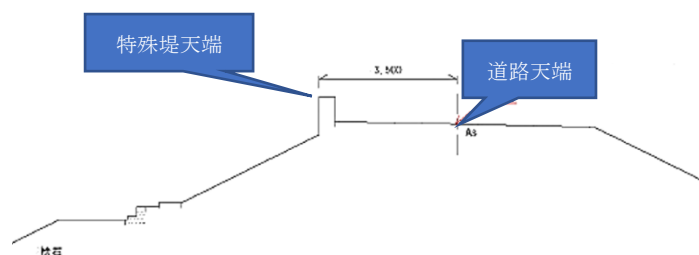


図 5-15 検証点設置位置図

5.4.4. 評価結果のまとめ

以上の結果から、良好なGNSS受信区間において基線長5km以下に保ったMMS計測は、補正処理を行わない場合で最大0.06m程度の位置精度を確保でき、さらに調整点による補正を加えることで実現目標である0.05mの位置精度を確保できることがわかった。また、MMS点群は、異なる時期・異なる場所の天端道路や特殊堤といった堤防高でも同程度の位置精度を示す結果から、再現性の高さも確認できた。

5.5. 本章のまとめ

本章では、河川全体での堤防高の計測精度を確保する手法を整理した。

4章にて製作した河川堤防計測用MMSを用いた実験計測を行い、数十km以上におよぶ帯状に長い河川堤防の環境下において、位置精度を確保するための計測諸元を整理した。その結果、以下の知見を得ることができた。

- ・0.1m程度の堤防高の把握や0.05m程度の変形・沈下状態をとらえる為には、数cmオーダーとなる河川距離標とMMS点群の標高の系統的な較差量を把握することが重要である
- ・MMS自己位置算出方法は、RTK-GNSS測位とIMUの慣性測位の結合処理を用いることで、高架などのGNSS不可視区間で安定した位置精度を確保できる。
- ・固定局からの基線長に応じてRTK-GNSS測位やVRS方式を適切に用いることで安定した精度のMMS点群が取得できる。本実験計測では、固定局から基線長が概ね12km以下の区間ではRTK-GNSS測位を、それ以上の基線長区間はVRS方式の測位データを固定局として解析することで0.1m以下の位置精度を確保したMMS点群が取得できることを確認した。
- ・河川堤防で一般的に良く存在するGNSS不可視区間では、PDOPの予測値が3以下になる時間帯に絞って計測した場合、20m程度の道路橋や400m程度の断続的なGNSS不可視区間で、0.1m程度の位置精度を確保できることが確認できた。

次に、整理したMMS計測諸元を基に、実際に沈下・変形が確認されている河川堤防で、3年間、年1回のデータ取得を行った。その結果、河川堤防高の把握で0.1m程度の位置精度を確保することができた。さらに、変形・沈下の状態把握が求められる区間では、MMS計測区間の始終点付近にある河川距離標を与点とした2点の調整点を設置し、MMS点群との位置較差を把握し、その平均較差を補正量として平行移動する補正処理を行うことで、0.02m以上の変形や沈下区間を捉えられることがわかった。

以上の結果から、MMSを用いた河川計測は、河川堤防の維持管理で必要となる河川堤防高を0.1m程度の位置精度で把握でき、変形・沈下が認められる区間で、位置補正を加えることにより目標とした0.05m程度の形状・沈下の変化を捉えられることが確認できた。

6. 変形・沈下把握手法の検討

6.1. はじめに

5章では、河川計測用 MMS を用いて、実際に沈下・変形が報告されている河川堤防区間で3年間、年1回のデータ取得を行い、0.05m の位置精度を確保した MMS 点群の取得方法を検討した。取得された MMS 点群の位置精度評価から、河川堤防高を 0.1m 程度の位置精度で把握でき、位置補正を加えることにより細かい 0.02m 以上の形状・沈下の変化を捉えられることが確認できた。

そこで本章では、位置補正により精度管理された MMS 点群を用いて、変形・沈下状態を可視化（見える化）する新たな手法を提案する。6.2 節で河川堤防の変形・沈下把握に関する現状と課題、および本章で検討する内容を整理する。次に、6.3 節で MMS 点群による縦断表現を用いた堤防天端の変形・沈下区間を把握する手法を提案する。最後に 6.4 節で実際に沈下が報告されている堤防で取得された MMS 計測を実施し、本手法の妥当性と面的な変形・沈下把握の有効性を示す。

6.2. 変形・沈下把握に関する課題の整理

本節では、河川の維持管理で一般的に行われている変形・沈下を把握に関する現状と課題を 6.2.1 節に整理する。次に、その課題の対応策として検討された既往研究を、6.2.2 節に整理する。そして、本章で検討する内容を 6.2.3 節に整理する。

6.2.1. 変形・沈下把握の現状

日本の河川堤防は、材料の取得や工事の容易さから土砂で形成する土堤を基本とし、河口域や堤防用地が確保できない区間で、コンクリート製のパラペット構造を有する特殊堤が取り付けられている。こうした河川堤防は、土砂という材料を用いるため、長時間の浸透水による強度の低下や流水による洗掘などが発生し、さらに、土砂部の堤体圧縮やコンクリートの劣化により、時間の経過と共に変形・沈下する [末次忠司, 2010]。その進行速度は、新築や改築時の堤防、軟弱地盤地に整備された堤防で特に速く、新築や改築時から数年間の堤防で年間数cmから十数cm、また、軟弱地盤地に築堤された河川堤防で長期にわたり年数cm程度も沈下した事例が報告されている [末次忠司, 2010]、[坪田邦治, 2007]。たとえば、軟弱地盤地上に河川堤防が築堤されている兵庫県の円山川では、平成 16 年の台風 23 号に伴う豪雨により、周辺より堤防高が低い約 30m の区間から越流が発生し、破堤に至った [国土交通省, 2005]。そのため河川の維持管理では、平常時に河川全体の堤防天端や特殊堤の変形・沈下状態を漏れることなく把握し、治水に必要な堤防高を維持することが必要

となる。

河川堤防の変形・沈下の形態は、地盤沈下や土砂の圧密沈下により堤防や周辺地盤が全体的に沈下する全体沈下と、堤防や基礎地盤の土質などの違いによる不同沈下で法肩や天端の一部が変形・沈下する部分沈下に大別できる [関口秀雄, 1982]。こうした変形・沈下を捉えるために、現在の河川堤防管理では、数年に一度の定期縦横断測量と、年数回の堤防等河川管理施設の点検（堤防点検）が行われている [国土交通省国土地理院, 2016], [国土交通省水管理 国土保全局 河川環境課, 2016]。定期縦横断測量は、河川距離標を対象に 200m といった一定間隔ごとに堤防天端の高さと横断形状をトータルステーション (TS) 測量や水準測量を用いて計測するが多い。一方、堤防点検は、堤防や樋門などの河川構造物を対象に、陥没・不陸といった面的な堤防形状の変形（変状）や沈下の有無を目視で確認し、変形部の長さ・深さを箱尺や巻尺などを使って計測している。しかし、一定間隔の定期縦横断測量は、距離標間の変形・沈下を把握できない恐れがあり、また箱尺・巻尺を使った堤防点検は、数 cm 程度の沈下を面的・網羅的に把握することが難しい。

6.2.2. 変形・沈下把握に関する既往研究

2.3.2 項で述べたように、200m といった河川距離標の配置間隔より詳細に河川堤防の形状を把握する取り組みは、いくつか存在する。鶴飼らは、堤防天端に 1 つの縦断測線を設定し、RTK-GNSS 観測法により徒歩で 1m 間隔の天端高を取得した [鶴飼尚弘, 2007]。この手法は縦断的な全体沈下は捉えられるものの、測線上にない部分沈下や横断的な沈下は捉えられない恐れがある。面的に地形形状を捉えられる計測手法として航空レーザ測量があり、浸水想定区域図や洪水ハザードマップ作成の基礎資料として多くの河川で実施されている。その計測密度は、最も細かい計測間隔が数 m から 50cm 四方に 1 点程度であり [国土交通省国土地理院, 2016], 数十 cm 幅の特殊堤を再現するには十分な空間分解能ではない。

また、2.3.3 項で示したように、堤防天端を走行しながら堤防の形状を取得できる MMS の利便性を活かし、堤防点検に適用した既往研究がいくつか実施されている [東良慶, 2014], [吉岡裕嗣, 2013], [橋菊生, 2015]。その主な点検項目は、ひびわれ亀裂やモグラ穴の有無といった堤防の表層状態に関する点検、陥没・はらみだしといった堤防形状に関する点検など、多様な項目がある。MMS の適用性検証から、堤防天端では、計測死角がほとんどなく、高い空間分解能のデータを安定して取得できる特長が確認された。一方で、法面下部で欠測が発生しやすいことや、点検する部位・点検項目ごとに適した解析手法が必要となり、解析処理が煩雑になる課題や、上流から下流までの河川全体および河川構造物や沈下・変形の恐れがある狭域の変形・沈下を漏れなく把握する技術が確立されていないことが確認できた。さらに、既往研究では、MMS が把握可能な変形・沈下の進行具合を具体的な数値で評価し、そのために必要となる把握手法を明確にした研究はほとんどないことも確認された。

6.2.3. 変形・沈下把握の課題

河川堤防の沈下・変形状態の把握において、従来手法と既往研究における MMS 適用の課題は、表 6-1 のようにまとめられる。

表 6-1 課題の抽出と解決策

手法		課題	解決策
従来手法	縦横断測量 RTK-GNSS 測量	測線・点以外の箇所が発生する変形や沈下を捉えられない。 部分沈下が把握できない恐れがある。	MMS により、0.05m 以下の位置精度確保して取得した面的な 3 次元計測の利用
	堤防点検 (目視点検)	数 cm 程度の沈下を面的・網羅的に把握することが困難	
	航空レーザ測量 など	特殊堤を持つ堤防高は、評価に必要な計測間隔を持つ点群を取得できない	
MMS を用いた堤防点検の既往研究		点検項目の種類、形状の大きさに応じた解析手法と、広域・狭域の把握範囲に応じた表現手法が必要。	<ul style="list-style-type: none"> ・堤防天端に着目 ・MMS 点群を用いた面的・網羅的な解析の検討

従来手法である堤防点検や縦横断測量では、河川堤防天端全体の沈下や変形を漏れなく確実に把握することができないこと、さらに、航空レーザ測量では、特殊堤のパラペット天端の高さを把握することができないことが明らかになった。こうした課題に対して、数 cm 程度の計測間隔で三次元計測できる MMS が適用できる可能性がある。しかし、MMS で取得される MMS 点群を用いて把握できる変形・沈下の進行具合を具体的な数値で評価されていない。また、MMS 点群を用いて、上流から下流までの河川全体および河川構造物や沈下・変形の恐れがある狭域の変形・沈下を漏れなく把握する技術の確立が必要であることが確認できた。

6.3. 変形・沈下把握手法

本節では、面的な形状が把握できる MMS 点群を用いて、上流から下流までの河川全体および河川構造物や沈下・変形の恐れがある狭域の変形・沈下を把握する手法を提案する。

6.3.1. 提案手法の概要

本手法は、位置補正により精度管理された MMS 点群を用いて、沈下・変形箇所を把握するものである。その手法は、2つの工程で構成される。図 6-1 に、工程を示す。はじめの MMS 点群の縦断表示による変形・沈下区間抽出では、広域を対象に変形・沈下の可能性のある区間を把握する一次スクリーニング処理と位置付ける。MMS 点群の面的な分布表現による変形・沈下状況の詳細把握は、さらに詳細に把握する処理と位置付ける。

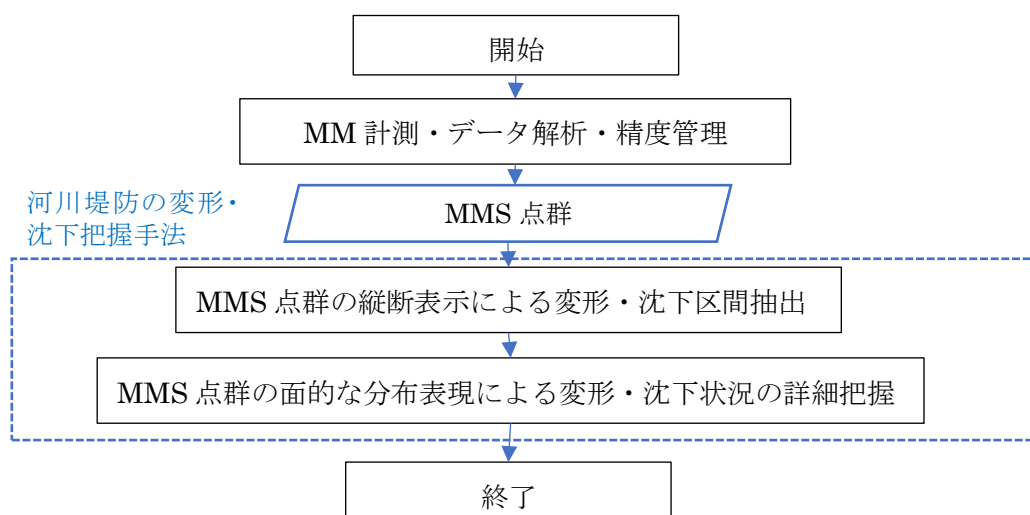


図 6-1 河川堤防の変形・沈下把握手法の流れ

6.3.2. 縦断表示による変形・沈下区間抽出手法

縦断表示による変形・沈下区間抽出では、帯状に長い堤防に対して堤防天端の変形・沈下区間を漏れなく把握することを目的とする。なお、把握された区間は、次項で示す面的な分布表現により詳細な変形・沈下状態を可視化する。

(1) 縦断表現の目的

帯状に長い河川堤防の沈下・変形状況を網羅的に確認するために、MMS 点群からの堤防天端の中央部、川面法肩部、および川裏法肩部の堤防高を把握し、堤防高、変形・沈下の進行具合、および横断勾配に着目した縦断を表現する。縦断表現それぞれの目的を以下に示す。

- 1) **堤防高縦断表現**：連続的な堤防高の表現から、周辺より低い区間といった現況を把握することを目的とする。さらに計画堤防高や計画高水位を重ね合わせることで、計画高が確保できていない区間を確認する。
- 2) **堤防高差分縦断表現**：異なる時期で取得した MMS 点群の標高差分から、変形・沈下進行が認められる区間を検出することを目的とする。天端中央と川表・川裏法肩付近の標高差分により、全体沈下や部分沈下といった沈下形態もあわせて確認する。
- 3) **天端横断勾配縦断表現**：縦断測線の間の状態把握と周辺と異なる横断勾配を示す箇所の把握を目的とする。一般に、堤防天端は区間ごとに一律な排水勾配が設定されており、周辺と異なる横断勾配を示す区間は変形・沈下の恐れがある。本手法はこうした区間を確認するものである。

(2) 縦断表現の処理内容

縦断表現処理の流れを図 6-2 に示す。はじめに、①川表・川裏部に法肩線を設定する。草の影響を軽減するため、天端道路部など植生被覆以外の場所又は草の少ない場所に法肩線を設定する。つぎに、②川表側の法肩線に対して、一定間隔の法線を反対の法肩線まで生成する。円山川の既往の堤防点検では最も短い変形として 5m 区間にわたる不陸が確認されている。こうした形状を把握するために、本研究では 2m 間隔で法線を生成するものとする。③法線ごとに、起点、中点、終点を川表側法肩、天端中央、および川裏側法肩取得点とし、④川表側法肩、天端中央、および川裏側法肩点の平面位置の最近傍の MMS 点群の標高を付加する。⑤川表側法肩と天端中央、および川裏側法肩と天端中央の横断勾配を算出し、⑥堤防高の標高と横断勾配を縦断図として展開する。また、⑦異なる時期の MMS 点群がある場合、川表側法肩、天端中央、および川裏側法肩取得点の MMS 点群の堤防高差分を縦断図として展開する。

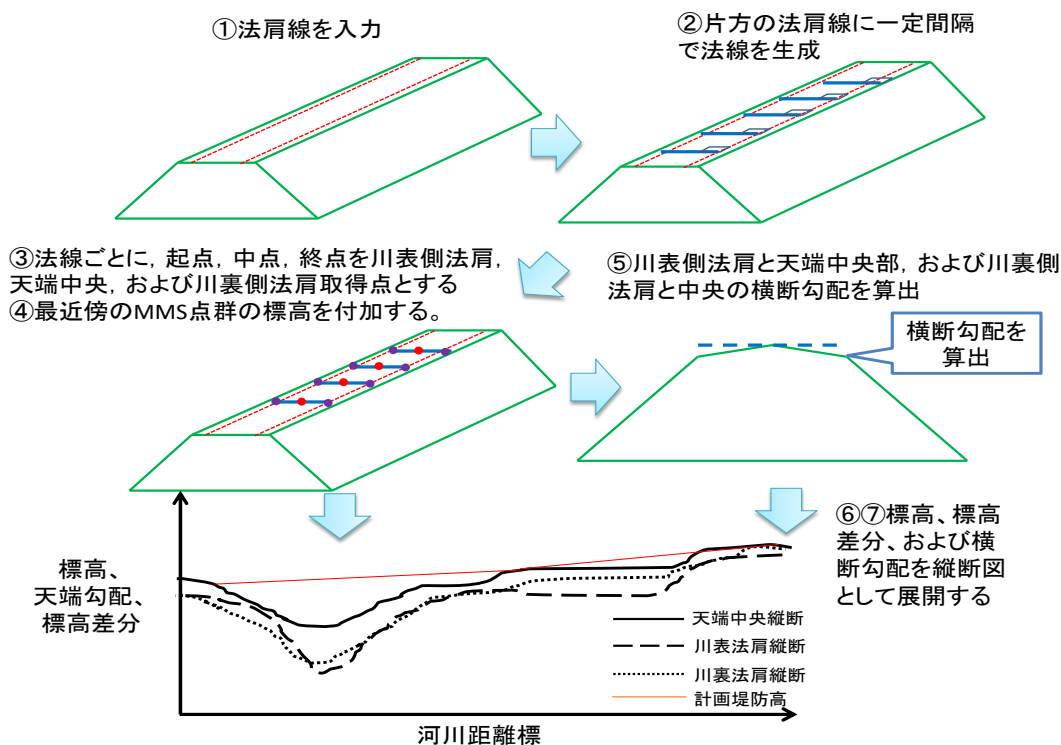


図 6-2 縦断表現処理の流れ

6.3.3. 面的な分布表現による変形・沈下状況の詳細把握手法

MMS 点群は、先に整理した縦断的な表現とは別に、細密な点群の面的表現も期待される。堤防の変形・沈下区間の面的な状況を、さらに詳細に把握する手法として、MMS 点群による連続標高図と標高差分図を用いた見える化手法を提案する。この手法は、縦断表現で評価されていない縦断測線間の詳細な状況と天端以外の堤防形状を把握する処理と位置付ける。

(1) 面的な分布表現の目的

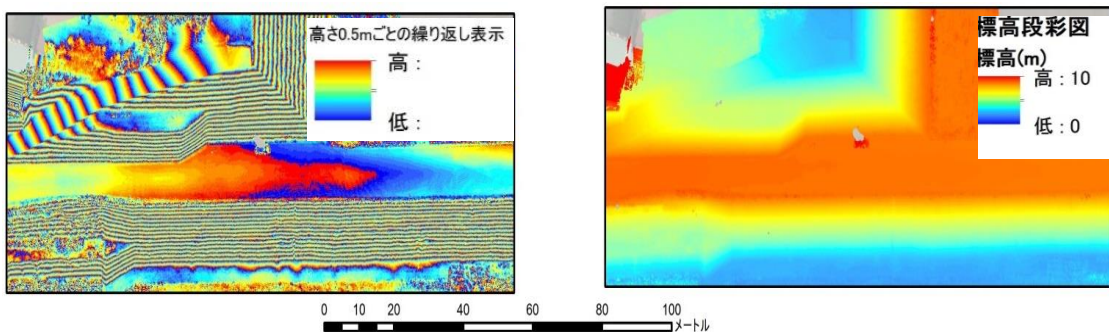
面的な分布表現による変形・沈下状況の詳細把握では、連続標高図、標高差分図を用いた評価を行う。また、樋門などの河川構造物がある場合、門柱の傾倒算出を行う。それぞれの確認の目的を以下に示す。

- 1) **連続標高図**：縦断的な表現では確認できない測線間の堤防高の状態や連続性を確認することを目的とする。
- 2) **標高差分図**：異なる時期で取得した MMS 点群の標高差分から、変形・沈下進行が認められる区間の空間分布を確認すること目的とする。
- 3) **門柱の傾倒算出**：樋門・水門などの門柱の傾倒方向を確認することを目的とする。

(2)面的な分布表現手法

1) 連続標高図

連続標高図は、一定の標高間隔ごとに色分けをした標高段彩図である。堤防点検では、0.02m以上の抜上りや護岸被覆境界付近の段差、特殊堤などの目地の開きを確認する。こうした微小な形状変化を確認するために、図6-3(a)に示すように標高0.02mごとに色を変え、0.5mごとに繰り返し色表現する連続標高図を用いる。その特徴は、周辺との相対的な形状変化を詳細に見える化できることである。従来手法の図6-3(b)で示す標高段彩図で表現が難しかった数cm程度の段差や局所的な凹凸形状を識別できる。また、法面などの傾斜部では、傾斜の状況が等間隔の線状に表現され、線の乱れから傾斜の異常箇所を容易に把握できる。



(a) 連続標高図 (提案手法) (b) 標高段彩図 (従来手法)

図 6-3 連続標高図

2) 標高差分図

標高差分図は、異なる時期に取得された MMS 点群の高さ方向の差分を算出した図である。その手法は①MMS 点群から線形の内挿補間により標高モデル (DEM: Digital Elevation Model) を生成、②DEM の重ね合せによる標高差分算出である。幅 0.1m 以上の特殊堤を再現できるように、0.05m 間隔の DEM の使用を基本とする。

3) 壁面の傾倒算出

MMS 点群を用いて、樋門の門柱などの壁面の傾倒を算出する。この主な処理は、図 6-4 に示す①門柱の面を計測した MMS 点群を抽出、②門柱が平面で構成された構造物と仮定し、抽出した MMS 点群から平均二乗法により平面を生成、③生成した面の傾き量算出の 3 つである。図 6-5 は、MMS 点群から傾倒算出の概念図である。MMS 点群からの検出可能な傾倒角度は、式(6-5)で表せる。

$$\theta = \tan^{-1} \frac{2\sigma}{h} \quad (6-5)$$

ここで、 θ : 傾倒角度、 σ : MMS 点群の計測精度、 h : 面の長さである。傾倒角度の精度は、MMS 点群の計測精度と生成する面の長さの影響を受けると考えられる。MMS 点群の位置精度誤差は、6.4 節より 0.02m であることが確認された。 $\sigma=0.02m$ の場合、図 6-5 に示す角度検出が想定でき、生成する面の長さが長いほど、細かい角度検出が期待できる。

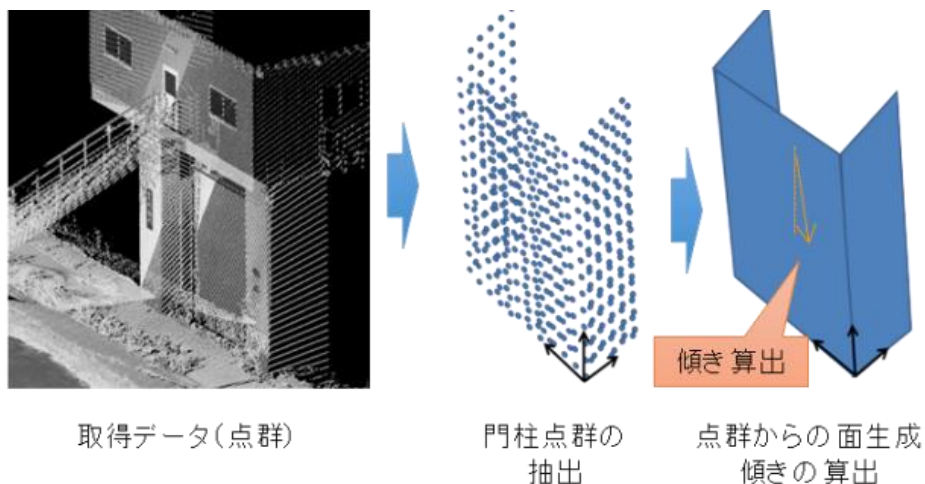


図 6-4 傾倒算出の流れ

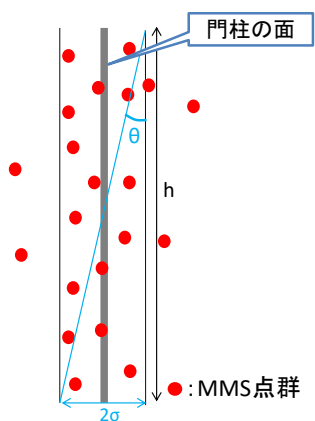


図 6-5 傾倒算出の概念

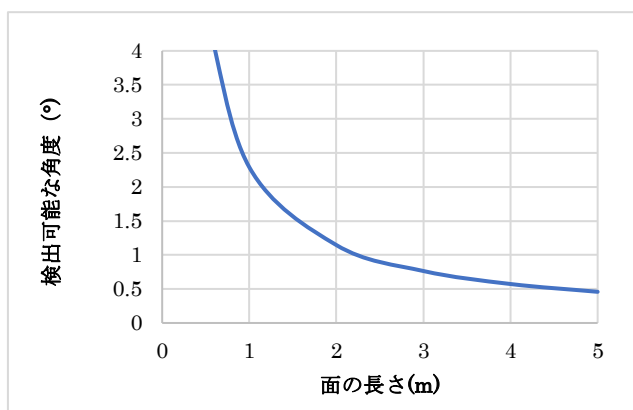


図 6-6 検出可能な傾倒角度 (理論値)

6.4. MMS 点群を用いた変形・沈下区間把握の効果

実際に沈下と変形が報告されている河川堤防で取得した MMS 点群を用いて、変形・沈下区間の抽出を実施した。その抽出結果を用いた検証から本手法の有効性を確認する。

6.4.1. 検証地区とデータ取得

本検証では、実際に沈下の発生が確認されている兵庫県の豊岡盆地を流れる円山川の中流域と、岡山県の南部を流れる吉井川の河口域の堤防を検証地区とした。前者は土堤区間であり、後者は河口域の特殊堤区間である。その位置図を図 6-7 に示す。検証地区に関する詳細は、5.4.1 項に示す。また、使用した MMS は、河川計測用 MMS である。データ取得や計測諸元の詳細は、5.3.1. 項に示す。



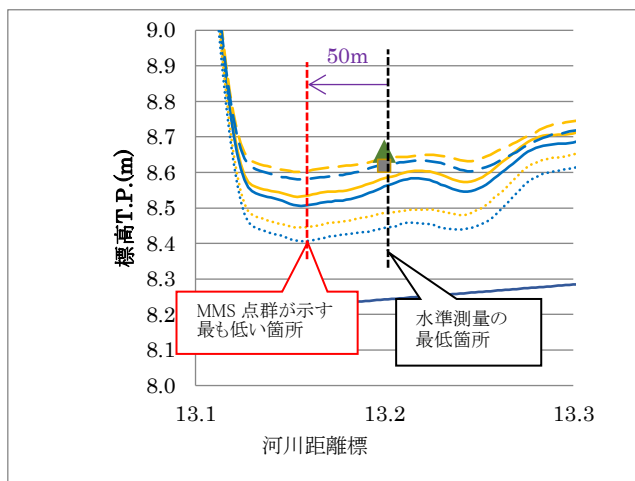
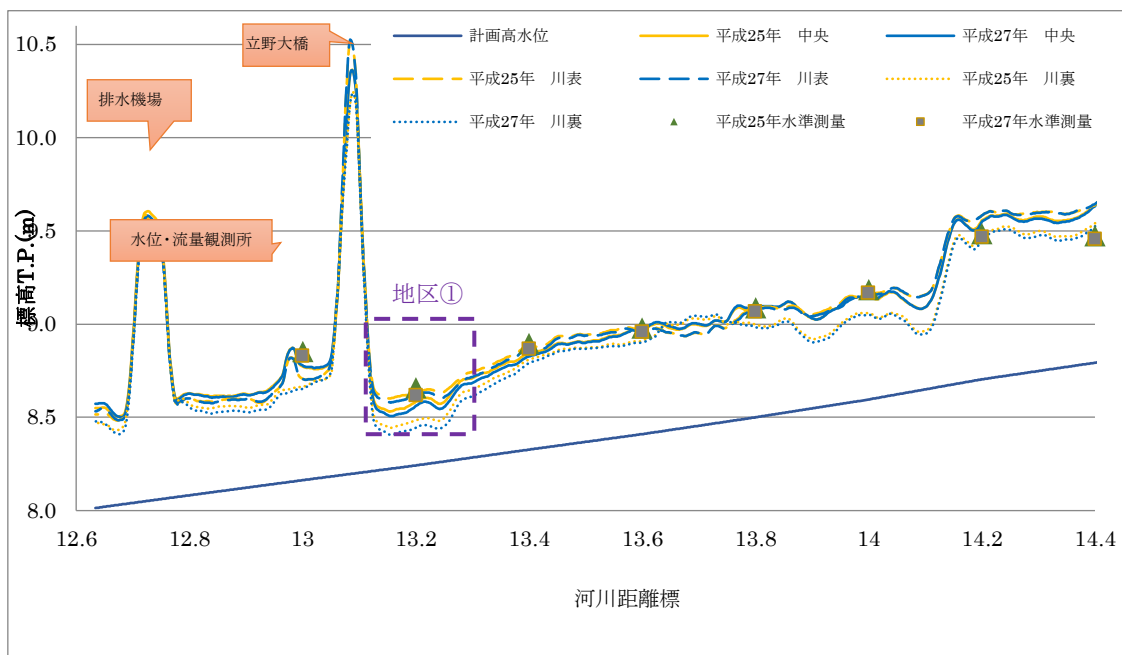
図 6-7 対象地区

6.4.2. 円山川における評価

円山川では、異なる時期の MMS 点群を用いた沈下進行把握に着目した検証を行い、本手法の有効性を確認した。

(1) 堤防高縦断の表現結果とその効果

堤防高縦断表現の有効性を確認するために、円山川左岸 13.0～14.4k.p 区間において、MMS 点群と定期縦断測量に基づく水準測量の標高値を比較した。図 6-8 に三ヵ年のうち最初の計測となる 2013 年と最後の計測となる 2015 年に取得した MMS 点群の縦断図を示す。あわせて、同じ時期に取得した約 200m 間隔の水準測量の縦断図を示す。MMS 点群による縦断図は、水準測量で明らかになっている 13.2k.p 付近の堤防高が周辺より低い状況を再現しており、更に水準測量では把握されていない河川距離標間の連続的な堤防高状態を把握できる。特に、MMS 点群縦断図より、堤防最低標高は水準測量成果で得られる堤防高より 0.2m 程度低く、その低い区間が約 50m 下流側にまで続いていることがわかる。この区間の河川距離標は川表側の法肩部に設置されているため、MMS 点群縦断図で示される川表側法肩と川裏側法肩の標高差は、水準測量で再現できていない。面的な堤防形状を再現できる MMS 点群は、従来手法より細かい間隔で、堤防天端全体を網羅的に評価できることが確認できた。



地区①拡大図

図 6-8 円山川 標高縦断図

(2) 堤防高差分縦断の表現結果とその効果

変形・沈下進行具合の把握手法として、堤防高差分縦断表現の有効性を検証した。図 6-9 は 2013 年（平成 25 年）と 2015 年（平成 27 年）の MMS 点群の堤防高差分を示した縦断図である。0.02m 以上の沈下を示す区間に注目すると、12.7k.p, 12.8~13.0k.p, および 14.3k.p 付近の川裏側が顕著な沈下進行を示し、13.2k.p 付近で全体的に沈下進行を示していることが確認できる。水準測量も同様に 13.0k.p 付近では 0.025m, 13.2k.p 付近で 0.04m 程度の沈下傾向を示すことから、本手法は、概ね 0.02m 以上の沈下変化のある区間を検出でき、天端全体の沈下や中央・法肩部といった部分的な沈下箇所も把握できることが確認できた。一方で、この図では、0.02m 程度の正の値を示す区間がある。6.4 節の位置精度検証では、MMS 点群の誤差が平均二乗誤差約 0.02m であることが確認できた。そのため、0.02m 程度の隆起区間は MMS 点群の位置精度誤差によるものと考えられる。

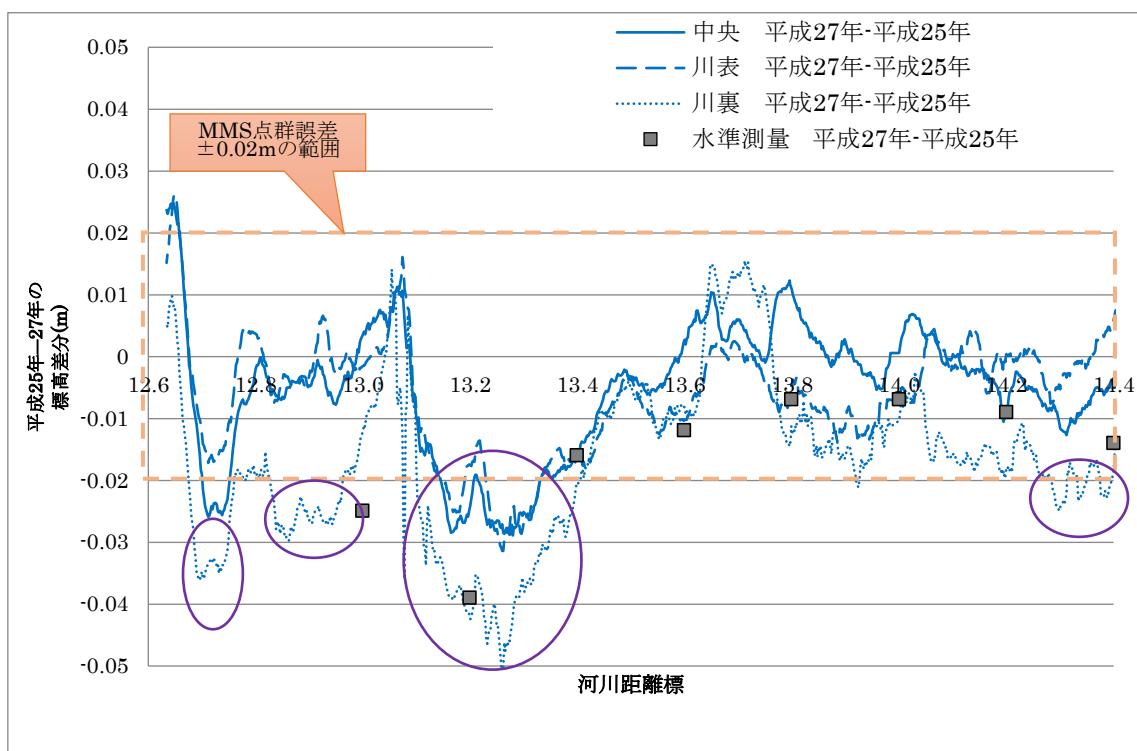


図 6-9 円山川 2013 年（平成 25 年）と 2015 年（平成 27 年）の堤防高差分縦断図

(3) 天端横断勾配縦断の表現結果とその効果

縦断測線間の状況や変形・沈下の恐れがある区間を検出する手法として、天端横断勾配縦断図を検証した。図 6-10 は三カ年の最後の計測となる 2015 年（平成 27 年）の MMS 点群を用いた横断勾配縦断図である。この図は、天端中央部より法肩部が低くなる勾配をマイナス、高くなる勾配をプラスの値で示す。天端中央と川表・川裏の勾配が共にマイナスとなる区間は天端中央から法肩に向かって低くなる排水勾配を示しており、天端中央と川表・川裏の横断勾配が正負逆となる区間は片勾配を示している。図 6-9 で沈下進行が確認された 12.7k.p と 13.2k.p 付近は、周辺に比べ急な横断勾配を示す。また、橋梁や河川構造物の横断部分を除くと、こうした急勾配を示す区間は、13.6～13.8k.p と 14.0～14.4k.p に確認でき、法肩部が低くなる部分沈下の恐れが示唆される。これらの地区は、図 6-11 (c) に示す旧河川の上に築堤した区間であり、旧河川の軟弱地盤による変形・沈下により異なる横断勾配を示す結果になったと考えられる。さらに、この手法は、一時期に取得された MMS 点群のみを用いて、重点的な確認が必要と考えられる箇所の把握できることが確認できた。

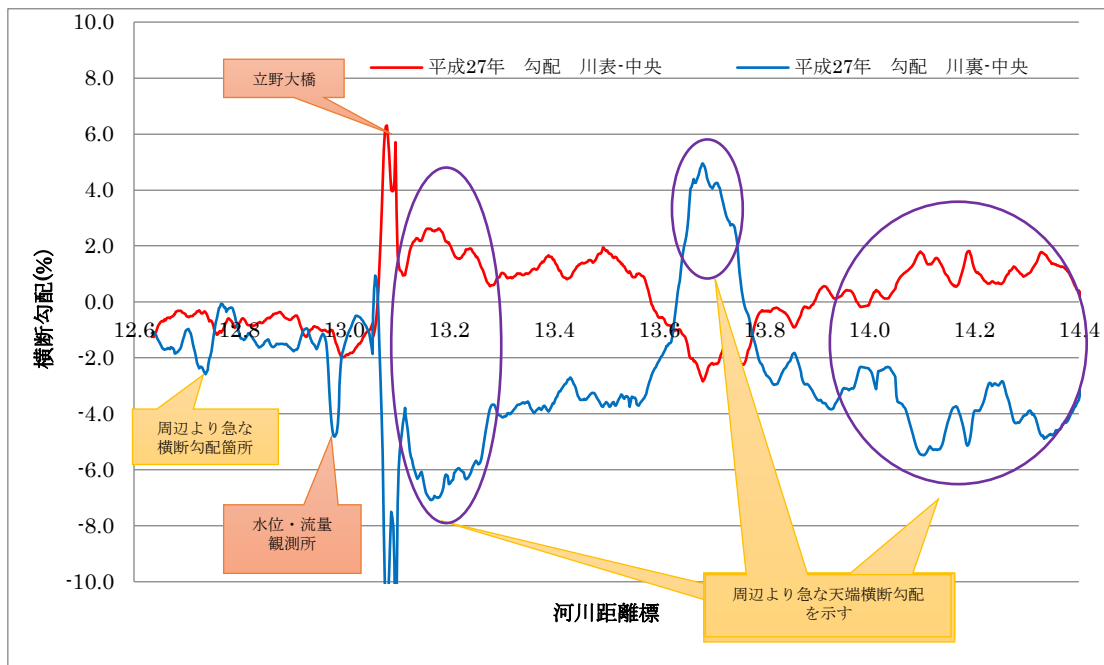


図 6-10 円山川 堤防天端横断勾配縦断図

(4) MMS 点群による面的な分布の表現結果とその効果

縦断による表現で沈下進行を確認した 12.6～13.4k.p 区間に着目し、連続標高図と標高差分図の有効性について考察する。図 6-11 に示す標高差分図と連続標高図から、13.2k.p 付近は 2013 から 2015 年で全体的な沈下が進行し、川裏側が特に低くなっていることや、12.6～13.0k.p 区間は川裏側の法肩が沈下傾向を示していることが面的に把握できる。これらの地区は、旧河川上に築堤した区間であることが、国土地理院発行の治水分類図から確認できる。位置情報を持つ MMS 点群は、地形図や治水分類図などの主題図といった空間情報と重ね合わせることが容易であり、視覚的に分かりやすい状況把握資料に繋げられることがわかる。

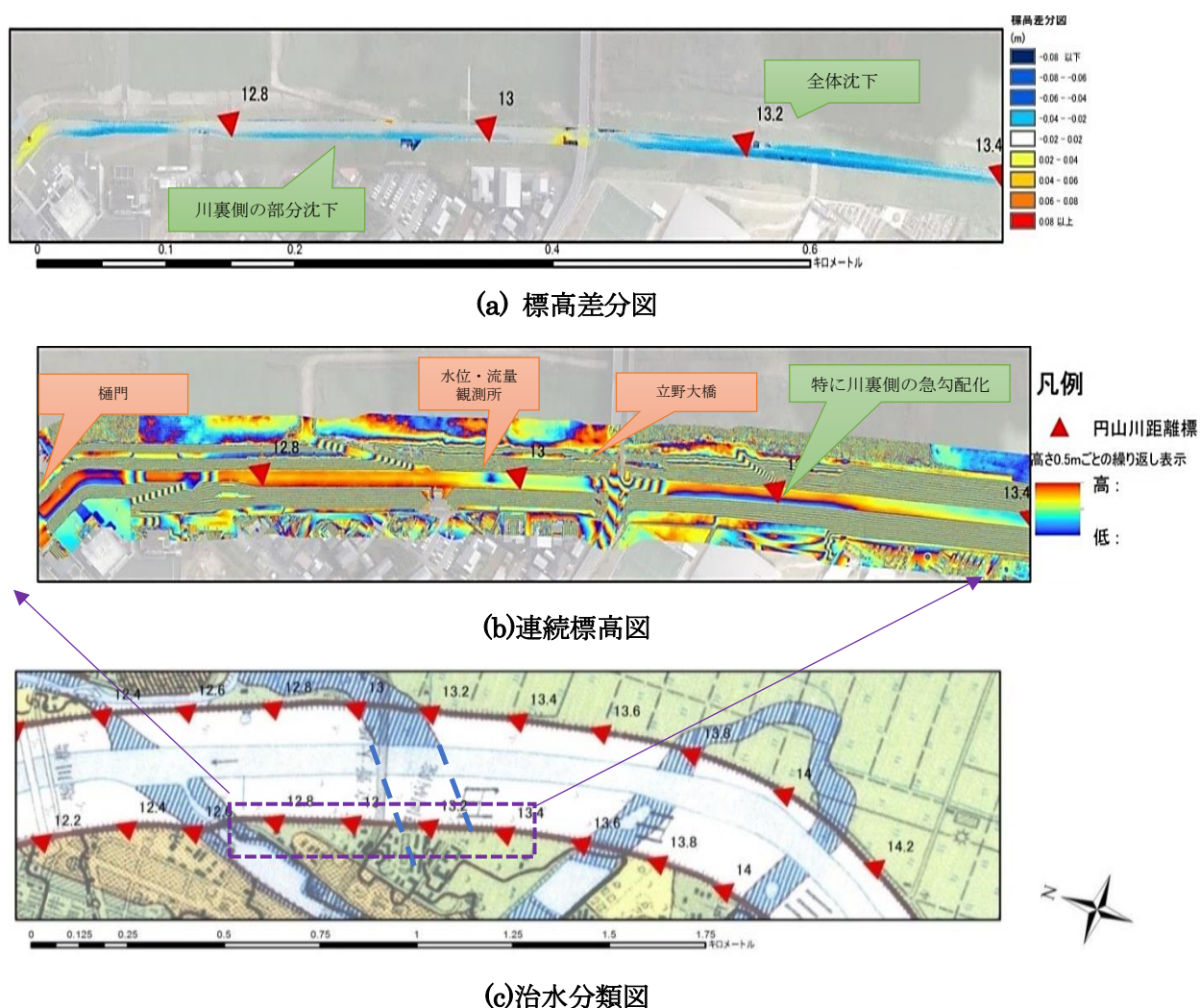


図 6-11 連続標高図，標高差分図および，治水分類図 (12.6～13.4k.p 区間)

次に川裏側で沈下が確認される 12.6k.p 付近の樋門に対し、MMS 点群を用いた門柱の傾倒状況の把握を試みた。この検証では、堤防点検で利用されている下げ振り [国土交通省水管理 国土保全局 河川環境課, 2106] の確認結果を確からしい値とし、MMS 点群による傾倒角度算出値と比較した。図 6-12 に下げ振りによる計測風景を、図 6-13 と表 6-2 に MMS 点群と下げ振りの傾倒算出結果とその較差量をそれぞれ示す。MMS 点群による傾倒量と下げ振りの傾倒量は最大 0.087° の較差が認められるものの、下げ振りと同程度傾倒結果を示した。従来手法と同程度の検出精度を得られたことから、適用可能なことが示唆された。



図 6-12 下げ振りによる傾倒計測風景

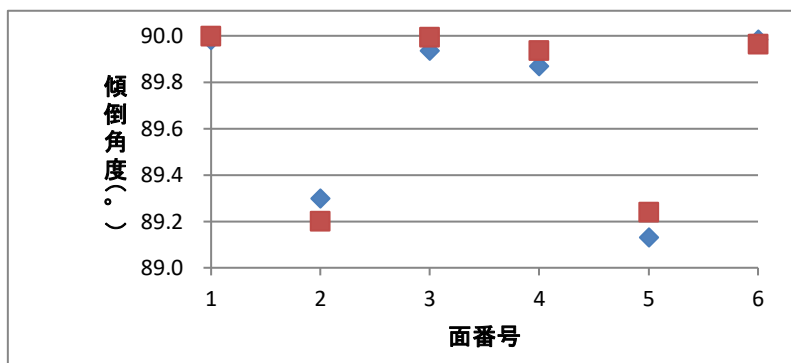


表 6-2 MMS 点群と下げ振りの傾倒較差

平均較差(°)	-0.014
最大較差(°)	0.087
標準偏差(°)	0.066

図 6-13 MMS 点群と下げ振りの傾倒算出結果

図 6-14 に、樋門周辺の変形・沈下状況をまとめた結果を示す。MMS 点群は、天端だけでなく、樋門門柱の沈下やその周辺の法面の陥没や図 6-15 に示す小段の逆勾配化といった変形・沈下状況が捉えられている。樋門の傾倒算出結果や標高差分図から把握した情報を加えることで、目視点検では把握が難しかった変形・沈下の位置や範囲といった空間分布状況を見える化できることが確認できた。

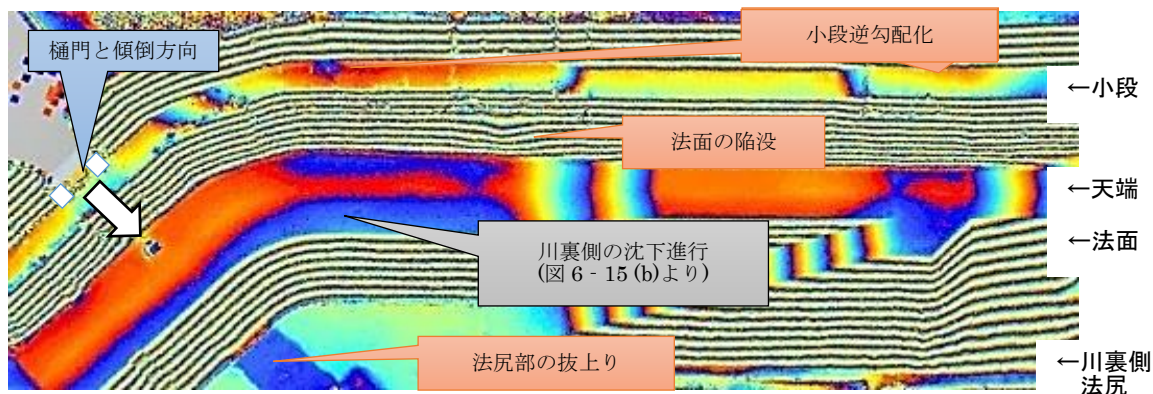


図 6-14 樋門周辺の連続標高図による沈下把握結果



図 6-15 小段の逆勾配化箇所の状況

6.4.3. 吉井川における評価

吉井川では、2015年1月と12月に取得したMMS点群を用いて、特殊堤の高さの変化の把握に着目した検証を実施した。

(1) 堤防高縦断の表現結果とその効果

図6-16に示す道路天端と特殊堤天端の部分において、MMS点群と定期縦断測量に基づく水準測量で得られた堤防高を縦断表現した結果を図6-17に示す。水準測量は、MMS計測と同日に、天端道路中央部と特殊堤天端部の高さを100m又は200m間隔で取得した。特殊堤の縦断図に現れる凸部は、周辺の特殊堤より高い陸閘の開閉門の形状が再現されたものである。MMS点群の縦断図は、水準測量と同様な堤防高形状を示し、更に水準測量より細かく連続的な堤防高を再現できる。この地区は、0.2~0.6k.p区間で最も低いことが把握でき、1.2k.pから2.0k.pは、1月に比べ12月のMMSデータが低くなっていることがわかる。また、計画高水高等と重ね合わせることで、現況堤防高の余裕の程度を漏れなく確認できる。これらの結果から、確実な堤防高把握に利用できることが示唆された。

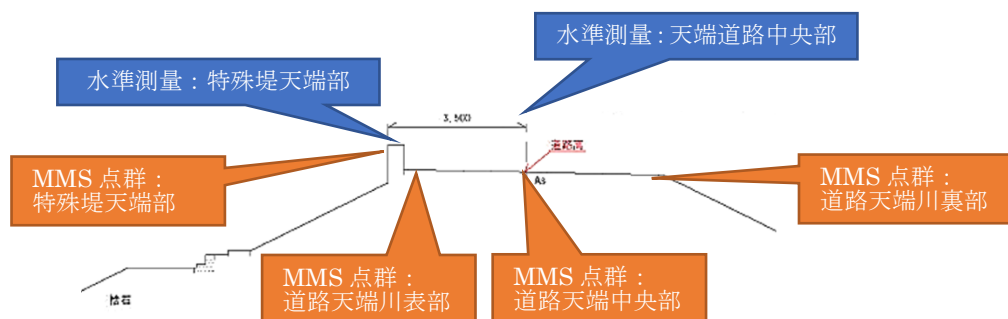


図 6-16 縦断取得位置図

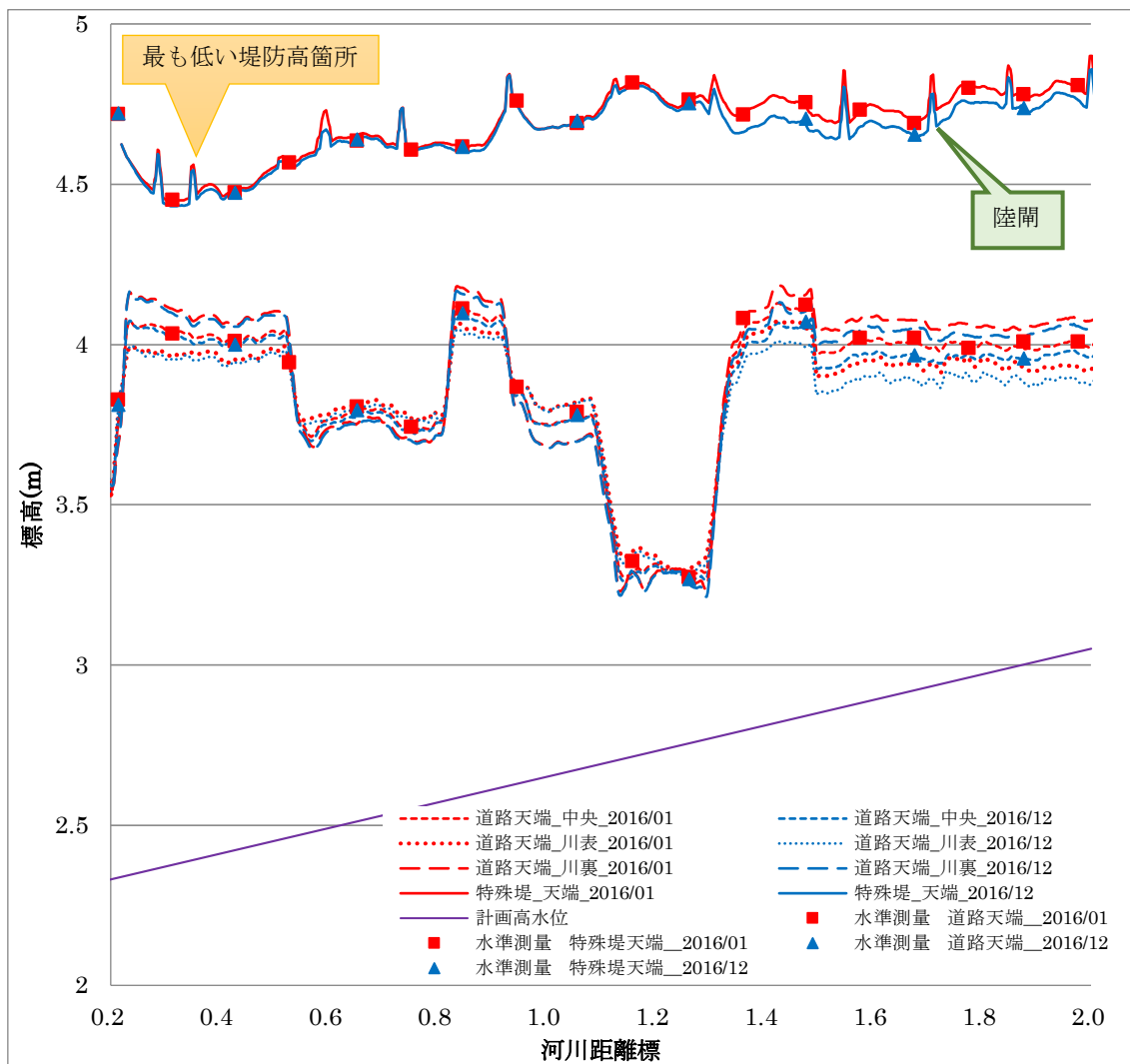


図 6-17 吉井川 堤防高縦断図

(2) 堤防高差分縦断の表現結果とその効果

図 6-18 は、2015 年 1 月と 12 月の MMS 点群の堤防高差分を示した縦断図である。6.4 節の位置精度検証では、MMS 点群の誤差が平均二乗誤差約 0.02m であることが確認できた。そこで、約 0.02m 以上の沈下を示す区間に注目すると、1.2k.p から 2.0k.p は、0.02m~0.07m 程度の沈下傾向が水準測量と MMS 点群ともに確認できる。この区間は 2015 年 1 月に改築された堤防である。一般に改築された堤防では圧密沈下により沈下の進行が速いと言われており、こうした沈下現象を捉えた結果と考えられる。また、100m 又は 200m 間隔で取得された水準測量成果で表現ができない縦断方向の連続的な高さ変化や沈下や、川裏側に比べ川表側の沈下が進行していることを MMS 点群による縦断図で把握できることも確認できた。

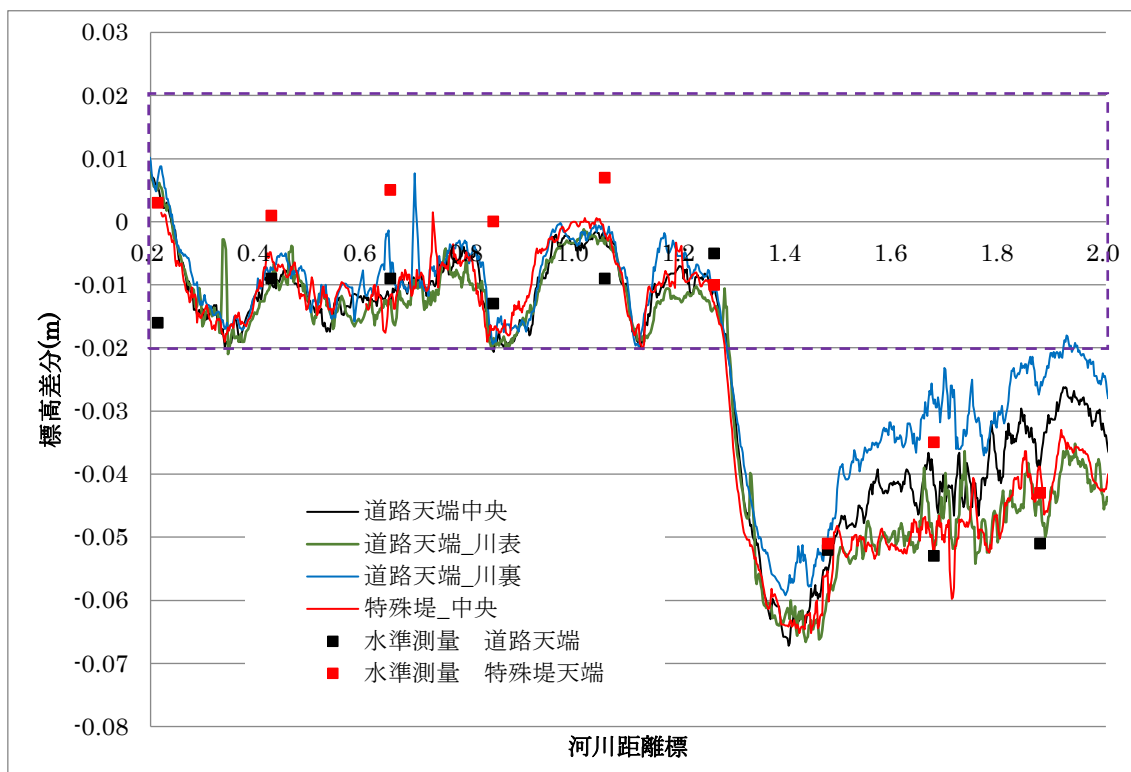


図 6-18 吉井川 2015 年 1 月と 12 月の堤防高差分縦断図

(3) 天端横断勾配縦断の表現結果とその効果

図 6-20 に天端道路の横断勾配縦断図を示す。概ね全域で一般的な堤防天端の排水勾配である 2% を示し、1.2~1.3k.p 区間で、横断勾配が 0% に近いことが確認できる。こうした横断勾配の小さい区間は排水不良の恐れがあり、巡視などの現地点検で水溜まりの有無などを確認すべき箇所と捉えることができる。

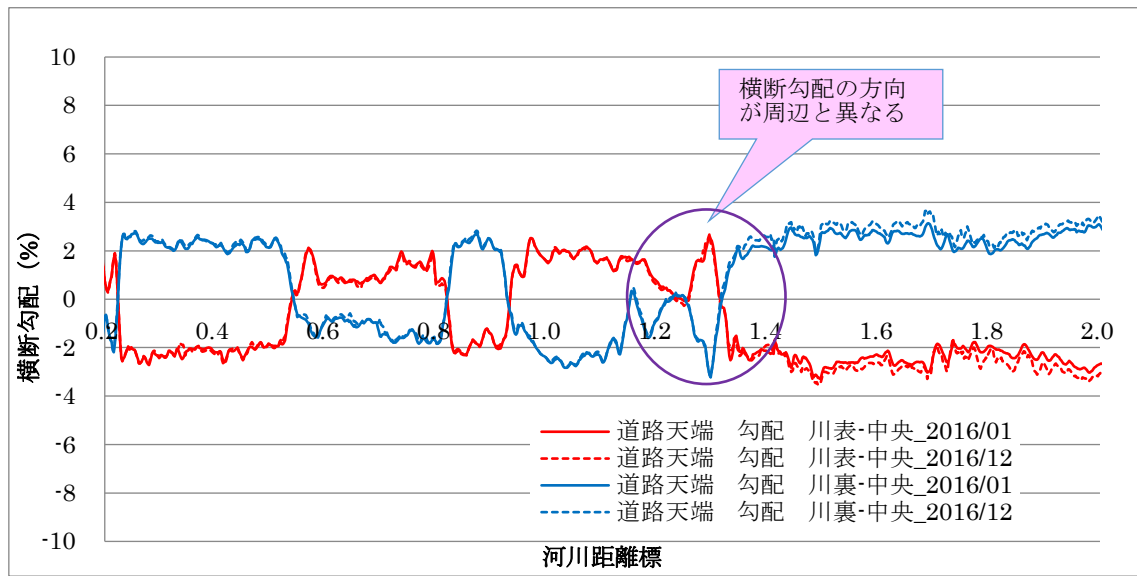


図 6-19 吉井川 天端道路の横断勾配縦断図

以上の評価から、堤防高、変形・沈下の進行具合、および横断勾配に着目した縦断表現は、連続的な堤防高を把握できること、異なる時期の MMS 点群を用いた差分縦断表現により、実現目標 0.05m より細かい 0.02m 程度の変形・沈下進行区間を把握可能なこと、さらに変形や沈下といった河川堤防の弱点となりうる箇所を網羅的に把握可能なことが確認できた。

(4) MMS 点群による面的な分布表現結果

吉井川では、確認された特殊堤の高さが最も低い 0.4k.p 付近に着目し、連続標高図の有効性を考察する。図 6-20 は連続標高図を示す。0.5~0.6k.p 区間の天端は、堤防工事時の施工区間の境界があり、境界の前後で天端横断勾配が異なる。また、0.4k.p 付近は、図 6-21 に示す 2 cm 程度の目地の開きが現地で目視確認されている。図 6-20 では、天端で川裏から川表に向かって低くなる片勾配を示し、目地の開き箇所の付近が周辺に比べ急勾配になっている。目地の開き箇所から上流側約 85m 区間の法尻部は周辺より最大 25 cm 程度低く、堤防天端より川表側の法尻で顕著な変形を示しており、川表側への沈下傾向が示唆される。また、レーザスキャナの設置位置を高くした MMS は、特殊堤による計測死角領域を軽減

でき、法尻部の堤防把握に有効なことも確認できた。以上の結果から、本手法は、吉井川でも天端だけではなく、法尻付近の変形・沈下が顕著に現れた区間の位置と広さを定量的に評価することができることが確認できた。

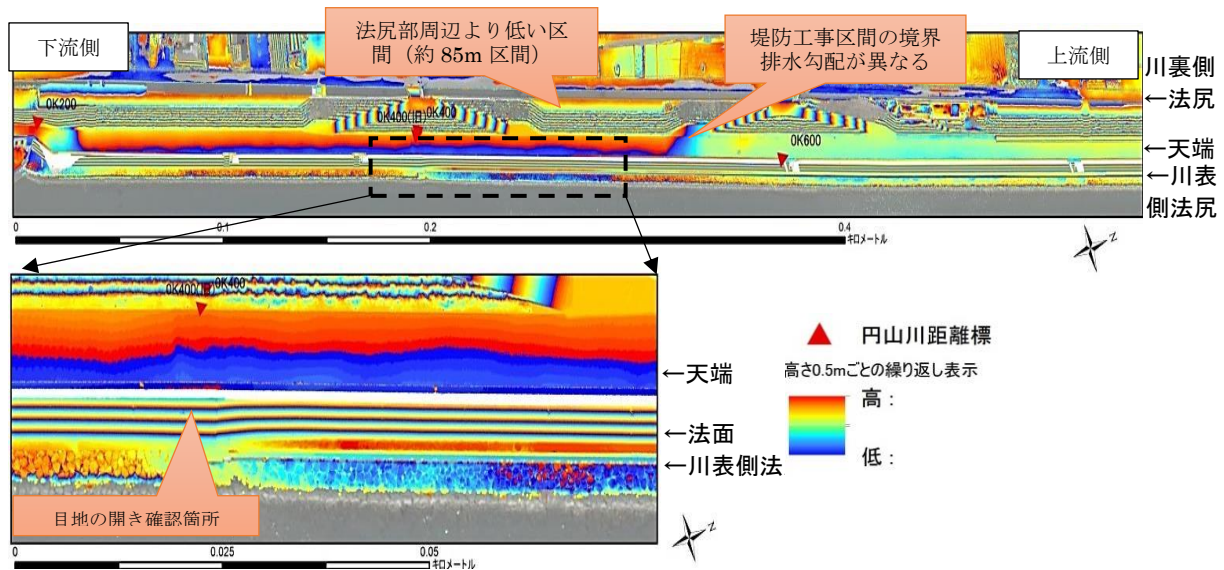


図 6-20 吉井川 連続標高図 (0.2k.p~0.4k.p 区間)



図 6-21 目地の開き確認箇所

6.5. 本章のまとめ

本章では、MMS が把握できる変形・沈下量を具体的な数値で評価するとともに、堤防の変形・沈下を把握する計測手法と、その状態を見える化する新しい可視化手法を検討した。その内容は 1) 広域での状況を把握するための堤防天端の縦断表現手法と、2) 詳細な状況を把握するための MMS 点群の面的表現手法の検討である。その結果、次の結論を得た。

- ・堤防高，変形・沈下の進行具合，および横断勾配に着目した堤防天端の縦断表現により，河川堤防の弱点となりうる箇所を漏れなく把握できる。この手法は，連続的な堤防高が把握できること，0.02m 以上の変形・沈下進行区間を把握できること，周辺とは異なる天端横断勾配区間を把握できることが確認でき，さらに天端幅の狭い特殊堤も確実に評価できることも確認できた。
- ・MMS 点群の面的表現手法は，縦断表現により抽出した区間の詳細な変形・沈下状況の見える化を目的とした。天端だけではなく，その周辺の状況を把握でき，治水分類図などの他の空間情報と重ね合わせることで，視覚的にわかりやすく可視化できることが確認できた。さらに，MMS 点群を利用した構造物，門柱の傾倒点検は，下げ振りなどの従来手法と同等な精度で検出できることもあわせて確認できた。

以上の結果から，堤防天端を走行して取得した MMS 点群は，実現目標とした 0.05m の高さ変化を捉えられ，堤防天端の変形や沈下といった河川堤防の弱点となりうる箇所を網羅的に見える化をできることが示された。これにより，河川堤防の変形・沈下区間を漏れることなく把握でき，河川の越流が発生する恐れのある区間の確実な把握に寄与できることが確認できた。

一方で，本手法は，縦断表現の測線位置を設定し，その後データ処理により各種の縦断表現と面的な分布表現データを生成する。測線位置は，目視で堤防を網羅的に確認しながら設定する必要がある。この測線位置の設定を自動処理で行うことができれば，迅速な対応ができる可能性があることがわかった。

7. 河川堤防高把握手法の検討

7.1. はじめに

本章では、越流が発生する恐れが高い河川堤防の区間を漏れなく把握することを目的に、MMS点群を用いて堤防高を把握する手法を提案する。6章では、堤防の変形・沈下状態が見える化する新しい可視化手法を検討した。この手法は、縦断の測線位置を目視により設定し、その後データ処理により可視化を行った。その際、河川堤防の計測区間を網羅的に目視確認しながら測線位置を設定する必要があり、目視確認に時間を要した。縦断の測線位置をMMS点群から自動で設定できれば、より迅速にMMS点群から維持管理に必要な情報が取得可能となる。そこで7章では、MMS点群から自動処理により堤防高を縦断図として表現する手法を検討する。本章で指す自動処理とは、MMS点群を用いたデータ処理により、堤防高として取得する位置（測線）をMMS点群の形状から認識させ、縦断図として表現するものである。自動処理による堤防高抽出を実現するために、7.2節で、堤防高把握に関する課題の抽出と解決策の検討を行い、7.3節で自動処理により堤防高を把握する新たな手法を提案する。そして、7.4節で、実験計測で取得したデータに提案手法を適用した結果を示し、その妥当性を考察する。

7.2. 堤防高把握に関する課題の整理と解決策の検討

本節では、堤防高の把握の重要性と、維持管理の現状、および関連する既往研究を確認し、それらの課題を整理する。そして、その課題の解決策を検討する。

7.2.1. 堤防高把握の重要性と要求精度

2章で述べたように、近年、集中豪雨や大雨の発生頻度が増加傾向を示し、計画規模を上回る洪水が毎年のように発生している [服部泰士, 2015]。被害規模が大きくなる洪水災害の多くは、越流を伴うものである [末次忠司, 2010]。例えば、平成27年9月の関東・東北豪雨による鬼怒川の災害では、0.2mから0.3m程度の越流が発生し、その後、破堤した [国土交通省, 2016]。この災害では、破堤付近の約500m区間の堤防高が、計画堤防高と比較しておしなべて低い状態であったことや [国土交通省, 2016]、0.1m程度の堤防高の違いが越流水深や越流時間に大きな影響を及ぼすこと、さらに、土のうにより0.2m程度の嵩上げができれば、破堤に至らなかった可能性が報告されている [常田賢一, 2015]。そのため、洪水の災害リスクが高まっている現在の河川の維持管理では、0.1m程度の堤防高の変化を漏れることなく把握し、治水に必要な堤防高の維持や、洪水時に土のうの嵩上げなどによる的確な対策を講じることが求められる。

7.2.2. 堤防高把握の現状とその課題

河川の維持管理で把握する堤防高は、洪水の越流を防ぐことのできる堤防の高さであり、堤防天端の最も高い部分となる。特殊堤区間ではパラペット構造の天端の高さを、マウン
トアップされた歩道が天端に整備された堤防では歩道の高さを、それぞれ堤防高として把握する。こうした堤防高を把握するために、現在の維持管理では、5年に一度の定期縦横断測量と、年数回の堤防等河川管理施設の点検（堤防点検）が一般的に行われている【国土交通省国土地理院, 2016】、【国土交通省水管理 国土保全局 河川環境課, 2016】。定期縦横断測量は、200m といった一定間隔ごとに配置された河川距離標を対象に、堤防天端の高さと横断形状をトータルステーション測量や水準測量を用いて計測する機会が多い。一方、堤防点検は、局所的な変形や沈下の有無を目視で確認し、その長さや深さを、巻尺などを使って計測している。しかしながら、定期縦横断測量のような代表断面による管理は、測線間の堤防高が把握されておらず、また巻尺を使った堤防点検は、広く連続的につながった低い箇所を捉えることが難しい。

7.2.3. MMS を用いた堤防形状の把握に関する既往研究とその課題

MMS を河川の維持管理に利用した既存研究がいくつか行われている、その多くは、MMS 点群から地形図や河川管理附図を作成する研究である。【川野浩平, 2015】や【田中成典, 2011】は、MMS 点群を用いて天端と法面の境界線（ブレイクライン）を生成する手法を提案し、地形図や維持管理の基礎データとして利用可能な 3 次元モデルが生成できることを示した。この手法では、詳細な堤防高の再現ではなく、河川堤防の骨格形状の再現に主眼を置いた検討がなされている。しかし、堤防高を把握する手法は確立されていない

また、前章では、MMS 点群を用いて堤防の変形・沈下の状態を見える化する可視化手法を検討してきた。この手法は、堤防天端の中央部と川表・川裏法肩部に設定した 3 本の測線に対し、堤防高、変形・沈下の進行具合、および横断勾配を、縦断表現を用いて可視化したものである。しかし、この手法は、測線の位置情報を予め人が入力する必要があり、その入力時に時間を要した。

7.2.4. 解決策の検討

本章では、越流が発生する恐れが高い河川堤防の区間を漏れることなく確実に把握することを目的とし、MMS 点群から連続的な堤防高を自動で把握する手法を検討する。具体的には、堤防天端の特徴である平坦性と連続性に基づいたアルゴリズムにより、MMS 点群から自動処置で堤防高を把握する。堤防天端の横断方向は、基本的に平坦であり、雨水を排水するためのわずかな勾配が設けられている。その勾配は、舗装部で 3%以下、非舗装部で

10%以下の設計基準が設定されている [財団法人 国土技術研究センター, 2000]. また, 河川堤防の縦断方向は, 急激な高さ変化箇所は少なく, 連続的につながった形状である. MMS 計測は, こうした形状を持つ堤防天端を走行することが基本である. これらの特徴を生かし, MMS の走行位置情報 (軌跡データ) と天端の平坦性と連続性に基づいたアルゴリズムにより, 自動処理で効率的に堤防高を把握する手法を検討する.

7.3. 堤防高把握手法

本節では, 天端周辺の地形を連続的に再現できる MMS 点群から, 堤防高を把握する手法を提案する.

7.3.1. 提案手法の概要

本手法は, MMS 計測により得られる軌跡データと MMS 点群を用いる. その処理は, 3つの工程で構成される. 図 7-1 に, MMS 計測から堤防高を把握する処理の流れを示す. はじめに, a)MMS 点群を用いた地形解析を行い, 堤防天端の平坦領域を抽出する. b)その結果と軌跡データを用いて, 堤防高の候補となる箇所を抽出する. 最後に, c)縦断方向の連続性に着目した処理を施し, 堤防高を抽出する.

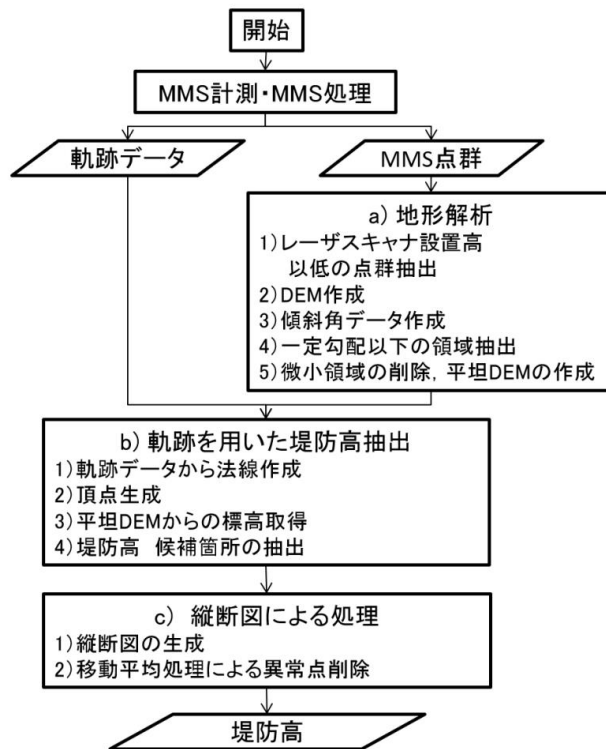


図 7-1 堤防高把握処理の流れ

7.3.2. 堤防高把握手法

以下では、3つの工程の処理内容を詳しく述べる。

(1) 地形解析

地形解析では、平坦性に着目し、天端領域を抽出する。その手順を図 7-2 に示す。はじめに、1) MMS のレーザスキャナ設置高より低い計測点を抽出する。MMS 点群の中で樹木や高架といった明らかな堤防以外の計測点を削除するためである。次に、2)MMS 点群から内挿補間により数値標高モデル (Digital Elevation Model: DEM) を作成する。そのグリッドのサイズは、数十cm程度の幅を持つ特殊堤の天端を再現できるように、0.05m とする。そして、3)DEM から傾斜角データを作成する。傾斜角データは、GIS ソフトのラスタ解析機能などを用いる。4)では、排水勾配以下となる傾斜領域を抽出する。設計基準の最大勾配に基づき、舗装区間は 3%以下、非舗装区間は 10%以下の傾斜領域を抽出することを基本とする。ただし、築堤から時間が経過した河川堤防では、時間経過に伴う形状変化により基準より大きい勾配を示す区間が存在する恐れがある。こうした区間では、必要に応じて勾配の閾値を調整する。なお、舗装区間と非舗装区間の識別は、作業者が予め設定する。こうして得られた結果には、微小な面積の平坦領域が含まれる。これらは、水平の傾きを持った植生や、標識などの道路付属物がほとんどである。連続的につながった形状を持つ堤防天端は、平坦領域の面積の大きい領域となるため、5)一定面積以下となる領域を削除する。本実験計測区間で最も面積が小さい天端は、約 10m² (幅約 0.2 m×長さ約 50m) のパラペット部の天端であったため、10m²以下の領域を削除することにした。こうして得られた平坦な領域の DEM を抽出したものを平坦 DEM と呼ぶ。

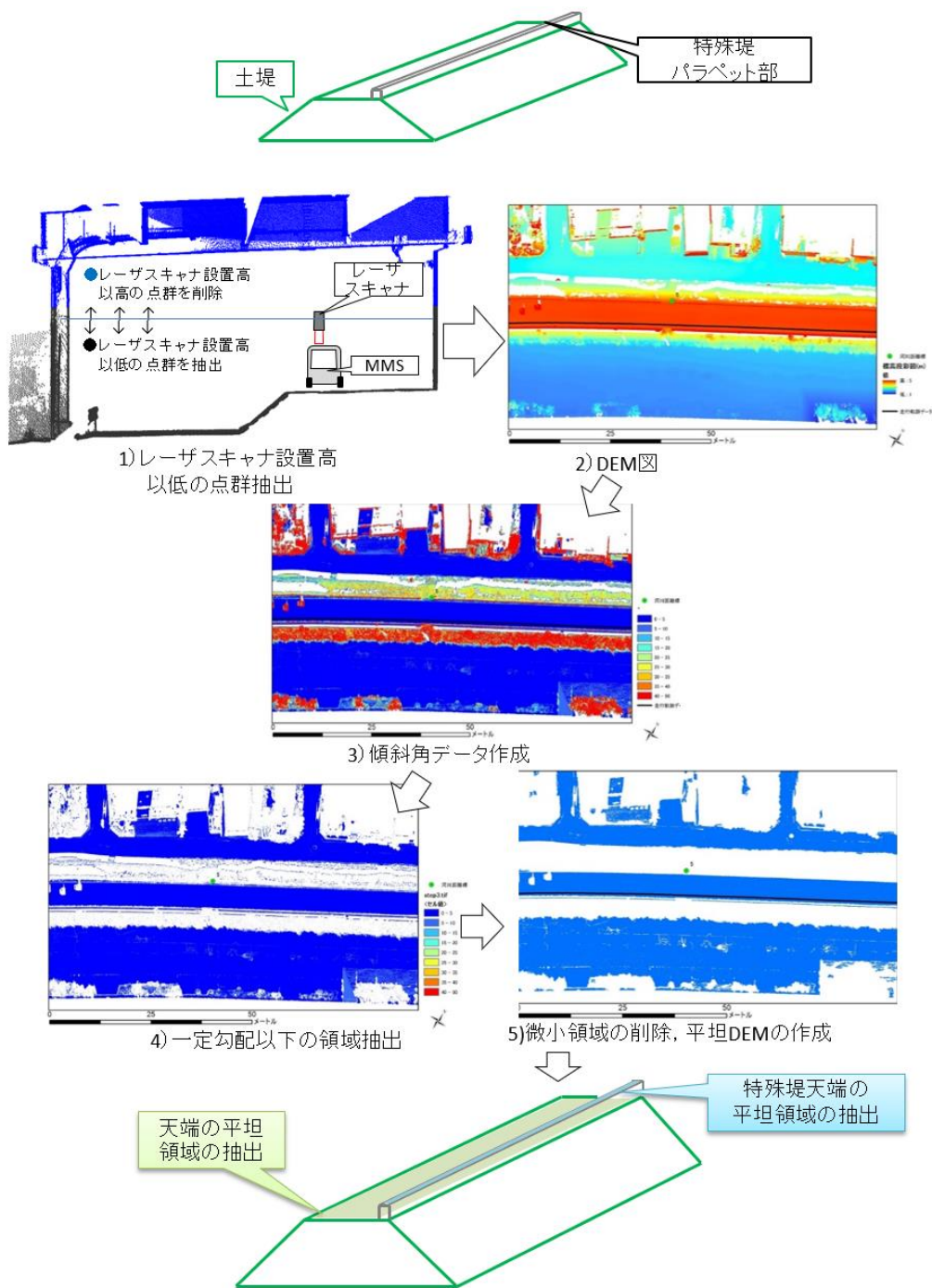


図 7-2 地形解析の概念図

(2) 軌跡を用いた堤防高抽出

この処理では、軌跡データを基に、天端から法尻に向かって、堤防高の候補となる高さ情報を検索する。まず、図 7-3 の左図に示すように、1)MMS 計測で得られる軌跡データに対して、2m 間隔の法線を生成する。対象地区における既往の堤防点検で確認された周辺より低い区間は、最も短いもので縦断方向に 5m にわたって存在した。こうした区間を再現するために 2m 間隔で法線を生成するものとした。次に、図 7-3 の右図に示すように、2)法線に対し、法尻付近まで 0.05m 間隔で頂点を生成する。対象地区の特殊堤で最も狭い天端幅は、0.2m であった。特殊堤の堤防高を再現するために 0.05m 間隔の頂点を生成する。そして、3)頂点と平坦 DEM を重ね合わせ、頂点の平面位置における平坦 DEM の標高を取得し、頂点の高さ情報とする。最後に、4)法線ごとに最も高い標高を示す頂点を抽出し、堤防高候補点とする。

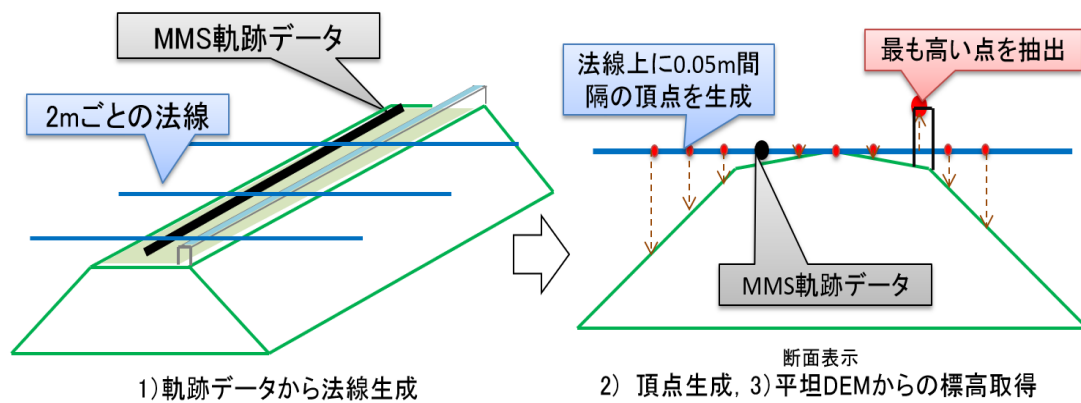


図 7-3 軌跡を用いた堤防高の抽出

(3) 縦断面図による処理

堤防高候補点の一部には、車等を計測した点が含まれる恐れがある。これらの点を除去するために、図 7-4 に示すように、1)横軸に河口からの縦断距離を、縦軸に堤防高を示した縦断面図を作成し、2)堤防高の移動平均を算出する。3)堤防高が移動平均より 1m 以上高い凸形状を示す場合、その値を削除する。移動平均の区間長は、事前検証から決定した。全長約 7m の車を計測した MMS 点群を用いた事前検証により、約 2 倍の長さとなる 15m 以上で移動平均を施すことで車の計測点を削除できることを確認した。そこで、法律で規定されている車の最大長さ 12m を考慮し、移動平均の区間長を 25m に設定した。

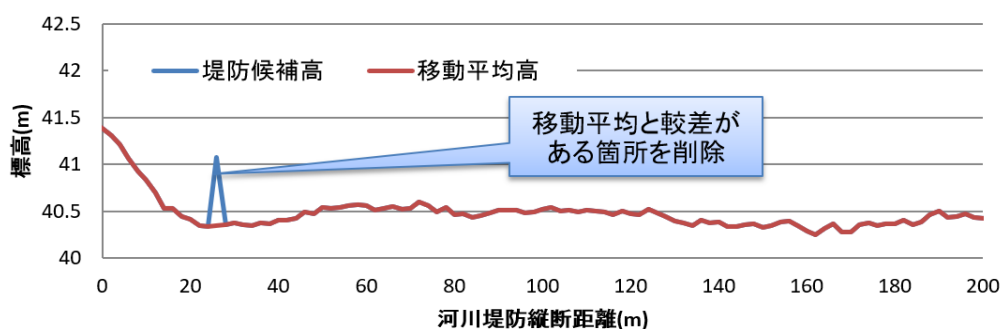


図 7-4 縦断面図による処理の概念図

7.4. 堤防高把握の効果

本節では、実際に河川堤防で取得した MMS 点群に堤防高把握手法を適用し、その有効性を確認した。

7.4.1. 検証地区とデータ取得

河川堤防の天端は、舗装された区間と舗装されていない区間が存在する。これらの区間における提案手法の有効性を確認するために、検証区間は、岡山県の南部を流れる吉井川 0.0~12.0k.p の舗装区間と、奈良県を流れる大和川 29~30.2k.p の非舗装区間を選定した。その位置図を図 7-5 に示す。吉井川は、0~5.6k.p の一部区間で幅 0.2~0.6m の特殊堤のパラペットが整備されている。2 箇所の道路橋が跨ぐ区間と 400m 程度の樹木に覆われた GNSS 不可視区間が存在する。一方、大和川は全区間が GNSS 可視区間である。

使用した MMS は、河川計測用 MMS である。データ取得や計測諸元の詳細を、5.3.1. 項に示す。この実験計測では、PDOP の予測が 3 以下となる時間帯に絞って MMS 計測を行うものとした。

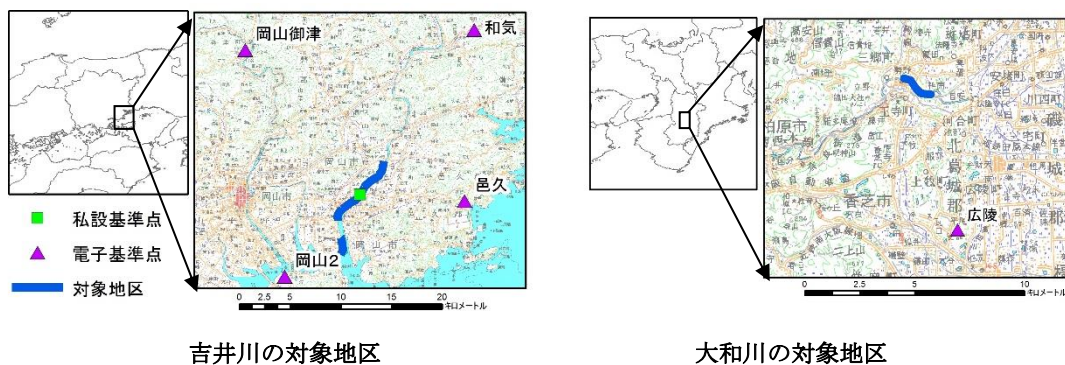


図 7-5 対象地区

7.4.2. 評価の概要

吉井川と大和川で取得された MMS 点群に対し、本提案手法を適用し、把握した堤防高を縦断図として整備した。作成した縦断図の確からしさを評価するために、4.2k.p から 11.6k.p において、全区間評価と部分評価を行った。全区間評価では、定期横断測量成果との比較から、その確からしさを評価した。部分評価では、代表的な天端形状を示す区間に着目して、その再現性を確認した。

7.4.3. 全区間評価

図 7-6 は、MMS 点群から作成した堤防高，定期縦横断測量による堤防高，計画堤防高および計画高水位を重ねた縦断図である。4.7~5.5k.p は特殊堤の区間である。特殊堤区間は、パラペットを設置しているものの周辺に比べ低く，計画堤防高を満たしてないことが明瞭に確認できる。また，天端幅の狭い特殊堤天端でも水準測量による成果と概ね同じ値を示しており，土堤の天端と同程度の精度を確保していることが確認できた。4.4k.p や 6.6k.p 付近は，約 50m の区間にかけて，計画堤防高は満たしているものの，周辺より 0.15~0.2m 程度低いことが確認できる。計画堤防高や計画高水位と現況の堤防高を容易に比較できるだけでなく，従来手法で難しかった，周辺より低い区間を漏れなく連続的に把握できることが確認できた。

次に，MMS 点群から把握した堤防高の確からしさを確認するために，実験計測区間に対して 200m 間隔で取得される定期縦横断測量成果と比較した。その比較結果を表 7-1 に示す。MMS 点群から得られる堤防高と定期縦横断測量成果の較差は，平均二乗誤差で 0.037m を示した。この精度は，4 章で示した MMS 点群と検証点との平均二乗誤差 0.034m と概ね同じ値である。この結果より，本手法は，MMS 点群から堤防高の把握処理による精度劣化がほとんどなく，MMS 点群の位置精度と同等な精度を確保できることが確認できた。

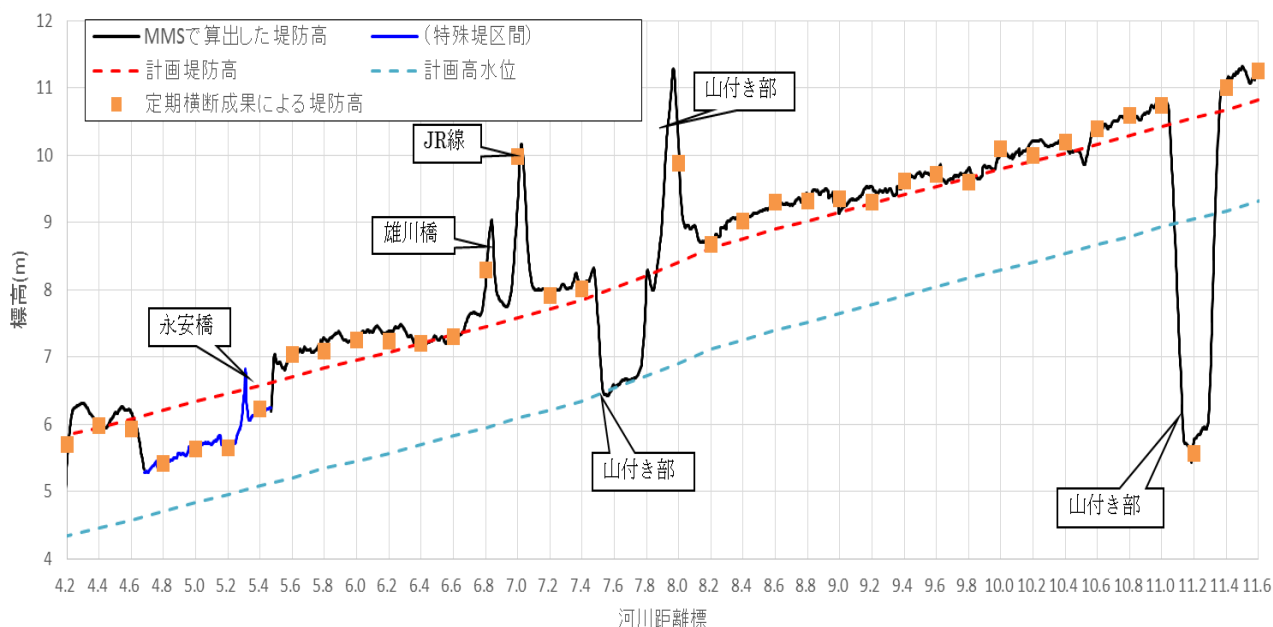


図 7-6 定期横断測量成と MMS 点群から把握した堤防高の比較

表 7-1 定期縦横断成果と MMS 点群から把握した堤防高の比較

平均値(m)	0.068
最大値 (m)	0.020
標準偏差(m)	0.031
平均二乗誤差(m)	0.037

7.4.4. 部分評価

部分評価では、マウントアップした歩道が存在する舗装区間、特殊堤区間、植生が隣接する舗装区間、および非舗装区間に着目し、その再現性を確認した。

(1)土堤・歩道等マウントアップのある区間

図 7-7 に、マウントアップした歩道が取り付けられた区間の堤防高の縦断図, 現地写真, 平坦領域の抽出結果, 連続標高図, および堤防高取得位置図を示す. 連続標高図とは, 0.02m の標高間隔ごとに色分けをした標高段彩図である. また, 堤防高取得位置図は, 陰影図を背景に堤防高として取得した位置を紫色の点で示した. この解析では, 勾配 3% を平坦領域の抽出閾値とした. 平坦領域の抽出結果を見ると, 概ねの天端領域を抽出される結果となった. この区間の天端勾配は, 概ね 1.5%~2% で設計されており, 現地を目視確認する限り, 築堤からの時間経過に伴う大きな変形区間はなかった. 変形の比較的小さい堤防区間において, 設計より大きい勾配である 3% を閾値として用いたため, 天端の平坦領域の概ね抽出ができたと考えられる. 断面図②では, 歩道部で約 0.2m マウントアップしている区間の横断形状を, 断面図①では, 坂路の接続により歩道部のマウントアップがない区間の横断形状をそれぞれ示す. これらの箇所では, 堤防高取得位置が, マウントアップしている区間で歩道部を, 坂路の接続部によりマウントアップ部がなくなっている区間で天端中央付近を取得していることが確認できる. また, MMS 点群による縦断図では, 坂路の接続部で歩道のマウントアップ部がなくなり, 0.2m 程度低くなっている形状も再現できていることが確認できる.

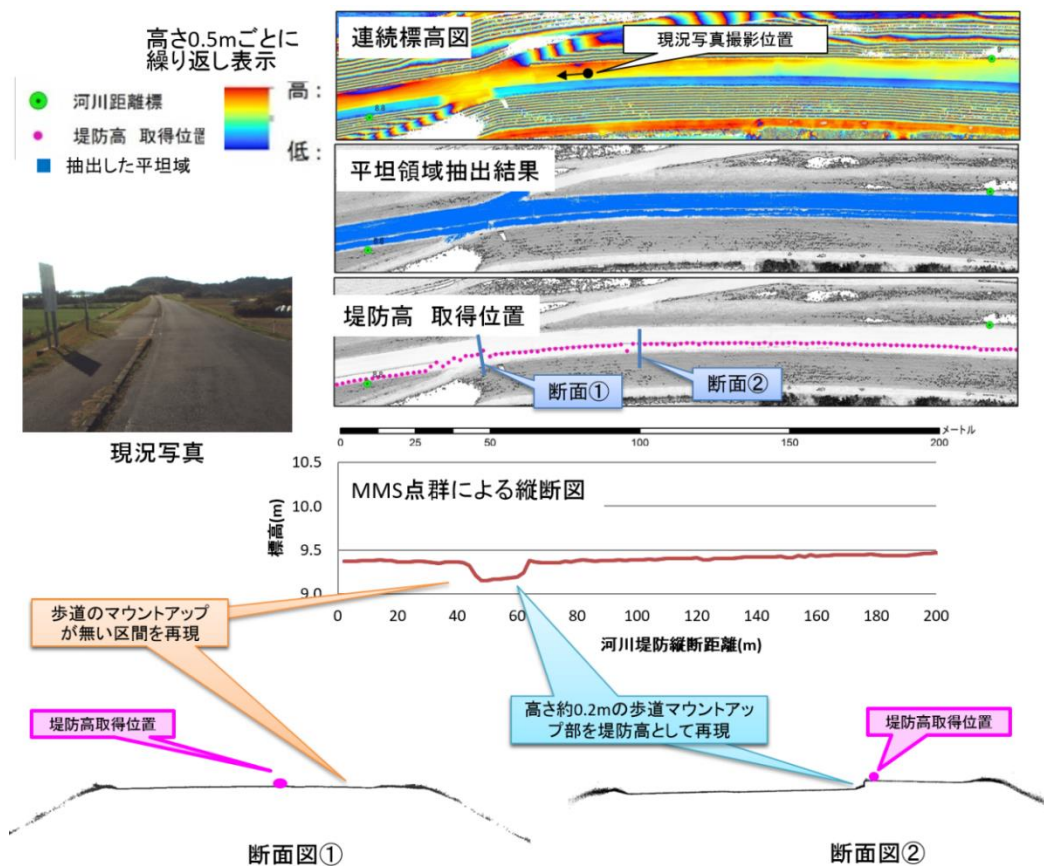


図 7-7 歩道区間における解析結果と MMS 点群による縦断図

(2) 特殊堤

図 7-8 では、特殊堤区間の堤防高縦断図、現況写真、平坦領域の抽出結果、堤防高の取得位置図、および MMS 点群から作成した連続標高図を示す。現況写真で示すように特殊堤のパラペット部には、平常時に通行できるようにパラペットを途切れさせた陸閘がある。平坦領域の抽出結果では、陸閘を除くパラペット部天端と天端道路を平坦領域として抽出できている。さらに、堤防高取得位置図と断面図では、パラペット天端部を、陸閘では天端道路の中央付近を堤防高として取得していることが確認できる。この陸閘は、図 7-8 の MMS 点群による縦断図で凹形状を示す。図 7-8 の MMS 点群による縦断図では、パラペット天端の高さと全ての陸閘の高さを堤防高として再現できることが確認できた。本手法は、車等を計測した点を削除するために凸形状を示す点を削除し、逆に凹形状を示す点は残すこととした。こうした処理により、陸閘を再現できたと考える。

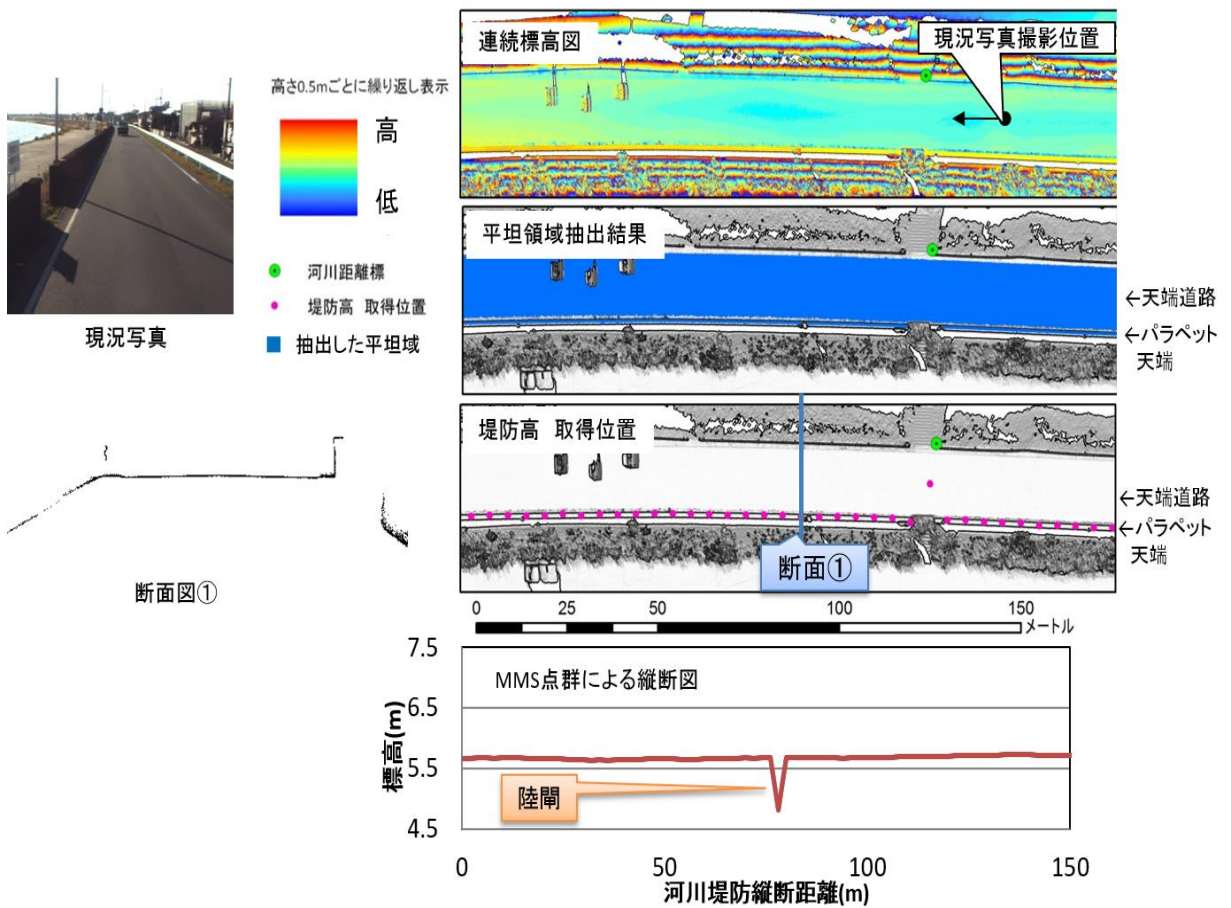


図 7-8 特殊堤区間における解析結果と MMS 点群による縦断図

(3) 山付き、植生繁茂区間

図 7-9 に植生が繁茂した区間の堤防高縦断面図を示す。また、図 7-9 に示す断面位置付近の現況写真と MMS 点群の断面図を図 7-10 と図 7-11 にそれぞれ示す。図 7-11 では、天端に覆いかぶさる植生を計測した点があるが、図 7-9 では、こうした点を除去して天端高を再現していることが確認できる。

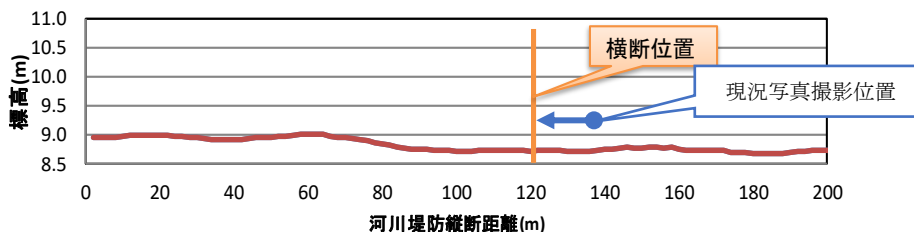


図 7-9 植生繁茂区間における堤防高縦断面図



図 7-10 植生繁茂区間の現況写真

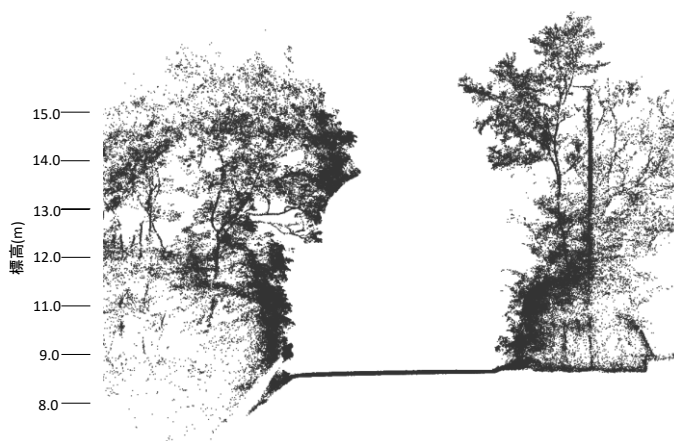


図 7-11 植生繁茂区間における MMS 点群の横断面図

(4) 非舗装天端

最後に、非舗装区間の堤防高縦断面図とその付近の現況写真を図 7-12 と図 7-13 に示す。この区間は、図 7-13 に示すように草丈が 0.1~0.3m 程度と比較的短い状態で MMS 計測を実施した。こうした MMS が天端を走行できる程度の草丈区間では、本手法により堤防高を把握できることがわかった。

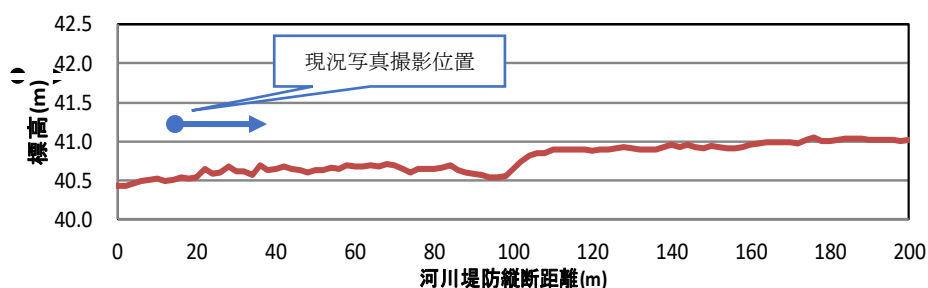


図 7-12 非舗装堤防における堤防高縦断面図



図 7-13 非舗装堤防の現況写真

(5) 誤抽出箇所

検証地区において、4つの誤抽出箇所があった。その内訳は、川裏側法面にある倉庫の1箇所、法尻沿い道路に駐車していた大型車両の1箇所、道路橋を跨ぐアンダーパス区間の2箇所である。その一例として、図 7-14 と図 7-15 に、誤抽出した倉庫とアンダーパス付近の現況写真をそれぞれ示す。図 7-14 で示す箇所は、特殊堤パラペット構造部の天端と倉庫や大型車両の屋根は概ね同じ高さであった。本手法では、縦断方向の高さの連続性を考慮したアルゴリズムを採用しており、天端高と建物・車両が連続的につながっていると判断したため、誤抽出となった。図 7-15 に示す道路橋を跨ぐアンダーパス区間では、MMS が天端を走行できなかつた箇所でも誤抽出が発生した。MMS が法尻付近の低い位置からレーザ計測を行ったため、天端の平坦部分を計測できず、誤抽出となった。

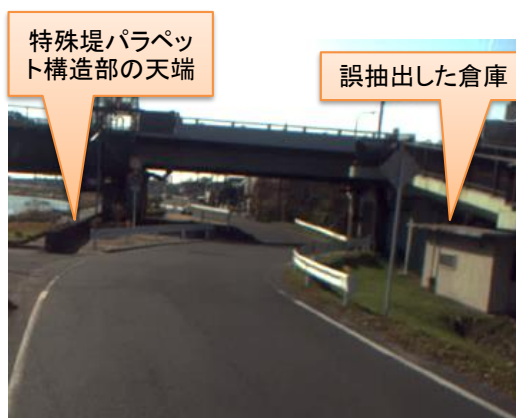


図 7-14 誤抽出した倉庫付近の現況写真



図 7-15 誤抽出したアンダーパス付近の現況写真

7.4.5. 考察

本提案手法は、MMSの軌跡データを基に堤防の平坦性と連続性に基づいたアルゴリズムにより堤防高を把握するものである。この手法を実験計測地区に適用した結果、定期縦横断成果と同等の精度で、従来手法で難しかった周辺より低い区間を漏れなく連続的に把握できることが確認できた。また、全長7kmの区間で誤抽出4箇所という良好な結果が得られた。その要因は、2つ挙げられる。一つは、天端の平坦性と連続性を利用することで、過抽出の領域はあるものの、概ねすべての天端領域が抽出できたことである。もう一つは、MMSの軌跡データを用いることで、天端の候補範囲を絞り込むことができたことである。平坦性とMMSの軌跡を考慮した解析アルゴリズムにより、確実性の高い堤防高を把握できることが示された。

一方で、誤抽出となった4箇所のうち2箇所は、天端と建物・車両の屋根の高さが概ね同じだった。縦断方向の高さの連続性に着目した本手法では、天端高と建物・車両が連続的につながっていると判断したため、誤抽出となった。これに対しては、高さの連続性だけでなく、平面位置の連続性を考慮した手法の改良により対応できると考えられる。

また、残りの2つの誤抽出は、道路橋のアンダーパス区間で、MMSが天端を走行できなかった箇所が発生した。その原因は、天端の平坦部分のMMS点群が再現できなかったためである。本実験計測では、レーザスキャナの設置位置を高くしたMMSを使用し、計測死角の軽減を図った。しかし、地上からの計測を基本としたMMSでは、その改善も限界がある。また、本実験計測での非舗装区間は、MMSが走行可能な比較的短い草丈であったが、草丈が長い区間では、MMSの走行が難しい。こうした天端を走行できない区間は、MMSだけでは堤防高を把握できないという課題も明らかになった。

7.5. 本章のまとめ

本章は、越流が発生する恐れが高い河川堤防の区間を漏れなく把握することを目指し、MMS点群から、自動処理により天端で最も高い堤防部分を認識し、堤防高の縦断図として把握する新たな提案手法の有効性を確認した。その結果、堤防天端の平坦性と連続性に基づくアルゴリズムの堤防高把握手法は、舗装および非舗装区間や、歩道などが整備された天端、端幅の狭い特殊堤といった多様な天端形状で適用できることがわかった。以上の結果から、MMSによる堤防高の把握手法は、従来手法で難しかった0.1m程度の堤防高の変化を漏れることなく把握できることが示された。また、自動処理により手入力による作業工程の省力化を図ることができるとともに、越流が発生する恐れが高い河川堤防区間の漏れのない確実な把握に寄与できることが確認できた。

一方で、MMSが天端を走行できない区間では、堤防高を把握できない課題が確認された。こうした区間では、上空からの計測が有効であると考えられる。近年、UAVといった計測技術の発展が目覚ましく、UAVを用いた写真測量やレーザ計測により、MMS点群と同等な空間分解能を持つ点群が取得できるようになってきた。しかしながら、UAVは電源を供給できる時間に限りがあるため、帯状に長い河川堤防全体を、効率的に計測することが難しい。そのため、MMSを基本とし、MMSの天端走行が困難な箇所にUAVを併用することが有効と考えられる。今後は、上空から高い空間分解能をもって計測ができるUAVに着目し、MMSとUAVの併用による効率的な堤防計測手法を検討していくことは重要であると考えられる。

8. 河川堤防モニタリング

8.1. はじめに

6章と7章では、MMSを用いて河川堤防の沈下・変形状態や堤防高を漏れなく、確実に把握する手法を検討した。これら検討のとりまとめとして、本章では、検討結果で得られた知見を基に構成した河川堤防のモニタリング手法を提案する。

8.2. 沈下・変形、堤防高把握の検討結果

本節では、河川堤防における沈下・変形状態と堤防高把握手法の検討結果と、得られた知見を示す。

8.2.1. 河川堤防の変形・沈下把握の検討結果

MMS点群による縦断表現と面的な表現の2つの手法を用いて、堤防の変形・沈下状態を見える化を検討した。

MMS点群による縦断表現は、堤防高、変形・沈下の進行具合、および横断勾配に着目した手法である。実験計測による検証の結果、次の知見を得ることができた。

- ・ 調整点による位置補正処理を施したMMS点群を用いることで、0.02m以上の変形・沈下進行区間を把握できる。
- ・ 周辺より低い箇所、天端勾配が周辺と異なる箇所、天端中央が法肩に比べて低い逆勾配化区間、沈下進行の恐れのある箇所を漏れなく把握できる。

MMS点群による面的表現では、縦断表現により抽出した区間の状態を、さらに詳細に把握する手法を検討し、次の知見を得ることができた。

- ・ 樋門など河川構造物周辺の抜上り・変状区間とその状態を面的な分布図として可視化できる。
- ・ 構造物、門柱の傾倒を、下げ振りなどの従来手法と同等な精度で検出できる。
- ・ 旧河川の位置が示された治水分類図（国土地理院発行）とMMS点群による面的表現図を重ね合せにより、旧河川による沈下・変形区間の位置を詳細に把握できる。

以上の結果と得られた知見から、本手法は、河川堤防の変形・沈下区間を漏れることなく把握でき、河川の越流が発生する恐れのある区間の確実な把握に寄与できることが確認できた。

8.2.2. 堤防高把握の検討結果

MMS 点群から自動処理により、堤防の最も高い位置を認識し、その高さを堤防高として把握する手法を検討した。その結果、次の知見を得ることができた。

- ・ 堤防天端の平坦性と連続性に基づくアルゴリズムの堤防高把握手法は、舗装および非舗装区間や、歩道などが整備された天端、端幅の狭い特殊堤といった多様な天端形状で適用できる。
- ・ 従来手法で難しかった 0.1m 程度の堤防高の変化を漏れることなく把握できる。
- ・ 実験計測による検証の結果、自動処理により人力による手間の省力化を図ることができる。

以上の結果から、本手法は、従来手法で難しかった堤防高の変化を漏れることなく迅速に把握でき、その有効性を確認することができた。

8.2.3. 得られた知見のまとめ

前節までの検討により得られた知見をまとめる。

- ・ MMS 点群を用いた自動処理により、堤防高として取得する位置（測線）を認識し、縦断面図として表現できる。
- ・ 連続的な堤防高を 0.1m 程度の標高精度で取得できる。
- ・ 計画堤防高や高水位と現状の堤防高を定量的に比較できる。
- ・ 周辺より低い堤防高区間を把握できる。
- ・ 天端勾配が周辺と異なる箇所を把握できる。
- ・ 天端中央が法肩に比べて低い逆勾配化区間を把握できる。
- ・ 水門・樋門といった河川管理施設付近では、天端の抜上り・堤防変状の面的な状態を可視化できる。
- ・ 旧河川の位置が示された治水分類図などと MMS 点群の面的表現図を重ね合わせることで、沈下・変形の恐れがある区間を詳細に把握できる。
- ・ 異なる時期に取得された MMS 点群の差分解析により、0.02m 以上の高さ変化がある沈下区間を把握できる。
- ・ 樋門などの門柱の傾倒を、下げ振りなどの従来手法と同等な精度で検出できる。

8.3. 河川堤防モニタリングの提案

河川の維持管理では、河川堤防の安全性を評価するために、堤防高が計画高水位や計画堤防高より低い箇所、周辺より堤防高が低い箇所、沈下・変形の恐れがある箇所といった河川堤防の弱部となりうる箇所を把握する必要がある。本節では、前章までに検討した解析手法や得られた知見を組み合わせ、河川堤防の弱部となりうる箇所を把握する河川堤防モニタリング手法を検討する。

8.3.1. 提案手法の概要

MMS を用いた河川堤防モニタリングは、広域モニタリング、詳細モニタリング、およびデータベース化・可視化の3つの工程で構成する。その処理の流れを図 8-1 に示す。広域モニタリングは、堤防天端全体に対して、弱部の恐れのある箇所を抽出するスクリーニングと位置付ける。詳細モニタリングは、広域モニタリングで抽出された区間、旧河川跡などの軟弱地盤地、および河川管理施設等に対して、さらに詳細な評価を行う。データベース化・可視化では、評価結果を一元化、わかりやすく可視化する河川堤防管理システムを整備する。

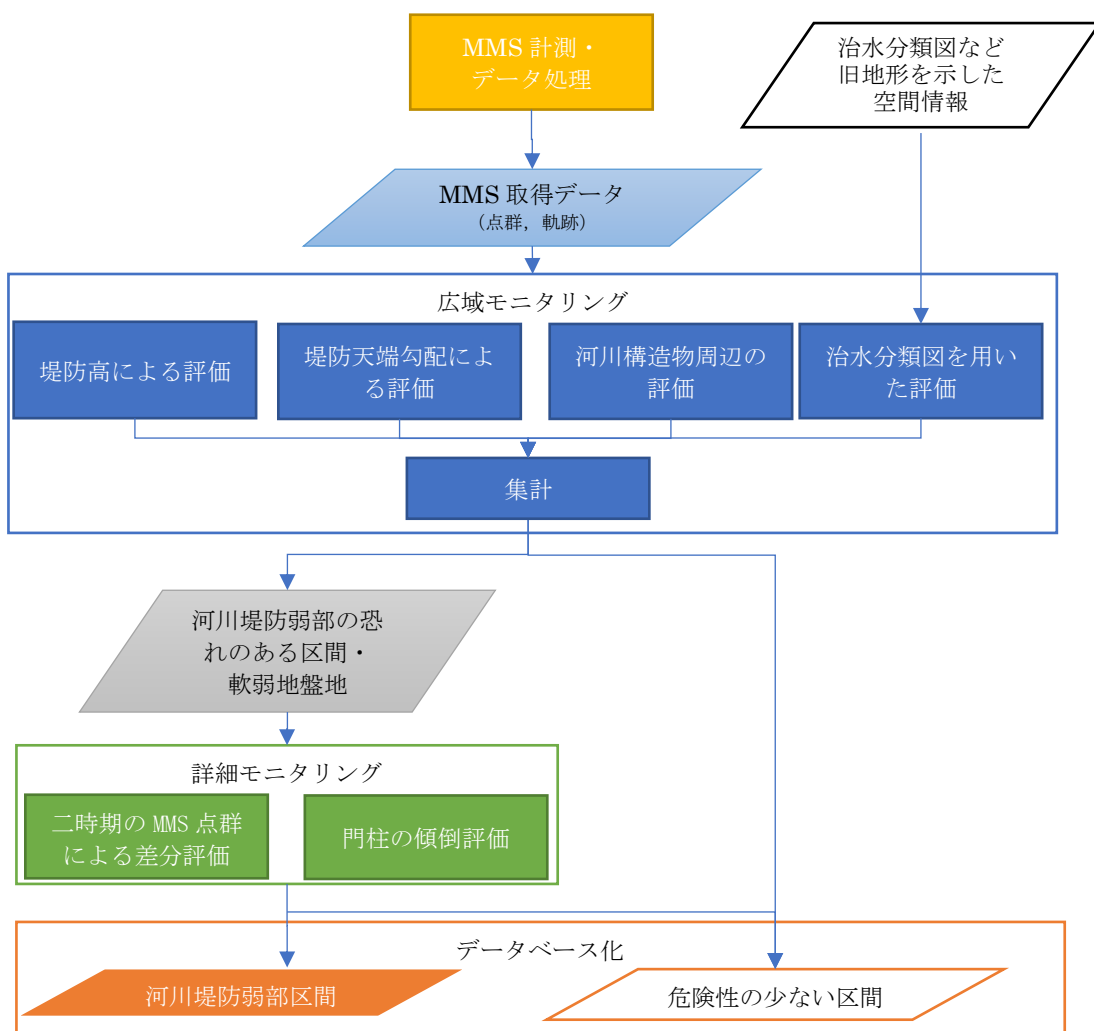


図 8-1 MMS を用いた河川堤防モニタリングの処理の流れ

8.3.2. 広域モニタリング

広域モニタリングは、①堤防高による評価、②堤防天端勾配による評価、③河川構造物周辺の評価、および④治水分類図を用いた評価を行い、最後にそれらの結果の⑤集計を行う。その評価の流れを図 8.2 に、評価の内容を以降に示す。

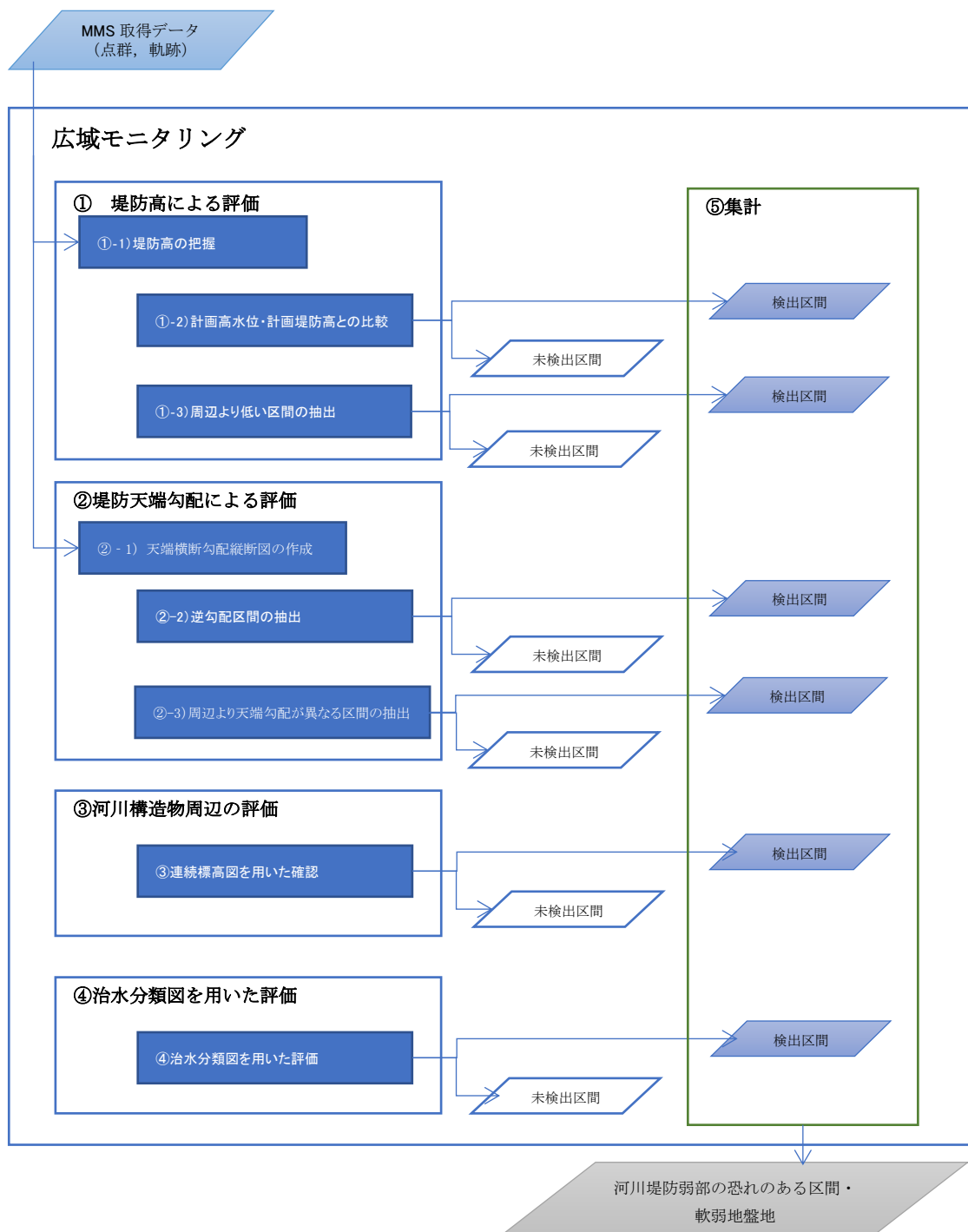


図 8.2 広域モニタリングの流れ

①堤防高による評価

堤防高による評価では、①-1) 堤防高の把握、①-2) 計画高水位・計画堤防高との比較、および①-3) 周辺より低い区間の抽出を行う。

①-1) では、7.3 節に示す堤防高把握手法を用いて河川堤防高を把握する。①-2) では、河川距離標ごとに設定されている計画高水位・計画堤防高と①-1) で得られた堤防高の差分を算出し、計画高水位・計画堤防高を満たしていない区間を抽出する。①-3) では、①-1) の堤防高縦断に対し、移動平均により平均堤防高を算出する。この平均堤防高と堤防高の高さ方向の差分を算出し、周辺より低くなっている区間を抽出する。移動平均の区間長は、広い区間長と、狭い区間長の2つを設定する。広い区間長を用いた処理では、200m 程度の長い範囲で低くなっている区間を抽出するために、400m の区間長を用いる。狭い区間長を用いた処理では、20m 以下の局所的に低くなっている区間を抽出するために、50m の区間長を用いる。

②堤防天端勾配による評価

堤防天端勾配による評価では、②-1) 天端横断勾配縦断図の作成、②-2) 逆勾配区間の抽出、および②-3) 周辺より天端勾配が異なる区間の抽出を行う。

②-1) では、6.5.2 項で示す縦断表現手法を用いて、天端横断勾配縦断を作成する。そして、②-2) では、天端中央が天端法肩より低い区間を逆勾配区間として抽出する。②-3) では、移動平均により平均的な天端横断勾配を算出し、周辺よりに比べ天端横断勾配が異なる区間を抽出する。移動平均を用いた解析は、①-3) に示す手法に準じて行う。

③河川構造物周辺の評価

河川構造物周辺の評価では、樋門や水門など河川構造物が存在する区間に対し連続標高図を用いた確認を行う。連続標高図は、MMS 点群から 6.6.1 項に示す手法を用いて作成し、目視により、抜上りやのり面勾配が周辺より異なる区間の有無を確認する。

④治水分類図を用いた評価

治水分類図を用いた評価では、旧河川が把握できる治水分類図や昔の地図などを重ね合わせ、旧河道や埋め立て地といった沈下や変形の恐れがある区間を抽出する。国土地理院が提供している治水分類図と MMS 点群から作成した連続標高図を重ね合わせ、目視により区間を抽出する。

⑤集計

集計では、①から④までの評価により抽出した区間を一定間隔ごとに集計する。一定区間とは、河川距離標の設置区間より狭い区間とし、河川堤防の大きさや河川堤防の状況に応じて設定する。評価①から④の抽出区間が複数存在する箇所を堤防弱部の恐れが高い箇所とみなす。図 8.3 は、10m 区間において、各評価により抽出した区間が存在した場合 1

のフラグを付け、区間ごとに集計し、3以上を示す区間を堤防弱部の恐れがある箇所とみなした事例である。その堤防弱部とみなす重複区間の閾値は、築造した堤防や築堤してから時間が経過した堤防では異なる。そのため、閾値は河川堤防の状況に応じて設定する。

	各評価で検出区間が存在した場合1とする																		
	12.7	12.8	12.9	13	13.1	13.2	13.3	13.4	13.5	13.6	13.7	13.8	13.9	14	14.1	14.2	14.3	14.4	14.5
評価①-2)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
評価①-3)																			
評価②-2)																			
評価②-3)				1															
評価③)	1	1	1	1	1	1				1	1			1	1	1			1
評価④)			1	1	1	1	1	1	1			1	1	1	1	1	1	1	1
集計結果	2	2	3	4	4	4	3	2	2	2	2	2	2	3	3	3	2	3	1

図 8.3 集計結果例

8.3.3. 詳細モニタリング

詳細モニタリングは、広域モニタリングで堤防弱部の恐れがあるとされた区間や予め把握できる旧河川跡地などの軟弱地盤地、河川構造物周辺に対して、①二時期の MMS 点群による評価と、②門柱の傾倒評価を行う。その評価の流れを図 8.4 に、評価内容を以降に示す。

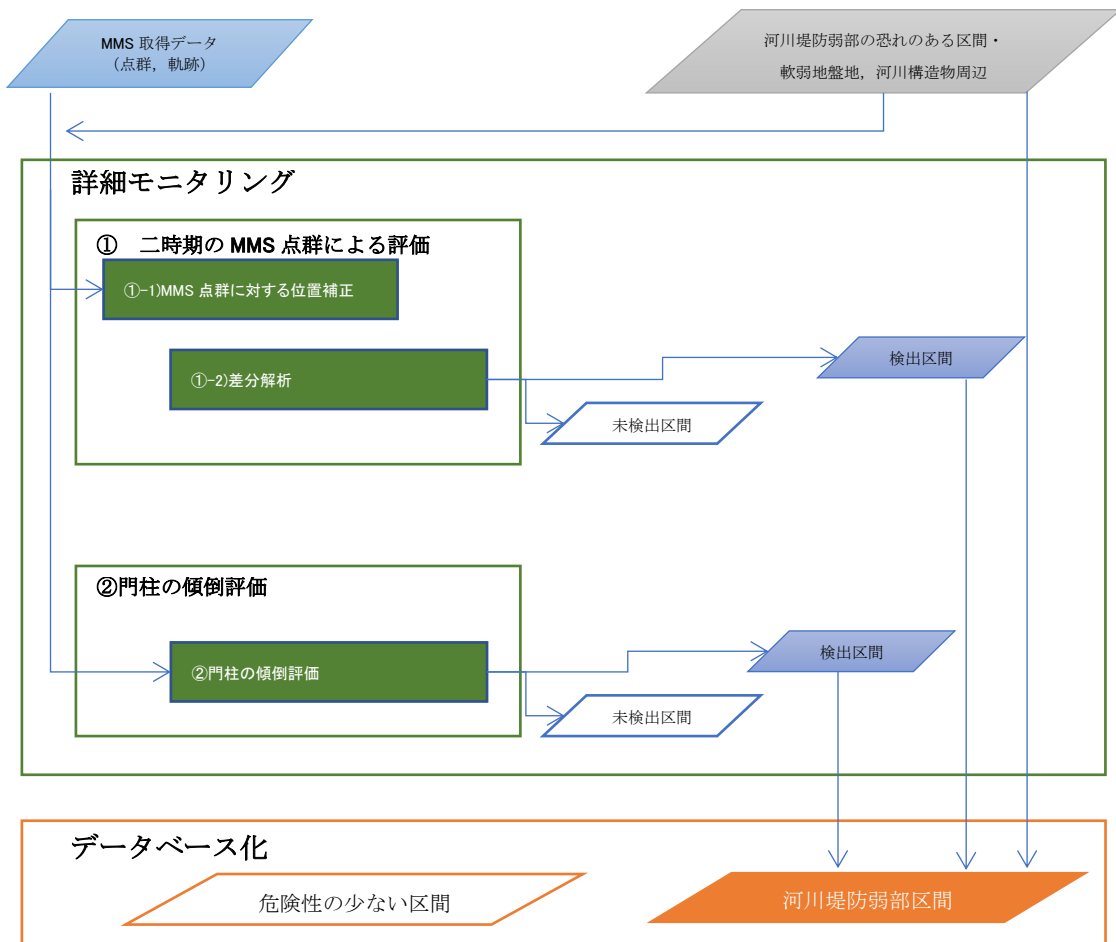


図 8.4 詳細モニタリングとデータベース化の流れ

①二時期の MMS 点群による評価

二時期の MMS 点群による評価は、①-1)MMS 点群に対する位置補正を行い、その後、①-2)差分解析を行う。①-1)では、6.4 節で示した位置補正を行う。沈下や変状の影響がないと考えられる河川距離標を与点とし、水準測量や GNSS 測量により調整点の位置座標を取得する。MMS 点群から読み取った調整点との平均較差を補正量とし、平行移動する補正を行う。なお、沈下の進行が確認されている地区では、MMS によるデータ取得時に、予め MMS 計測区間の始終点付近にある 2 点の河川距離標に調整点を設置し、位置補正を行うも

のとする。つぎに、①-2)では、6.5.2項で示す堤防高差分縦断図と6.6.1項で示す標高差分図を作成し、変形・沈下の進行の恐れがある区間を抽出する。

②門柱の傾倒評価

樋門や水門の存在する区間では、6.6.1項で示す壁面の傾倒算出を行い、傾倒量と傾倒方向を確認する。

8.3.4. 河川堤防管理システムの構築

河川堤防管理システムは、上節までの評価結果とMMSで取得したデータを一元化し、可視化するシステムである。このシステムは、河川堤防の維持管理・巡視・点検の基礎資料に利用できるものとする。具体的には、MMSで取得された点群やカメラ画像、基本モニタリングで抽出された河川堤防弱部の恐れのある区間、詳細モニタリングで整備した面的分布表現データなどの評価結果を重ね合せて可視化する機能を有する。システムの基本的な仕様を以下に示す。

①評価結果とMMS取得データの重ね合わせ

MMSのカメラ画像と点群、抽出した区間を重ね合わせた表示をする。MMS取得データは現地での人の視線に近い詳細な再現ができる。このMMS取得データ上に評価結果を表示することで、現地での危険個所の特定が容易になり、効率的な現地調査に寄与できる。

②MMS点群による縦断・横断表示

MMS点群を基に、縦断・横断・上空視点といった複数の視点から河川堤防の3次元形状を表示する。現地では、わずかな地形変化や横断形状を把握することが難しい。こうした形状を任意の箇所から任意の視点から数値として表示できる機能を装備する。

③タブレットPCでの運用

タブレットPCで運用できるシステム環境を構築する。河川の巡視や河川堤防点検といった現地確認で利用できるように、携帯可能なタブレットPCで運用できるシステムを構築する。さらに、現地確認結果や、現地で撮影した画像を集約できるデータ登録機能も追加する。河川堤防管理システムの表示例を図8.5と図8.6に示す。

以上の機能を有した河川堤防管理システムにより、事務所などのPC上で人の視線に近い現地状況に確認でき、更に、タブレットなどのPC上で運用させることで、現地の巡視や点検で、把握できない河川堤防横断形状やわずかな堤防形状の変化を見える化することができる。

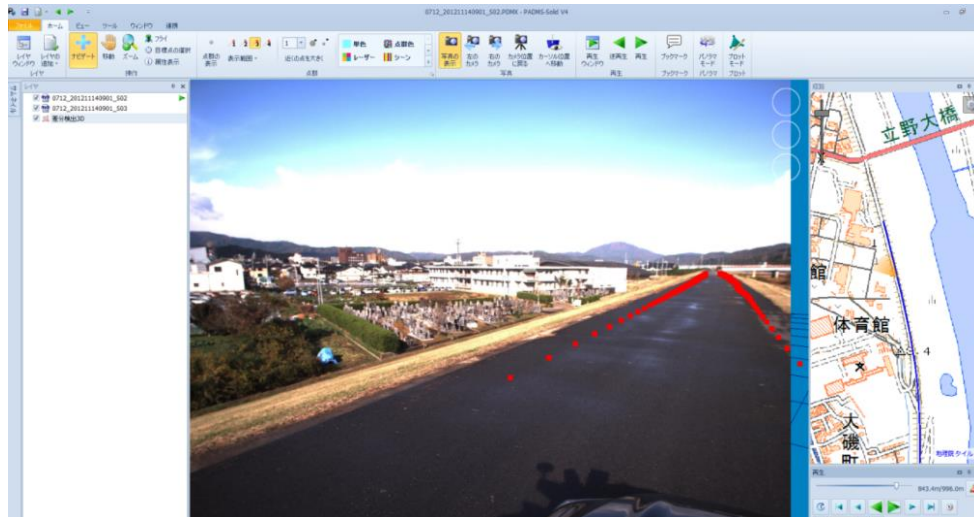


図 8.5 MMS のカメラ画像と検出区間の表示例

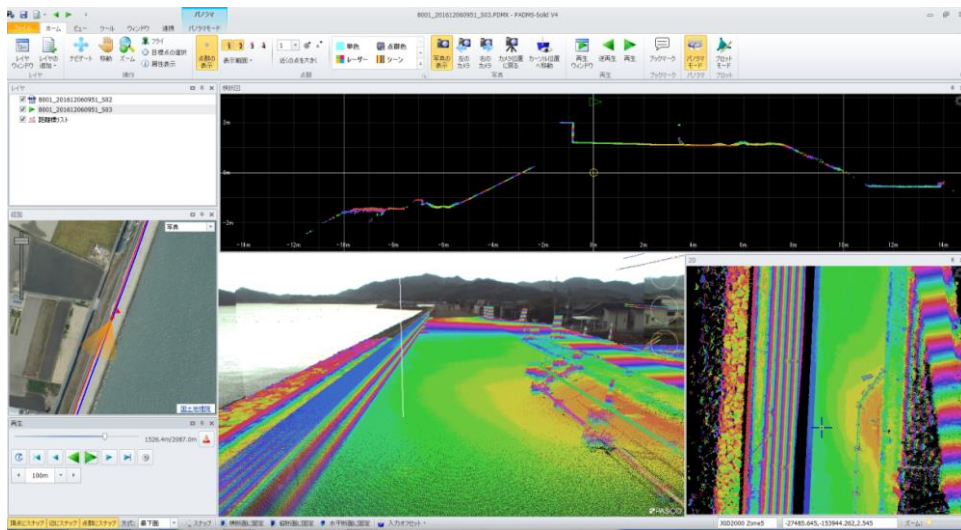


図 8.6 MMS 点群の多視点表示例

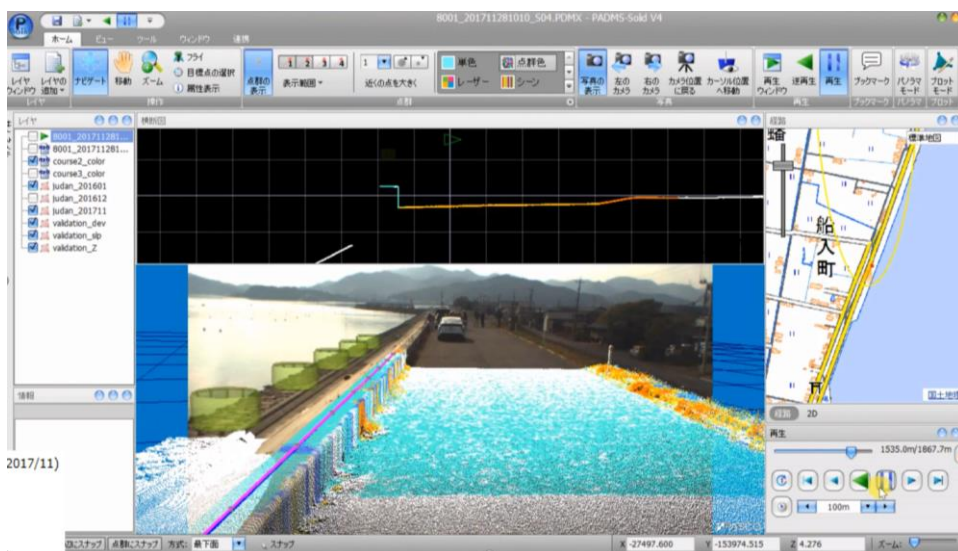


図 8.7 MMS 点群と評価結果の重ね合わせ表示例

8.4. 本章のまとめ

本章では、前章までに構築した河川堤防の沈下・変形状態や堤防高を把握する手法を用いて、効率的かつ確実性の高い河川堤防モニタリング手法を検討した。

河川堤防モニタリング手法は、広域モニタリング、詳細モニタリング、およびデータベース化・可視化の3つの工程で構成する。広域モニタリングでは、河川の上流から下流まで全体を対象に、堤防弱部の恐れのある箇所を抽出する。この際、堤防高、天端の勾配、河川構造物周辺に関する評価を行うことで、堤防高が計画高水位や計画堤防高より低い箇所、周辺より堤防高が低い箇所、沈下・変形の恐れがある箇所、および堤防横断構造物周辺で変状が発生している箇所を網羅的に把握できる。さらに、これらの評価結果を集計した複合的な評価を採用することで、弱部の可能性が高い地区を定量的に評価でき、漏れの無い管理につなげられる。詳細モニタリングでは、広域モニタリングにより抽出された堤防弱部箇所や河川構造物周辺を対象に、その状態を視覚的に分かりやすく表現する。狭域を対象とした詳細な評価により、堤防天端だけではなくその周辺の沈下・変形情報を詳細に評価できることが確認できた。河川堤防管理システムは、河川堤防モニタリングによる評価結果、MMS点群、およびカメラ画像を一元的に可視化できる。このシステムは、図8.5、図8.6、および図8.9の示すように、現地の人の視線に近い表現、堤防の詳細な形状、および評価結果を重ね合せて視覚的わかりやすく表示できる。これにより、河川堤防点検に関わる専門的な知識が高くない場合でも、堤防弱部の恐れがある具体的な位置の把握が可能となった。

以上の結果より、MMSによる河川堤防モニタリングと河川堤防管理システムは、堤防の状態を把握する作業の確実性向上できる。さらに、河川の維持管理に関する専門的な知識が高くない場合でも、具体的な堤防弱部の位置が把握できることから、限られた人材での効率的な維持管理に寄与できると考えられる。

9. 結論

本章では、9.1節で、研究課題への検討を通して得られた成果について総括する。さらに、9.2節で、河川堤防だけではなく河川全体のモニタリングを実現するために、MMS と航空機を用いたレーザ計測技術の使い分けを整理し、河川全体を効率的かつ効果的にモニタリングできる手法を提案する。そして、本研究のとりまとめとして、9.3節では、河川堤防のモニタリングに MMS などのレーザ計測技術を利用する意義と効果を示す。最後に、河川堤防モニタリングで想定される今後の課題を9.4節に列挙する。

9.1. 総括

本研究では、河川の水害として最も多く発生する越流による被害を軽減するために、MMS を用いて河川堤防の沈下・変形状況や堤防高の状態を漏れなく把握する手法を構築し、効率的かつ確実性の高い河川堤防モニタリング手法を検討した。

まず、MMS 点群全体の位置精度を評価できる手法を確立し、MMS の計測特性を把握した。こうして得られた MMS 計測特性を踏まえ、河川堤防の形状把握に最適な河川計測用 MMS を製作した。この河川計測用 MMS で取得した MMS 点群の位置精度を評価するとともに、帯状で長い河川堤防全体で位置精度を確保して計測する手法を整理した。さらに得られた MMS 点群を用いて、河川堤防の沈下・変形状態の把握と、堤防高を漏れなく効率的な把握する新たな手法を確立した。最後にとりまとめとして、本研究で確立した把握手法と知見を基に、MMS による河川堤防のモニタリング手法を確立した。

以下に、研究課題の検討で得られた成果をまとめる。

研究課題1 MMS 点群の面的な位置精度の把握

- **検討内容**：堤防高や堤防の沈下・変形状態を漏れなく連続的に把握する手法を確立する。そのために、面（連続）的な計測ができる MMS を用いて、取得される MMS 点群全体の位置精度を把握するとともに、MMS の計測特性を明らかにした。
- **得られた知見**：MMS 点群の位置精度評価手法は、軌跡解析によるデータ品質評価、安定度評価、絶対評価、相対評価およびクロスセンサ評価で構成した。地図作成で利用されている標準的な MMS で取得される点群に、これらの評価を適用した結果、MMS 点群の位置精度を面的かつ定量的に把握でき、MMS 点群全体の位置精度を視覚的に評価でき、その有効性を確認できた。また、この評価結果から、以下の MMS の計測特性が明らかになった。
 - ▶ 複数のレーザスキャナで取得される点群は GNSS 衛星数・DOP 値の変化が大きい箇所、スキャナごとの点群でズレが生じる恐れがある。
 - ▶ 角度が 25 度と 45 度のレーザスキャナで取得される点群は、地盤で角度が浅くなりやすく誤差が生じる恐れがある。

- MMS の速度変化付近では、MMS 点群の計測誤差が生じやすい。
 こうした計測特性への改善策として、高精度 IMU と 1 つのレーザスキャナを高所に仰角 80 度で設置した河川計測用 MMS を製作し、取得される点群全体の位置精度を評価した。その結果、以下の知見を得ることができた。
 - MMS から近距離では、GNSS の位置計測精度と同等の精度が得られる。
 - MMS から遠距離では、レーザの取り付け後のキャリブレーションの精度に計測精度が影響される。
 - MMS が堤防天端を走行する場合、天端周辺は GNSS の位置計測精度と同等の精度を確保した連続的な 3 次元データを得られる。
 - 高精度 IMU の採用により、車両の揺動や振動による MMS 点群の位置精度は向上できる。

研究課題 2 河川堤防における MMS 計測手法の検討

- **検討内容：** 帯状に長い河川堤防に対し、堤防状況や堤防高が把握できる MMS 点群を取得するために必要な MMS 計測手法を整理する。その要求精度は、堤防高把握が 0.1m、軟弱地盤地での河川堤防の変形・沈下把握が 0.05m とする。これらの要求精度は、2 章に示した過去の災害報告から確認された河川堤防に維持管理に必要な値である。
- **得られた知見：** 河川堤防の MMS 計測では、MMS 自己位置算出方法、PDOP、および固定局からの基線長に留意をすることにより、帯状に長い河川で 0.1m 程度の安定した位置精度の MMS 点群を取得できる。さらに、河川堤防で一般的に存在する 20m 程度の道路橋を跨ぐ区間や 400m 程度の植生が隣接する GNSS 不可視区間でも、位置精度の劣化が少ないことが明らかになった。河川堤防の MMS 計測における留意事項を以下に示す。
 - MMS 自己位置算出方法は、GNSS 測位と IMU の慣性測位の結合処理を用いることで、高架などの GNSS 不可視区間で安定した位置精度を確保できる。
 - PDOP の予測値が 3 以下になる時間帯に絞って計測することで安定した位置精度を確保できる。
 - 固定局からの基線長に応じて、キネマティック解析や VRS 方式による GNSS 測位を適切に用いる。本実験計測では、固定局から基線長が概ね 12km 以下の区間ではキネマティック解析を、それ以上の基線長区間は VRS 方式を用いて解析することで安定した精度の MMS 点群が取得できることを確認した。

また、軟弱地盤地に整備された堤防や堤防の変形・沈下状況を詳細に把握するには、基線長を 5 km 以下に保ったキネマティック解析による自己位置測定を行い、さらに調整点による高さ補正を施すことで 0.02m の高さ精度を保った計測ができることが確認できた。

研究課題3 河川堤防の変形・沈下把握検討

- **検討内容**：堤防越流の可能性が高いと考えられる堤防沈下，変形状態，および堤防と河川構造物周辺の堤防状態を漏れることなく把握するとともに，視覚的にわかりやすく可視化する手法を確立する。
- **得られた知見**：MMS点群の縦断表現と面的な表現手法を用いて，堤防の変形・沈下状態を見える化を検討した。

MMS点群の縦断表現では，堤防高，変形・沈下の進行具合，および横断勾配を表現した。実験計測による検証の結果，以下の結果と知見を得ることができた。

- 調整点による位置補正処理を施した MMS 点群を用いることで，0.02m 以上の変形・沈下進行区間を把握できる。
- 周辺より低い箇所，天端勾配が周辺と異なる箇所，天端中央が法肩に比べて低い逆勾配化区間，沈下進行の恐れのある箇所を漏れなく把握できる。

MMS点群の面的表現では，縦断表現により抽出した区間の堤防状態を，さらに詳細に見える化する手法を検討した。その結果，次の知見を得ることができた。

- 樋門など河川構造物周辺の抜上り・変状区間の位置と状態を，わかりやすく可視化できる。
- MMS点群から構造物，門柱の傾倒を，下げ振りなどの従来手法と同等な精度で検出できる。
- 旧河川の位置が示された治水分類図（国土地理院発行）などと MMS 点群の面的表現図を重ね合わせることで，沈下・変形の恐れがある位置を詳細に把握できる。

以上の結果と得られた知見から，本手法は，河川堤防の変形・沈下区間を漏れることなく把握でき，河川の越流が発生する恐れのある区間の確実な把握に寄与できることが確認できた。

研究課題4 河川堤防高の把握検討

- **検討内容**：堤防高の状態を迅速かつ効率的に把握するために，MMS点群から自動処理により堤防高を把握する手法を確立する。
- **得られた知見**：MMS点群を用いた自動処理により，堤防の最も高い位置を認識し，その高さを堤防高として把握する手法を検討した。実験計測による検証の結果，次の知見を得ることができた。
 - 堤防天端の平坦性と連続性に基づくアルゴリズムの堤防高把握手法は，堤防高として取得する位置（測線）を MMS 点群の形状から自動で認識させ，縦断図として表現できる。
 - 舗装および非舗装区間や，歩道などが整備された天端，端幅の狭い特殊堤といった多様な天端形状で適用できる。
 - 従来手法で難しかった 0.1m 程度の堤防高の変化を漏れることなく把握できる。

- MMS 点群を用いた自動処理により、目視によるデータ設定といった作業を省くことができ、迅速な対応につなげられる。

以上の結果から、本手法は、従来手法で難しかった堤防高の変化を漏れることなく把握でき、さらに人手による作業工程を軽減できることが明らかになった。これにより迅速で確実な河川の維持管理に寄与できることが確認できた。

研究課題5 河川堤防モニタリング手法の検討

- **検討内容：**MMS による河川堤防の沈下・変形状況や堤防高の状態を把握する手法を組み合わせて、効率的かつ確実性の高い河川堤防モニタリング手法を確立する。
- **得られた知見：**広域モニタリング、詳細モニタリング、およびデータベース化・可視化の3つの工程で構成されるモニタリング手法を検討した結果、次の知見を得ることができた。
 - 広域モニタリングでは、河川の上流から下流まで全体を対象に、堤防弱部の恐れのある箇所を抽出する。この際、堤防高、天端の勾配、河川構造物周辺に関する評価を行うことで、堤防高が計画高水位や計画堤防高より低い箇所、周辺より堤防高が低い箇所、沈下・変形の恐れがある箇所、および堤防横断構造物周辺で変状が発生している箇所を網羅的に把握できる。さらに、これらの評価結果を集計した複合的な評価を採用することで、漏れの無い管理につなげられる。
 - 広域と狭域を対象とした評価により、河川全体を網羅的に評価し、かつ堤防弱部箇所の恐れのある箇所を詳細に評価できることが確認できる。
 - データベース化・可視化ができる河川堤防管理システムの構築により、評価結果、MMS 点群、およびカメラ画像を一元的化できる。このシステムの導入により、現地の人々の視線に近い表現、堤防の詳細な形状、および評価結果を重ね合せて表示できる。河川堤防点検に関わる専門的な知識が高くなくても、視覚的にわかりやすく堤防弱部の恐れがある地区を把握できる。

以上の結果と得られた知見から、MMS を用いて河川堤防の変形・沈下区間を漏れることなく把握でき、河川の越流が発生する恐れのある区間の確実なモニタリングに寄与できることが確認できた。

次節では、河川堤防だけではなく、河道を含む河川全体を対象としたモニタリング手法を提案する。MMS の使用を基本とし、航空レーザ測量や ALB、UAV レーザ測量といったレーザ計測技術を併用することで、河川全体を効率的かつ効果的なモニタリング手法を提案する。

9.2. 河川全体のモニタリングへの展開

本研究では、河川の水害として最も多く発生する越流による水害を軽減するために、河

川堤防の状態把握に関する検討を行った。一方、河川の維持管理では、河川堤防だけではなく、流域全体や河道の状態を把握し、洪水時に危険となる恐れのある箇所抽出とその対策が行われている。MMSは計測できる範囲が走行している周辺のみと限られる。流域や河道全体の状態を把握するには、他のセンシング技術を併用する必要がある。そこで、以降では、本研究の検討結果を踏まえ、平常時と出水・災害時ごとに、MMSと他のレーザ計測技術の使い分け方について提案する。

(1) 河川の状態把握における従来の計測手法の整理

河川の維持管理では、日常的に河川の状態を確認する巡視と、定期的に形状や状態を把握する点検が行われている。この点検では、部位、点検する内容に応じて、計測手法が選択されている。以下に、現在の維持管理で一般的に利用されている計測手法とその課題について整理する。

表 9-1 河川の状態把握における従来の計測手法

対象場所	計測目的	計測方法	内容	課題
河川堤防	堤防高の把握	縦横断測量	<ul style="list-style-type: none"> ● 200m 間隔といった河川距離標、測線ごとの管理。 ● 5年に一度の計測が基本。 	<ul style="list-style-type: none"> ● 測線間の状態が把握できない。
	堤防状態の把握	目視による点検	<ul style="list-style-type: none"> ● 天端、法面、法尻周辺の変状箇所を目視で確認。 	<ul style="list-style-type: none"> ● 目視で把握できる変状を把握できるが、広い範囲に及ぶ変状や絶対位置の把握は困難。
	河川構造物とその周辺の状態の把握	目視による点検	<ul style="list-style-type: none"> ● 定期的に目視の点検を実施。 	<ul style="list-style-type: none"> ● 目視では絶対位置による経年変化の把握が困難。
河道 (陸部)	地形形状や河畔林などの状態の把握	横断測量 航空写真測量	<ul style="list-style-type: none"> ● 土砂堆積や浸食している箇所の把握 ● 出水時の止水域となる恐れがする樹林化箇所の把握。 	<ul style="list-style-type: none"> ● 横断測量では測線間の状態は把握できない。また、樹木の高さ等は把握していない。 ● 航空写真では、地形形状、特に植生下の地形が把握できない
河道 (水部)	河道形状の把握	横断測量, 深浅測量	<ul style="list-style-type: none"> ● 土砂堆積箇所や洗堀箇所の把握 ● 測線間の状態は把握できない。 	<ul style="list-style-type: none"> ● 測線間の状態は把握できない。
流域 氾濫原	流域の地形や土地被覆状況の把握の把握	航空写真測量 航空レーザ測量	<ul style="list-style-type: none"> ● 流域全体の状態を俯瞰して把握する 	<ul style="list-style-type: none"> ● 対象範囲が広域となる

(2)河川の状態把握に利用できるレーザ計測の整理

提案に先立ち、河川の維持管理で利用可能と考えられるレーザ計測手法の概要と河川の状態把握における利点・課題を表 9-2 表 9-2 に整理する。

表 9-2 実用化されているレーザ計測

レーザ計測手法	概要	利点	課題
MMS	車両を用いた写真・レーザ計測,	<ul style="list-style-type: none"> ● 天端が走行できる場合、天端周辺の形状を確実に把握できる。 	<ul style="list-style-type: none"> ● 車を走行していない区間は、計測ができない ● 天端以外は、一部で欠測箇所が発生する。
航空レーザ計測	飛行機を用いたレーザ計測	<ul style="list-style-type: none"> ● 広域の形状を取得できる。 ● 地形だけではなく、植生の形状も取得できる。 	<ul style="list-style-type: none"> ● パラペットなどの形状を把握できない恐れがある。 ● 近赤外線波長を用いたレーザ計測機は、水部の地形形状を取得できない。
ALB (航空レーザ測深)	緑波長のレーザスキャナを用いた航空レーザ計測	<ul style="list-style-type: none"> ● 水域の地形を把握できる。 ● それ以外は、航空レーザ計測と同じ利点がある。 	<ul style="list-style-type: none"> ● 水質や水面の状況により測深能力が異なる。 ● 水深が深い場合、測深できない場合がある。
UAVレーザ計測	UAV を用いたレーザ計測	<ul style="list-style-type: none"> ● 狭い範囲を効率的に計測できる。 ● 低い対地高度から細かい点間隔の計測ができる。 	<ul style="list-style-type: none"> ● バッテリーの影響により、飛行時間が制限される ● 安全な飛行のために、有視界飛行を行う。そのため一回での飛行範囲が限られる。
背負子型 レーザ計測	徒歩によるレーザ計測	<ul style="list-style-type: none"> ● 車両などが走行できない区間に適用できる。 	<ul style="list-style-type: none"> ● 徒歩による移動のため、広範囲を迅速に計測することが難しい。 ● レーザ計測の精度確保手法が十分に確立されていない

(3) 平常時におけるレーザ計測の利用に関する提案

本研究で得られた MMS 計測に関する知見と、レーザ技術の利点と課題を踏まえ、河川の状態把握におけるレーザ計測技術の使い分け方を提案する。以下では、基本的な方針を示し、詳細な使い分け方を表 9-3 表 9-3 に整理する。

【基本的な方針】

- 河川堤防の状態把握は、MMS を基本とし、補足的に目視点検と縦断測量を実施する。
- 河道形状の把握は、航空レーザ測深（ALB）を基本とする。
- 流域の地形把握は、航空レーザ測量を基本とする

表 9-3 河川の状態把握におけるセンシング技術の使い分け

対象場所	計測目的	計測方法	内容
河川堤防	堤防高の把握	<ul style="list-style-type: none"> ● 基本:MMS ● 補足: UAV レーザ計測, 又は背負子型レーザ計測を実施 ● 縦断測量(5年に一度実施)を実施 	<ul style="list-style-type: none"> ● MMS の計測を基本とする. 0.1m 以下の位置精度で連続的な堤防高を把握する. ● MMS が走行できない区間は, 補足的に UAV や徒歩によるレーザ計測を実施する. ● 河川距離標の標高把握は, 従来手法である縦断測量を5年に一度程度の間隔で行う.
	堤防状態の把握	<ul style="list-style-type: none"> ● 出水後:MMS ● 出水前, 出水期: 目視による点検 	<ul style="list-style-type: none"> ● 出水後(除草後の時期)の点検にMMSを用いた計測を行う. ● 出水前, 出水期の点検は, 目視による点検を行う.
	河川構造物とその周辺の状態の把握	<ul style="list-style-type: none"> ● 目視による点検を基本とする ● 補足として MMS による確認を実施 	<ul style="list-style-type: none"> ● 河川構造物の点検は, 従来どおり目視確認を基本とした定期的な点検を行う. ● 出水後(除草後の時期)にMMSを用いた計測を行い, 構造物周辺の形状と門柱の傾倒状況を把握する.
河道 (陸部・水部)	地形形状や河畔林などの状態の把握	<ul style="list-style-type: none"> ● 航空レーザ測深(ALB)を基本とする ● 補足的に深淺測量を実施 	<ul style="list-style-type: none"> ● 定期的に航空レーザ測深(ALB)を用いて, 河道の陸域と水域の面的な標高データ, 樹高分布の状態を把握する. ● 水質や水深により ALB で取得できない河床区間は, 補足的に従来手法の深淺測量を実施する.
流域 氾濫原	流域の地形や土地被覆状況の把握	<ul style="list-style-type: none"> ● 航空レーザ計測 	<ul style="list-style-type: none"> ● 流域全体の地形を標高データとして取得する. あわせて航空レーザ計測機器と同時搭載のデジタルカメラを用いて, 写真地図を整備する.

(4) 地震後におけるレーザ計測の利用に関する提案

2011年に発生した「東北地方太平洋沖地震」では、広範囲にわたる河川堤防において大規模な被害を受けた。そして、地震後、計画高水位を満たすことができない堤防区間や、周辺より低くなった区間を迅速に把握することが重要であることが改めて確認された〔国土交通省水管理・国土保全局治水課, 2016〕。広域な河川堤防の高さを漏れなく迅速に把握するために、以下のレーザ計測技術の使い分けを提案する。

- 特殊堤が存在する河口部周辺は、MMSによる計測を基本とする。
- 土堤区間は、MMSと航空レーザ計測又はALBを併用する。
- 地震による変状で、堤防天端を車両が走行できない箇所は、航空レーザ計測、ALB、UAV計測を用いる。

本節では、河川堤防だけではなく、河川全体の迅速かつ確実性に高い状況把握を実現するために、MMSを基本とし、航空レーザ計測、航空レーザ測深(ALB)、UAVレーザ計測、および従来行われている縦断測量、堤防点検を併用した維持管理手法を検討した。各レーザ計測技術や従来手法の利点・課題を整理することで、計測手法ごとに適所となる河川部位やデータ取得のタイミングを整理することができた。これにより河川全体を効率的かつ効果的にモニタリングにつながると考えられる。

9.3. 河川堤防・河川モニタリングに MMS およびレーザ計測技術を利用する意義と効果

河川堤防の破堤を引き起こす水害は、被害規模が大きくなり、死者・行方不明者の被害や家屋、ライフライン、地下施設などに甚大な被害をもたらす。洪水により河川堤防が破堤する原因は、ほとんどが越流によるものである。近年では、集中豪雨や大雨の発生頻度が増加傾向を示し、計画規模を上回る洪水が毎年のように発生している。洪水時の河川堤防の越流リスクを軽減するため、河川の維持管理では、周辺より堤防高が低い箇所、沈下・変形の恐れがある箇所を把握し、必要に応じて適切に対応をすることが求められる。

こうした堤防高や堤防の変形・沈下を把握するために、現在の河川の維持管理は、5年に一度、200m 間隔の縦横断測量と、年数回、複数人が徒歩により堤防等河川管理施設の点検（堤防点検）を行われるのが一般的である。縦横断測量のような代表断面による管理は、測線間の堤防高が把握されておらず、また巻尺を使った堤防点検は、広く連続的につながった低い箇所や変状を捉えられない。そのため、越水の危険がある河川堤防区間を漏れなく確実に把握することが難しい。

こうした課題に対し、本研究では、河川堤防の天満を走行しながら、周辺の堤防形状を連続的に計測できる MMS を利用し、河川堤防の沈下・変形状況や堤防高の状態を確実に把握する手法を構築した。さらに、これらの手法を用いた河川堤防モニタリング手法を確立し、堤防高が計画高水位や計画堤防高より低い箇所、周辺より堤防高が低い箇所、沈下・変形の恐れがある箇所、および堤防横断構造物周辺で変状が発生している箇所を漏れなく確実に把握できることが明らかになった。また、河川堤防モニタリングの評価結果、MMS 点群、およびカメラ画像を一元的に可視化できる河川堤防管理システムを構築し、現地の人の視線に近い表現、堤防の詳細な形状、および評価結果を重ね合せの表示が可能となった。これらの成果は、河川堤防点検に関わる専門的な知識が高くない場合でも、視覚的にわかりやすく堤防弱部の恐れがある地区を把握でき、効率的かつ確実性の高い河川堤防モニタリングに寄与できることが確認できた。

さらに、河川堤防だけではなく、河川全体をモニタリングする手法も検討した。この検討では、MMS、航空レーザ測深（ALB）、UAV レーザ計測といったレーザ計測技術と従来から行われている縦断測量と堤防点検とで、計測適所となる河川部位を整理し、目的や計測部位ごとに計測技術の使い分け方を整理した。この手法により、河川全体を効率的かつ効果的にモニタリングにつなげられる可能性を示した。

以上の結果より、本研究では、効率的かつ確実性の高い河川堤防や河川のモニタリング手法を確立することができた。少子高齢化による人手不足が懸念される今後は、限られた人材による維持管理が求められる。本研究の成果は、限られた人材で効率的で効果的な堤防の維持管理につなげられ、さらに、河川の水害に関わる被害を軽減させ、住民の生命と資産を守ることに寄与できると結論づけられる。

9.4. 今後の課題と展望

本節では、MMSによる河川堤防モニタリングで想定される課題や展望を示す。

(1) 安価な河川計測用 MMS の開発

本研究では、河川計測用 MMS を使用した。この MMS は、専用車両に計測機器昇降機器と、GNSS, IMU, DMI, レーザスキャナなどのセンサを設置している。近年、安価で軽量化が図られたセンサが登場している。今後は、安価なセンサを用いた河川計測用 MMS を製作するとともに、河川の巡視車両といった一般的な車両に脱着が可能な機器として整備を検討する。多くの河川での利用促進を図るために、汎用的かつ導入しやすい計測機器の整備を進める予定である。

(2) 河川堤防高以外の情報抽出の検討

本研究では、MMS 点群から河川堤防の形状に関する情報を抽出する手法を検討した。MMS は、点群以外にカメラ画像などの情報も取得でき、舗装した天端のひび割れや補修した箇所の把握などに利用できると考えられる。こうした情報の自動抽出化の検討することで、更なる河川堤防の維持管理の確実性向上と効率化に寄与できると考えられる。

(3) MMS が走行できない区間への対応

堤防高抽出手法の検討では、MMS が天端を走行できない区間で、堤防高を把握できない課題が確認された。こうした区間では、UAV を用いた上空からのレーザ計測が利用できると考える。今後は、UAV レーザ計測で取得される点群の位置精度を確保する手法や各計測手法で得られた点群を迅速に統合する手法を検討し、MMS が走行できない河川堤防でも効率的にモニタリングできる手法を確立する予定である。

(4) インターネットで公開されている河川情報との連携

近年、10分単位の雨量や水位といった情報がインターネット上で公開されている。こうした情報を河川堤防管理システム上に表示することで、洪水時における危険な河川の区間をリアルタイムに把握し、危険な地域へ注意を喚起することができる。河川堤防管理システムにリアルタイムな雨量や水位情報を重ね合わせる仕組みを構築することで、更なる迅速な河川堤防の維持管理に寄与できると考える。

本論文した、MMS を用いた効率的かつ確実性の高い河川堤防モニタリング手法が確立した。この成果は、限られた人材で効率的で効果的な堤防の維持管理に寄与できると考えられる。今後は、UAV レーザ計測などで取得した点群の位置精度を確保しながら、迅速にデータ結合できる手法を検討する。本研究で確立した MMS を基本に、UAV レーザ計測を併用し、河川全体を効率的かつ効果的にモニタリングする手法に拡張していく予定である。

謝辞

本論文は筆者が岡山大学大学院 環境生命科学研究科 社会基盤環境学専攻 博士後期課程に在籍中の研究成果をまとめたものである。

本研究を進めるにあたり、同専攻 前野詩朗教授には主査を引き受けて戴き、貴重なお時間とご意見をくださった。また、副査である同専攻 吉田圭介准教授には、多くのご助言を戴いた。前野教授と吉田准教授には、本研究だけではなく、航空レーザ測深（ALB）成果の利用に関する相談を快く引き受けて戴き、研究を取り組む上での多くの助言と指導を戴いた。ここに深謝の意を表す。

同専攻 西山哲教授には指導教官として本研究の実施の機会を与えて戴き、その遂行にあたって終始、ご指導を戴いた。西山教授との初めて出会いは2013年であり、その当時から取り組んでいた研究を、5年後の2018年によりやくとりまとめることができた。その間、多忙にもかかわらず、著者が在住する大阪に幾度も足を運んでいただき、多くの議論をする時間を戴いた。議論を重ねる中で多くのアイデアや的確な助言を戴いたからこそ、この博士論文を完成させることができた。心から深謝の意を表したい。

株式会社パスコ 島村秀樹常務取締役、平尾公孝取締役には、このような機会を与えて戴くとともに研究に取り組むうえでの心構えを助言戴いた。技術統括本部本社技術部 部長岡本芳樹氏には、進学に対して背中を押して戴き、様々な助言を戴いた。技術統括本部新空間情報部 部長 西村修氏には、研究に関する助言だけではなく、著者が研究に取り組むやすいような様々な配慮を戴いた。こうした後押しがなければ、大学で研究成果をとりまとめることがなかった。心より感謝の意を表す。

国土交通省 中国地方整備局 岡山河川事務所、近畿地方整備局 近畿技術事務所、豊岡河川国道事務所の関係各位には、実験計測を実施するにあたり多大なるご助力と多くの温かい言葉を賜った。さらに、株式会社パスコ 関西事業部 技術センター、技術統括本部 新空間技術部の各位には、実験計測で多大なご支援とご協力を戴いた。ここに記して心より厚く御礼申し上げます。

株式会社パスコ パスコ総合研究所 所長 橘菊生氏には、日頃より研究のあり方、考察や論述の方法などの細部にわたる明確なアドバイスやご指導を戴き、休日にも関わらず、助言を戴いたことも多くあった。甚大なるご指導を賜ったことで、厚みや深みを増した内容にまとめることができた。また、株式会社パスコ 技術統括本部 森田真一氏には、河川の維持管理に関する様々なアイデアと貴重なご意見を戴いた。同部署 井関禎之氏には、データ整備や資料作成まで多大な協力を戴いた。感謝申し上げます。

株式会社パスコ 関西事業部 藤原正治氏には、多大な協力と励ましを戴き、精神的にも支えられた。また、西山研究室の博士後期課程同期生となる藤木三智成氏、笹井友司氏は、

研究やそれ以外のことも含めて話す機会が多く、刺激と示唆を得ることができた。感謝の意を表す。

日本写真測量学会関西支部の皆様には、暖かい励ましと多くのアドバイスを戴いた。多くの方々に感謝申し上げます。支部長である株式会社パスコ 柳川重信氏には、日頃より暖かい言葉をかけてくださり、見守ってくださった。また、副支部長である株式会社パスコ パスコ総合研究所の吉村充則氏は、日頃より研究するにあたっての心構えや取り組み方について、厳しくも優しい指導を賜った。言葉を尽くしても足りないほど、感謝している。

最後に、これまで温かい目で見守ってくれた友人や家族に、深く感謝申し上げます。

参考文献

7. 1 3 新潟豪雨洪水災害調査委員会. 2015. 7. 1 3 新潟豪雨洪水災害調査委員会報告書, 新潟県, 2015.
- AkcaD. 2010.** Co-registration of surfaces by 3D Least Squares matching, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 76 (3), p 307-318.
- Applanix. 2017.** POS システム スペック表 . applanix, https://www.applanix.com/pdf/specs/POSLV_Specifications_dec_2015.pdf.
- BarberMills, J., Smith-Voysey, S.D., 2008.** Geometric validation of a ground-based mobile laser scanning system, *The ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 63(1).
- BeslMckay, N. D. P. J., . 1992.** A Method for Registration of 3-D Shapes, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.14, No.2, 1992. p. 239-256.
- Gruen A. D. Akca. 2005.** Least squares 3D surface and curve matching , *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 59 (3), p. 151-174.
- GruenA. 1985.** Adaptive least squares correlation: a powerful image matching technique, *South African Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Cartography* 14 (3), p 175-187.
- GuentherCGary. 1985.** Airborne Laser Hydrography. System Design and Performance Factors NOAA PROFESSIONAL PAPER SERIES, p. 41-59
- MaashG. 2000.** Least-Squares Matching with airborne laserscanning data in a TIN structure, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* 33 (3A), p548-555.
- MasudaYokoya, N. T., . 1995.** A Robust Method for Registration and Segmentation of Multiple Range Images, *Computer Vision and Image Understanding*, Vol. 61, No.3, p. 295-397.

- Riegl Japan 株式会社. 2017. Riegl VQ-450 ホームページ.
http://products.rieglusa.com/Asset/10_DataSheet_VQ-450_rund_2014-09-02.pdf
- Riegl Japan 株式会社. 2017. Riegl VZ-400 ホームページ. 2011.
http://www.riegl-japan.co.jp/all_products/terrestrial/vz_400/vz-400.html.
- RusinkiewiczLevoy, M. S., 2001. Efficient Variants of the ICP Algorithm., IEEE International Conference on 3D Digital Imaging and Modeling, Quebec, p. 295-397.
- 一般社団法人 国土技術研究センター, 2002. 河川堤防の構造検討の手引き, 国土技術研究センター.
- 今西暁久, 平尾公孝, 橋菊生, 間野耕司, 石井一徳, 富樫健司. 2011. GPS 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.
- 鵜飼尚弘柴田拓, 大内山弘美. 2007. GPS 測量を応用した円山川堤防高計測～災害を未然に防ぐ堤防高管理に向けて～, 応用測量論文集 18 巻, p. 9-66.
- 臼井澄夫. 2011. 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, p. 358-361.
- 沖田孝介佐田達典, 川口拓哉. 2008. RTK 測位における GLONASS 併用効果, 土木情報利用技術論文集 vol. 17, p. 203-210.
- 川野浩平, 今井龍一, 中村健二, 田中成典. 2015. レーザプロファイラデータを用いた河川空間の 3 次元モデル構築手法に関する研究, 一般社団法人情報処理学会 情報処理学会論文誌 8(1), p. 55-72.
- 環境省, 2013. 気候変動の観測・予測及び影響評価統合レポート「日本の気候変動とその影響 2012 年度版」,
http://www.env.go.jp/earth/ondanka/rep130412/report_full.pdf.
- 公益財団法人 土木学会, 2008. 「耐越水堤防整備の技術的な実現性の見解」について, 耐越水堤防整備の技術的な実現性検討委員会報告書, p. 2-4.

国土交通省 河川局, 2007. 航空レーザ測量による河道及び流域の三次元電子地図作成指針 (案) .

国土交通省 関東地方整備局, 2016. 鬼怒川堤防調査委員会 報告書.

国土交通省 近畿地方整備局 豊岡河川国道事務所, 2005. 円山川流域委員会 第 12 回委員会資料.

国土交通省 国土地理院, 2005. 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) .

国土交通省 国土地理院, 2015. マルチ GNSS 測量マニュアル (案) ー近代化 GPS, Galileo 等の活用ー.

国土交通省 国土地理院, 2016. 公共測量作業規程の準則, 公益社団法人日本測量協会.

国土交通省 水管理・国土保全局 河川情報企画室, 2013. 河川空間の全周囲画像データ作成ガイドライン(案) .

国土交通省 水管理・国土保全局, 2012. 国土交通省 社会資本整備審議会河川分科会 安全を持続的に確保するための 今後の河川管理のあり方検討小委員会資料.
https://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/shaseishin/kasenbunkakai/shouiiinkai/anzenkakuho/dai01kai/dai01kai_siryoku2.pdf.

国土交通省 水管理・国土保全局 河川保全企画室, 2015. 河川の戦略的な維持管理について.

国土交通省 水管理・国土保全局 河川環境課, 2016. 堤防等河川管理施設及び河道の点検要領.

小島祥子, 2015. 自動車運転支援のための高精度自社位置推定に関する研究, 名古屋大学 学位論文.

小白井亮一, 2010. わかりやすい GPS 測量, 株式会社オーム社.

財団法人 国土技術研究センター, 2000. 改定解説・河川管理施設等構造令, 技報堂出版.

- 財団法人 日本河川協会, 2014. 改訂 解説・河川管理施設等構造令 財団法人 国土技術研究センター 編. 技報堂出版, 2014, .
- 財団法人 日本測量協会, 2005. 測量技術・建設技術審査証明 報告書 GNNS 測量システム., 建設技術審査証明協議会.
- ジック株式会社. 2011. レーザ測定システムホームページ,
<http://www.sick.jp/product/automatic/laser/>.
- 末次忠司, 2010. 河川技術ハンドブック 総合河川学から見た治水・環境, 鹿島出版社, p. 217-238.
- 須賀堯三, 橋本宏, 石川忠晴. 1984. 越流堤防調査最終報告書一解説編一. 建設省土木研究所河川研究室 土木研究所資料 No. 2074, p. 1-57.
- 関口秀雄, 柴田徹. 1982. 盛土基礎地盤の側方流動解析上の問題点, 土と基礎, Vol. 30, No. 5, p47-54.
- 橘菊生, 間野耕司, 島村秀樹, 西山哲, 2015. 河川堤防計測のための高所設置型 MMS の開発と精度検証, 公益社団法人日本測量協会 応用測量論文集 No. 26p. 75-86.
- 橘菊生, 間野耕司, 島村秀樹, 西山哲, 2015. 河川堤防計測へのモバイルマッピングシステムの適用, 日本写真測量学会 写真測量とリモートセンシング Vol. 54, No. 4, p. 166-177.
- 田中成典, 今井龍一, 中村健二, 川野浩平, 2011. 点群座標データを用いた 3次元モデルの自動生成に関する研究, 知能と情報 日本知能情報ファジィ学会誌 23(4), p. 572-590.
- 常田賢一, 2015. 平成 27 年 9 月関東・東北豪雨による破堤に伴う落掘に関する現地調査からの考察., 第 3 回地盤工学からみた堤防技術シンポジウム, 防災・保全部門:No. 13 1-4.
- 坪田邦治, 中島啓, 西垣誠, 2007. 軟弱地盤における築堤盛土による周辺地盤沈下対策工の考察, 土木学会論文集 F Vol. 63 (2007) No. 3, p. 323-334.
- 中川雅史, 2015. 絵でわかる地図と測量, 株式会社 講談社.

- 服部泰士, 二瓶泰雄, 大槻順朗, 八木澤順治, 2016. 実測データベースに基づく河川堤防の越流決壊・破損条件の検討, 土木学会論文集 B1 (水工学), p. I_1285-I_1290.
- 東良慶, 西山哲, 石川貴一郎, 吉岡裕嗣, 島村秀樹, 大浪裕之, 2014. モービルマッピングシステムによる河川堤防の高精度計測, 河川技術論文集 第 20 巻, p. 485-490.
- 福成孝三, 白井勝二, 吉川勝秀, 2007. 河川堤防システムの安全管理に関する実証的実験, 建設マネジメント研究論文集 Vol. 14, p. 311-320.
- 増田健, 2009. ICP アルゴリズム, 情報処理学会研究報告 Vol. 2009-CVIM-168 NO. 23, p. 1-8.
- 間野耕司, 宮作尚宏, 森田真一, 橘菊生, 2017. 河川における三次元計測の取り組み, ながれ 36 巻
- 三菱電機株式会社, 2011. 三菱モービルマッピングシステム 高精度 GPS 移動計測装置ホームページ, <http://www.mitsubishielectric.co.jp/pas/mms/>.
- 吉岡裕嗣, 橘菊生, 間野耕司, 大戸正司, 船田征, 2013. 新探査技術による河川堤防管理手法の高度化, 先端測量技術 105 号, p. 78-91.
- 吉川勝秀. 2011. 河川堤防システムの整備・管理に関する実証的考察, 水文・水資源学会誌 Vol. 24 No. 1, p. 21-36.
- 吉川勝秀, 2008. 河川堤防学, 技報堂出版.
- 吉川勝秀, 2011. 新河川堤防学 河川堤防システムの整備と管理の実際, 技報堂出版.
- 吉田圭介, 前野詩朗, 間野耕司, 山口華穂, 赤穂良輔, 2017. ALB を用いた河道地形計測の精度検証と流況解析の改善効果の検討, 土木学会論文集 B1 (水工学) Vol. 73, No. 4, p. I_565-I_570