

関西大学審査学位論文

MMS と LP の点群データを用いた河川空間モデルの  
自動生成に関する研究

Research on Automatic Generating River Space Model  
Using Point Cloud Data for MMS and LP

平成 27 年 9 月

川野 浩平

関西大学大学院総合情報学研究科

## 要旨

私たちの生活空間を創造・維持する上で、河川は重要な機能をもつ公共の財産である。しかし、河川には、洪水や氾濫などの災害による危険性も潜んでいる。こうした危険から私たちの生活を守るため、河川の維持管理が行われている。河川管理者は、河川と堤防などの周辺構造物を含む空間（以下、河川空間という）を平面、縦断や横断の図面を台帳として蓄積している。その中でも、特に河川空間の形状的な変化を記録した資料として、河川定期縦横断図が整備されている。河川定期縦横断図は、河口から 200m 間隔で堤防の断面形状が変化する点（以下、断面変化点という）を測量した成果が記録されている。河川管理者は、河川定期縦横断図を用いて河川全体の変状の概要を把握している。その一方で、測量箇所以外の変状は、近接する縦横測量値を参考に推測している。これは、河川定期縦横断図の規程を策定した当時の測量技術と費用の制約によるものである。現在は、レーザ測量技術の発達により容易に河川空間全体を計測できる。しかし、レーザ測量の測量成果（以下、点群データという）の利用を前提とした規程がまだ策定されていない。そのため、点群データの活用方策として、点群データから河川空間を再現した 3 次元モデル（以下、河川空間モデルという）の利用が注目されている。そこで、本研究では、点群データから断面変化点を再現した河川空間モデルの生成手法とその活用手法を提案する。

河川空間モデルを生成する有用な点群データとしては、車両にレーザ測量器を搭載した MMS (Mobile Mapping System) の点群データ(以下、MMS データという)と、公共測量で採用されている航空レーザ測量の成果である LP (Laser Profiler) の点群データ（以下、LP データという）とがある。MMS データや LP データから 3 次元モデルを生成する既存研究として、都市や舗装された道路周辺の特徴を加味したモデル化の研究があるが、堤防は都市や舗装された道路とは異なる特徴の構造物であるため、既存手法をそのまま適用することは難しい。また、MMS データや LP データは膨大な点群データであるため、一般の CAD や CG ソフトでは読み込めない課題がある。

そこで、本研究では、MMS データと LP データから、河川管理の対象となる断面変化点として河川空間の面と面の境界線（以下、ブレイクラインという）を維持しつつ点群データを間引いて河川空間モデルを生成する手法を提案した。具体的には、まず、MMS データの特性を用いて MMS データから天端面のブレイクラインを抽出する手法と、ブレイクラインを考慮した点群データの間引き手法を提案した。次に、MMS データとは異なる特性の LP データにあわせて LP データから天端面や小段のブレイクラインを抽出する手法を提案した。そして、提案手法を用いて生成した河川空間モデルと河川定期横断図とを重畳して比較することにより、提案手法の有用性を評価した。

異なる時期に計測した点群データから生成した河川空間モデルを用いて、それらの差分を検出することで、変状をとらえることができる。特に、全国の中小河川を対象に実施されている治水安全度評価プロジェクトの一環として LP データの蓄積が行われている。また、災害

時は道路の寸断などの理由から詳細な現地踏査が困難な場合があるため、被害状況の把握を目的とした航空測量が行われる。これら災害前後の LP データによる河川空間モデルは、災害時に被害箇所を把握する上で有用な情報となる。そこで、本研究では、災害時に現地踏査の手間と時間の効率化を図る支援策の確立を目的として、災害前後の河川空間モデルから被害箇所の候補地を自動的に検出する手法を提案した。具体的には、災害前後の河川空間モデルのブレイクラインを用いて、河川堤防の形状的な変化の度合いを検出する手法を提案した。そして、東日本大震災で得られた LP データを用いて実証実験を行い、提案手法の有用性を評価した。

MMS データと LP データは、それぞれ異なる特性をもった点群データである。本研究では、これらの特性の異なる点群データの組み合わせることで、より高精度な河川空間モデルを形成できるかを考察する。そのため、前述の提案手法を用いて MMS データと LP データから生成した河川空間モデルを比較し、各手法の強みを明らかにする。これにより、異なる点群データの組み合わせ技術の実現にむけた研究課題を提案した。

これにより、本論文は、点群データを用いた河川空間モデルの生成技術の発展に寄与できたと考えられる。

今後の研究展開としては、河川空間モデルを形成する技術の精度向上と、実際の維持管理への河川空間モデルの適用との2つに取り組んでいく予定である。河川空間モデルを形成する技術の精度向上では、スロープなどの河川構造物をふくむ一般的でない河川空間モデルを対象とした生成技術の提案と、異なる特性の点群データから一つの3次元モデルを生成する技術の確立を目指す。

## 目次

第 1 章 緒論.....	1
1.1 研究の背景.....	1
1.2 研究の目的.....	2
1.2.1 研究対象.....	2
1.2.2 河川空間モデルを生成する手法の提案.....	2
1.2.3 河川空間モデルを活用する手法の提案.....	3
1.3 本研究の流れ.....	4
1.4 本論文の構成.....	6
第 2 章 研究の流れ.....	7
2.1 研究の適用対象.....	7
2.2 河川堤防の形状の調査.....	7
2.2.1 調査内容.....	7
2.2.2 調査結果.....	7
2.3 河川空間における MMS データと LP データの特性.....	9
2.3.1 MMS データの概要.....	9
2.3.2 LP データの概要.....	11
2.3.3 MMS データと LP データの特性分析.....	14
2.4 既存研究の課題と対応方針.....	15
2.4.1 MMS データから河川空間モデルを生成する既存研究.....	15
2.4.2 LP データから河川空間モデルを生成する既存研究.....	16
2.4.3 河川空間モデルを災害時に活用する既存研究.....	16
第 3 章 MMS データを用いた河川空間モデル生成技術の提案.....	17
3.1 研究の概要.....	17
3.2 ブレイクラインを考慮した河川空間モデル生成技術の提案.....	17
3.2.1 処理の流れ.....	17
3.2.2 ブレイクライン抽出機能.....	19
3.2.3 河川空間モデル生成機能.....	22
3.2.4 実証実験.....	24
3.2.5 実験結果と考察.....	28
3.3 河川堤防の特徴を考慮したブレイクラインの自動抽出技術の提案.....	35
3.3.1 植生による壁状ノイズへの対策.....	35
3.3.2 ブレイクラインを考慮した河川空間モデル生成技術との関係.....	38
3.3.3 処理の流れ.....	39
3.3.4 天端面特定機能.....	40

3.3.5 植生ノイズを考慮したブレイクライン抽出機能.....	44
3.3.6 実証実験 .....	47
3.3.7 実験結果と考察.....	53
<b>第4章 LP データを用いた河川空間モデル生成技術の提案.....</b>	<b>63</b>
4.1 研究の概要.....	63
4.2 LP データを用いた MMS 手法による河川空間モデル生成の課題分析.....	63
4.2.1 MMS 手法の概要 .....	63
4.2.2 LP データを用いた河川空間モデル生成実験 .....	64
4.3 MMS 手法を LP データに適用する場合の課題への対応方針.....	66
4.3.1 LP データの特性を考慮したブレイクライン候補線生成技術の対応 .....	66
4.3.2 LP データの特性を考慮したブレイクライン抽出技術の対応 .....	68
4.4 LP データの特性を考慮した河川空間モデル生成技術の提案.....	68
4.4.1 処理の流れ.....	68
4.4.2 平坦部特定機能.....	70
4.4.3 ブレイクライン抽出機能.....	77
4.5 実証実験.....	81
4.5.1 実験概要 .....	81
4.5.2 実験条件 .....	81
4.5.3 実験の内容.....	85
4.5.4 実験結果と考察.....	86
<b>第5章 災害時における河川空間モデルを活用した被害箇所の検出手 法の提案 .....</b>	<b>93</b>
5.1 研究の概要.....	93
5.2 被災状況の調査.....	93
5.3 河川空間モデルを用いた被害箇所の検出技術の提案.....	97
5.3.1 処理の流れ.....	97
5.4 被害箇所検出機能.....	98
5.4.1 被害箇所判定処理.....	98
5.4.2 被害断面生成処理.....	98
5.5 震災前後の河川空間モデルを用いた評価実験.....	99
5.5.1 実験目的 .....	99
5.5.2 対象エリア選定.....	99
5.5.3 実験条件 .....	100
5.5.4 実験内容 .....	100
5.5.5 実験結果と考察.....	101
<b>第6章 異なる点群データを用いた河川空間モデル形成の課題の考察</b>	

.....	107
6.1 研究の概要.....	107
6.2 比較条件.....	107
6.2.1 比較環境と対象データ.....	107
6.3 比較方法.....	109
6.4 比較結果.....	110
6.4.1 MMS 河川空間モデルと LP 河川空間モデルの比較結果.....	110
6.4.2 MMS 河川空間モデルと LP 河川空間モデルの横断形状.....	113
6.5 結果と考察.....	121
6.5.1 横断形状の可視化による評価.....	121
6.5.2 河川横断図との標高差を用いた評価.....	123
6.6 異なる点群データを組み合わせた河川空間モデル形成の課題.....	124
第7章 総括.....	127
参考文献.....	131

# 第1章 緒論

## 1.1 研究の背景

私たちの豊かな生活空間を創造・維持する上で、河川は重要な機能をもつ公共の財産である。しかし、河川には私たちの生活を豊かにする面だけでなく、洪水や氾濫などの災害による危険な面も潜んでいる。こうした河川の危険性から私たちの安心・安全で豊かな生活を守るためには、河川の維持管理が必要不可欠である。

河川[1]は、支川というたくさんの流れが集まって本川という大きな流れになる。また、途中から本川と分れて直接、海に注ぐ派川という流れもある。こうした木の幹や枝のように見える川の流れの全体を水系という。河川法では、これらの河川水系から日本の国土保全や公共利害に関係のある重要な河川の管理・治水および利用等の規定を定めている。国土の保安上や国民の経済上、特に重要な水系として 109 水系が一級水系に指定されている。その中で、本川などの一定区間を一級河川として国が直接管理している。河川法の管理対象は広範囲[2]である。河川法が適用されている河川は約 35,000 本(約 144,000km)あり、そのうち一級河川は約 13,935 本(約 88,000km)ある。

河川管理者は、河川と河川堤防などの周辺構造物を含む空間(以下、「河川空間」という)の公共測量[3]-[17]の成果を平面図、縦断図や横断図などの図面や台帳として記録・蓄積している。河川は、川の上流から下流に向かって左側を左岸、右側を右岸という。河川空間は、左岸の堤防敷から高水敷や低水路をふくむ右岸の堤防敷までの範囲である。そのため、河川空間には、河川堤防などの人工形状と植生や未舗装の地表面などの自然形状が混在した空間となっている。

河川空間の変状を定期的に記録する規程として、河川定期横断図[18][19]が 3~5 年の頻度で更新されている。河川定期横断図は、河口から上流に向かって 200m ごとに左右岸に設置された距離標を対象に測量機器を据え付けて、法肩や法尻など堤防の断面形状が変化する点(以下、「断面変化点」という)を計測した成果から調製される。また、距離標が設置されている箇所以外でも、河川管理者が河川の形状を管理する上で必要と判断した箇所を測量した成果から調製される。河川管理者は、蓄積された河川定期縦横断図の縦横測量値から河川の変状を把握している。しかし、任意箇所の変状は、直接の縦横測量値が存在しないため、近接する縦横測量値を参考に推測した値を用いているのが現状である。これは、河川定期縦横断図の規程を策定した当時の測量技術と計測に掛かる費用とを踏まえて、最小限の計測で河川管理の多様な用途に応じられるように策定されているためである。

現在は、レーザ測量技術の発達により、河川空間全体の緻密な計測が実現しつつある。こうしたレーザ測量器を用いた三次元の測量成果(以下、「点群データ」という)を用いることで、河川空間の任意箇所を正確な測量値で把握[20]することができる。実際の公共測量で採用されているレーザ測量[21]-[28]は、平成18年に「航空レーザ測量による数値標高モデル(DEM)作成マニュアル」が国土地理院より公開されている。実際の運用事例として、平成17年から航空レーザ測量の成果であるレーザプロファイラデータを中小河川の治水安全度評価で本格的に活用している。自動車を用いたレーザ測量は、平成24年に「移動計測車両による測量システムを用いる数値地形図データ作成マニュアル(案)」が国土地理院より公開されている。さらに、水中の河床等の地形を対象にした測量技術として、グリーンレーザを用いたALB(Airborne Laser Bathymetry)の開発も進められている。こうした測量技術の発達に伴い、様々な公共事業で三次元の測量成果を利用した取り組み[29]-[57]が進められている。しかし、河川管理の分野では、未だ点群データの利用を前提とした河川管理の規程が策定されていない。

そのため、点群データから河川空間を再現した3次元モデル(以下、「河川空間モデル」という)を生成し、活用する方策が注目されている。河川空間全体を緻密に計測した点群データから、現在の河川管理で計測されている断面形状点を再現した河川空間モデルがあると、任意箇所の標高や長さの測量値を簡単に把握できると考えられる。

## 1.2 研究の目的

### 1.2.1 研究対象

河川空間モデルを生成する有用な点群データとしては、車両にレーザ測量器を搭載したMMS(Mobile Mapping System)の点群データ(以下、MMSデータ)と、航空レーザ測量の成果であるLP(Laser Profiler)の点群データ(以下、LPデータ)とがある。本研究では、従来の河川管理に点群データを間接的に利用することを目的として、これらの点群データから河川管理の対象となる断面変化点を再現した河川空間モデルの生成手法とその活用法を提案する。また、異なる点群データを組み合わせた河川空間モデルの形成を目指した研究課題について考察する。

### 1.2.2 河川空間モデルを生成する手法の提案

河川空間を計測したMMSデータとLPデータは、計測範囲に応じた膨大な点群データである。そのため、一般のCADソフトやCGソフトでは読み込むことができない問題がある。MMSデ



ータや LP データを対象とした専用のソフトウェアも市販されているが、広域を計測した膨大な量の点群データをそのまま読み込んで自動的に河川空間モデルを生成することはできない。そのため、既往研究では、膨大な点群データからメッシュデータを生成する手法[58]が考案されている。点群データからメッシュデータを生成する手法では、一定間隔の格子状のフィルタを用意し、格子に含まれる点群から標高を算出し、代表点を取得する。そのため、この手法で生成する 3 次元モデルの再現精度は格子の間隔に依存する。大規模工事のように計測範囲が広大になると、データ量を間引くために格子間隔を広げて CAD ソフトに読み込まなければならない。この条件の場合、河川空間モデル上で正確な断面形状が変化する境界線(以下、ブレイクライン)が再現できない。

そのため、既往研究では、MMS データや LP データからブレイクラインのみを抽出する手法が考案されている。MMS データからブレイクラインを抽出する既往研究[59]-[62]として、点群データから生成したメッシュを簡略化する手法や点群データに付与された色情報を用いる手法がある。また、LP データからブレイクラインを抽出する既往研究[63][64]として、点群データから建物を判別して市街地モデルを作成する研究や、航空写真や LP データから地形の起伏を再現して稜線を抽出する研究がある。しかし、これらの手法を人工形状と自然形状が混在する河川空間に用いた場合は、砂利や植生などのノイズの影響で河川管理に不要なブレイクラインを誤抽出する問題や、河川管理で重要な天端面や小段などのブレイクラインを抽出できない問題が発生する可能性がある。そのため、河川管理の対象となる断面変化点を再現した河川空間モデルの生成を実現するには、一般的なソフトウェアでは読み込むことが出来ない膨大な点群データを間引く課題と、自然形状と人工形状の混在する河川堤防の曖昧なブレイクラインを抽出する課題を解決する必要がある。

以上の課題を踏まえ、本研究では、MMS データと LP データから点群の相対的な位置関係をj用いて河川堤防のブレイクラインを抽出する技術[65]-[67]と、ブレイクラインを考慮して点群データを間引く技術を提案して、MMS データと LP データから河川空間モデルを生成する。そして、実際に河川管理で用いられている河川定期横断図と、河川空間モデルから河川定期横断図と同様の地点で生成した横断面図とを重畳して比較することにより、提案手法の有用性を評価する。

### 1.2.3 河川空間モデルを活用する手法の提案

#### (1) 河川空間モデルの実務への適用性検証

MMS データや LP データから生成した河川空間モデルを活用する一方策として、異なる時期に計測した点群データを用いて生成した河川空間モデルの差分から、変状をとらえる手法がある。災

害復旧のように迅速な対応を求められる場面で、すべての被害箇所を詳細に確認することは多大な手間と時間を必要とする。また、震災による道路の寸断などの理由から現地計測が困難な場合がある。この対策として、LP データなどの震災前後の測量成果を比較することで、震災により甚大な被害を受けた箇所(以下、「被害箇所候補」という。)を自動的に抽出する手法が研究されている。被害箇所候補を自動抽出する既存手法として、衛星画像や航空写真による変化域の抽出手法や、DEM データや LP データによる差分解析手法がある。衛星画像や航空写真による手法では、色情報の変化を用いるため、被害による形状変化の度合いを算出することが困難である。また、DEM データは格子状のメッシュデータで表現されるため、格子内の形状的な特徴が失われており、河川管理で重要な河川堤防の変状の把握が困難な場合がある。

以上の課題を踏まえて、本研究では、災害前後の LP データから生成した河川空間モデルを比較することで、高速かつ簡易的に被害箇所候補と被害の度合いを取得する手法[68]を提案する。そして、東日本大震災で得られた実際の震災前後の LP データを用いて、提案手法の実務への適用性を検討する。

## (2) 異なる点群データを組み合わせた河川空間モデルの形成に向けた課題の考察

MMS データと LP データには、それぞれ異なる特性がある。また、測量技術の発達により、将来的には、より様々な点群データが公共測量に採用される事も考えられる。現在の公共測量では、点群データの特性を活かした活用マニュアルが個別に整理されており、複数の点群データの組み合わせ技術については実用化されていないのが現状である。

こうした現状を踏まえて、本研究では、これらの特性の異なる点群データをどのように活用すればより高精度な河川空間モデルを生成できるかを考察する。そのため、前述の提案手法を用いて MMS データと LP データから生成した河川空間モデルを比較し、各手法で生成した河川空間モデルの強みを明らかにする。

## 1.3 本研究の流れ

本研究では、MMS データや LP データなど、レーザ測量で得た高精度な点群データから河川空間モデルを生成し、従来の河川管理に活用することで、河川管理に点群データを間接的に利用することを目指す。点群データを従来の河川管理に利用するために本研究で解決すべき課題を次の図 1.1 に示す。

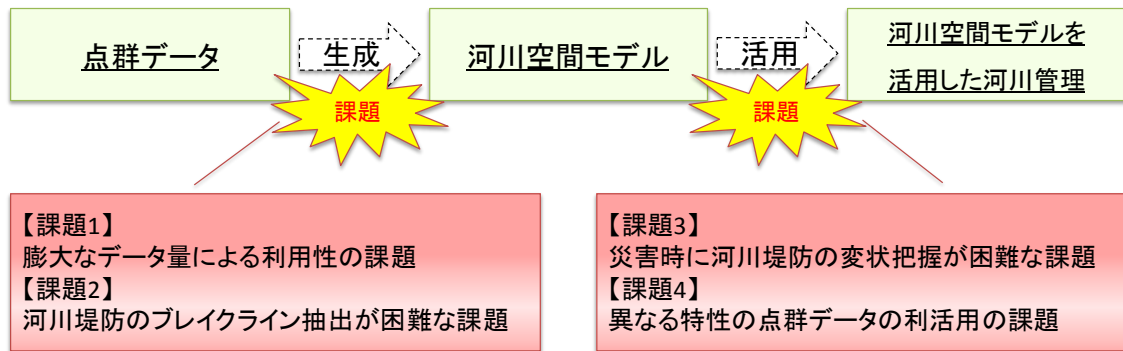


図 1.1 本研究で解決すべき課題

点群データから河川管理に活用可能な河川空間モデルを生成するには、「膨大なデータ量による利用性の課題」と「河川堤防のブレイクライン抽出が困難な課題」を解決する必要がある。また、河川空間モデルには、平常時における従来の河川管理だけでなく、災害対応などの非常時における活用が考えられる。河川空間モデルを災害対応に適用するには、「災害時に河川堤防の変状把握が困難な課題」がある。また、今後の測量技術の発展を予想した活用においては、「異なる特性の点群データの利活技術が確立していない課題」がある。こうした課題を解決するにあたって、本研究の流れを流れを次の図 1.2 に示す。

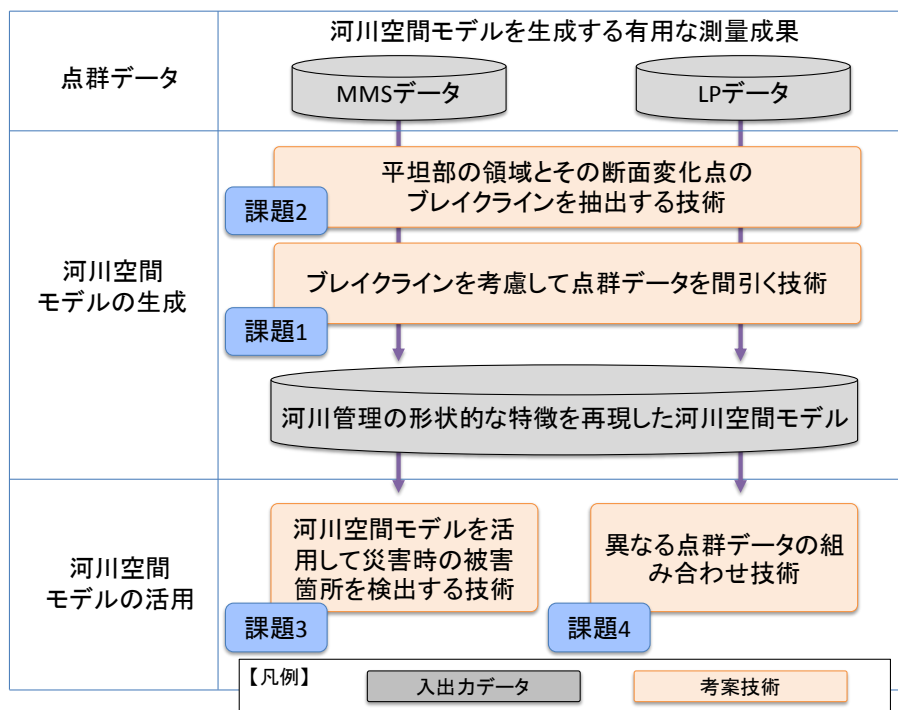


図 1.2 本研究の流れ

本研究では、それぞれの課題に対して、次の方針で手法を提案し、解決する技術を実現する。まず、課題 1 に対しては、河川堤防のブレイクラインを考慮した点群データの間引き技術を実現する。次に、課題 2 に対しては、点群データから天端面や小段などの平坦部を MMS データや LP データの特性を用いて抽出し、平坦部の外形線に沿ってブレイクラインを抽出する技術を実現する。そして、課題 3 に対しては、災害前後の点群データから生成した河川空間モデルのブレイクラインを比較することで、河川堤防の変状を把握する技術を実現する。最後に、課題 4 に対しては、MMS データと LP データから生成した河川空間モデルの異なる特性を明らかにして、異なる点群データを組み合わせた河川空間モデルの形成にむけた研究課題の提案を目指す。

## 1.4 本論文の構成

本論文は、第 1 章にて、河川管理の背景と、測量技術や費用の制約について述べる。第 2 章にて、河川管理の現状と、堤防の形状的な特徴について整理する。また、最新の測量技術を利用した取り組みについて調査し、それらを単に適用しただけでは解決が困難な課題を洗い出した上、研究の着眼点と構想について論じる。第 3 章と第 4 章にて、第 2 章で整理した最新の測量技術の中で、既に公共測量で採用されている MMS データと LP データから河川空間モデルを生成する手法を提案する。そして、提案手法の有効性について議論する。第 5 章にて、まず、提案手法を用いて生成した河川空間モデルの災害時における実務への適用について検討する。次に、震災前後の河川空間モデルを活用して被害箇所候補を自動的に検出する手法を提案する。そして、提案手法の有効性について議論する。第 6 章にて、異なる点群データから生成した河川空間モデルの利点について比較検証し、異なる利点の点群データの組み合わせ技術について考察する。最後に第 7 章にて、研究成果の総括と本研究成果の今後の展開について述べる。

## 第2章 研究の流れ

### 2.1 研究の適用対象

本研究では、MMS データと LP データから河川堤防の断面変化点を再現した河川空間モデルの生成手法とその活用法を提案する。MMS データと LP データは、それぞれ異なる特性の点群データである。そのため、各点群データの特性を考慮した河川空間モデルの生成手法が必要である。

以上の研究対象に関して、第 2.2 節では、河川堤防の形状を調査した結果を整理する。第 2.3 節では、河川空間における MMS データと LP データの特性について調査した結果を整理する。第 2.4 節では、既存研究の手法とその課題について調査した結果を整理する。第 2.5 節では、第 2.4 節で整理した課題を解決する手法を提案する。

### 2.2 河川堤防の形状の調査

#### 2.2.1 調査内容

本調査では、河川堤防の形状の特性を把握するため、実際に一級河川の河川管理で用いられている河川定期横断図を整理した。具体的には、淀川の横断図 175 枚（河口から 16.8km までの範囲で作成）を調査対象とした。横断図の整理では、河川管理施設等構造令にて定められた河川堤防の形状を参考にして分類した。

#### 2.2.2 調査結果

河川定期横断図を整理した結果を図 2.1, 図 2.2, 図 2.3 と表 2.1 に示す。河川堤防は、図 2.1 と図 2.2 に示す河川管理施設等構造令に定められた典型的な凸型形状と、図 2.3 に示すその他の形状の 3 つのグループに分類された。表 2.1 に示すとおり、淀川では、約 17km の延長に対して約 9 割（165 枚）が典型的な凸型形状であった。また、その他に分類された横断図 10 枚を詳細に分析したところ、構造物に覆われた地区であることがわかった。これらの調査結果から、典型的な凸型形状を対象とした 3 次元モデル構築手法を考案することで、一般的な河川堤防に広く適用できることがわかった。

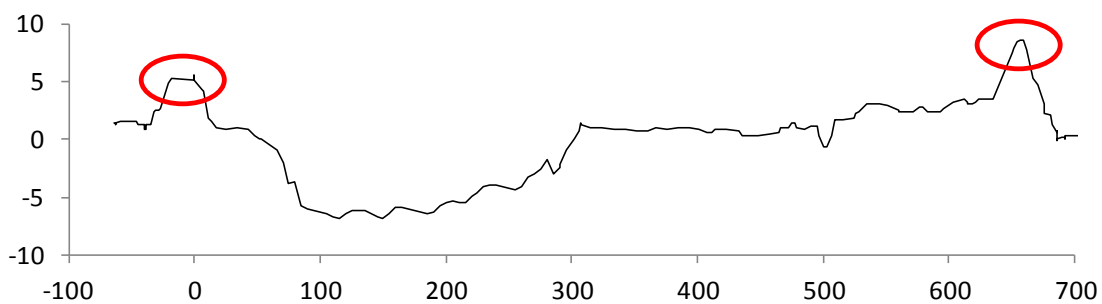


図 2.1 典型的な凸型形状（小段なし）

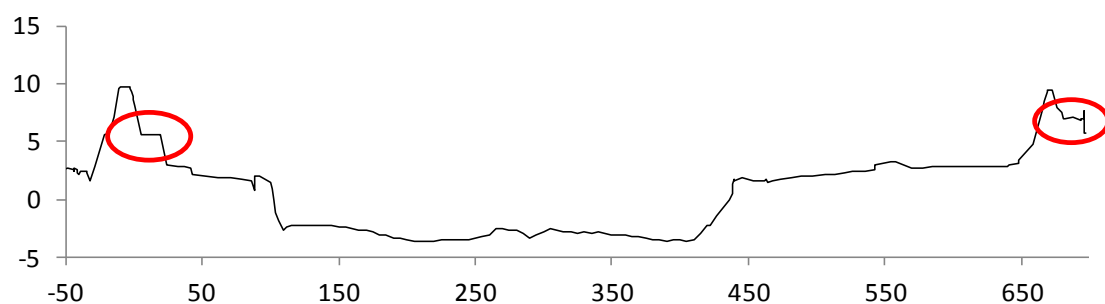


図 2.2 典型的な凸型形状（小段あり）

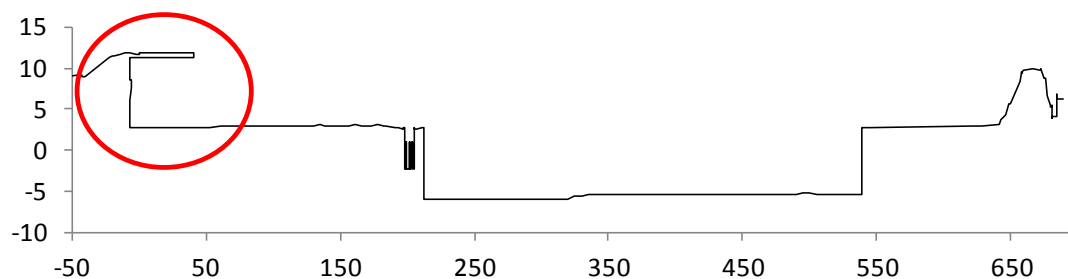


図 2.3 その他の形状

表 2.1 堤防形状の分類結果

分類		件数	割合
淀川流域	小段あり堤防	61	34.86%
	小段なし堤防	104	59.43%
	その他	10	5.71%
	合計	175	100%

## 2.3 河川空間におけるMMSデータとLPデータの特性

本分析では、まず、MMS データと LP データの概要を説明する。次に、河川堤防の形状の特性を調査する。そして、河川堤防を計測した MMS データと LP データの特性を比較・分析する。これにより、MMS データと異なる LP データの特性を明らかにする。

### 2.3.1 MMSデータの概要

本研究では、三菱電機株式会社の開発した MMS を用いて MMS データを取得した。MMS の主な特徴は次のとおりである。また、MMS の構成を図 2.4、仕様を表 2.2 に示す。

- 車両に搭載したレーザによって、走行経路周辺の約 30m の 3 次元データを計測する。レーザの最大到達距離は 80m である。
- 位置情報は、車両上部に取付けた GPS アンテナから取得する。
- 計測データは、随時車内に設置された PC により適切に処理・保存される。最大 80km/h で走行しながらの計測が可能である。
- 3 次元データはレーザスキャナから得られた色付きの点群データで表現される。

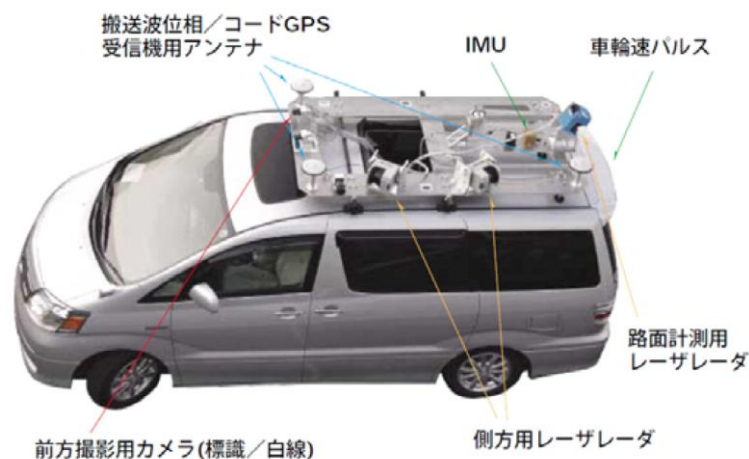


図 2.4 三菱 MMS の構成（出典：三菱電機（株））

表 2.2 三菱 MMS の主な仕様

主要構成部品	GNSS アンテナ：3 台，IMU：1 台，オドメトリ：1 式，ベースプレート：1 台，レーザスキャナ：2 台（前後に各 1 台），カメラ：2 台（前後に各 1 台），センサ BOX：1 台，操作用 PC：1 台
車両姿勢測位	車両位置（緯度，経度，高度，（緯度，経度，高度の予測誤差）），車両姿勢角（ヨー，ロール，ピッチ）衛星取得時，位置：2 周波 GNSS に準じる，姿勢：3GNSS により計測，衛星不可視時 IMU とオドメトリにより連続計測可能（車両内誤差予測システム装備）
その他車両機能	ラフドライビングモニタ，スカイプロット，機器動作インジケータ，Fix インジケータ，方位角検定，初期走行・終了走行完了確認インジケータ
レーザ取得能力	最大 13575 点/秒（地表面にて 10cm メッシュ以下，時速 27km 時），最大到達距離 80m（対象物の反射強度により低下），山間道路での白線位置評定例：標準偏差 0.095m（三菱電機（株）による計測結果例）
カメラ取得能力	200 万画素 12bit 画像 10FPS，距離・時間・ボタンによるシャッター可能，オート・マニュアルアイリス切り替え可能
雨天時	走行可能（ただしカメラ，レーザスキャナの計測データは劣化します）

出典：三菱モビルマッピングシステム 高精度 GPS 移動計測装置紹介

<http://www.mitsubishielectric.co.jp/mms/>

本研究で用いる MMS データは，一級水系である淀川水系の堤防周辺を計測した点群データである．淀川堤防の計測結果を次の図 2.5 に示す．

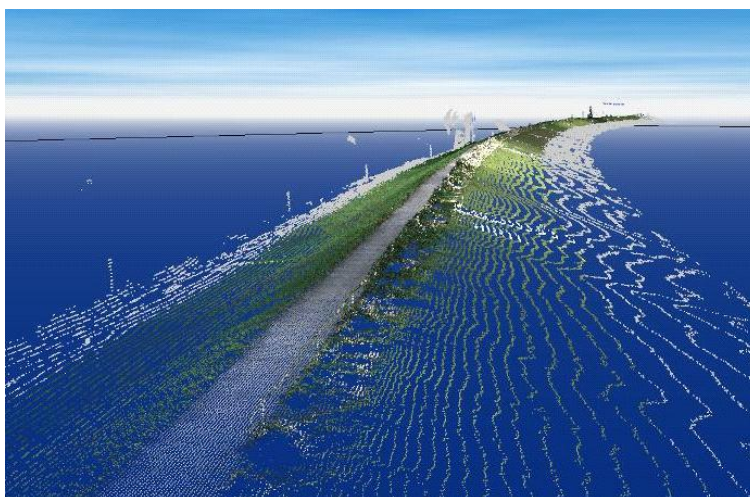


図 2.5 MMS データの可視化例



図 2.5 は、淀川堤防の天端面を走行し、周辺の地形・地物などを計測した結果である。そのため、図 2.5 からは、車両からの距離に応じて計測密度が下がる特徴がわかる。MMS データは、道路台帳附図の更新業務など、道路とその周辺に関する業務に用いられている。

### 2.3.2 LPデータの概要

本研究では、国土交通省近畿地方整備局で航空レーザ測量を実施して取得した LP データを用いる。航空レーザ測量の主な特徴は次のとおりである。航空レーザシステムの構成を図 2.6、仕様を表 2.3 に示す。

- 航空機に搭載したレーザによって、飛行高度 2000m でスキャン角度が左右の合計 20 度で計測する場合、地上を幅約 700m で一度に計測する。
- 位置情報は、GPS アンテナと地上の電子基準点を利用することにより、地上の測量と同様に高精度に位置を取得する。
- 計測データは、航空機から垂直に発信したレーザの反射信号の波形を解析してラストパルスを取得する。
- 3次元データはレーザスキャナから得られた点群データで表現される。
- 計測データの点検調整を行ったものをオリジナルデータ、オリジナルデータから交通施設（道路、鉄道）や植生（樹木、竹林）などの地表遮蔽物を除去したものをグランドデータと呼ぶ。

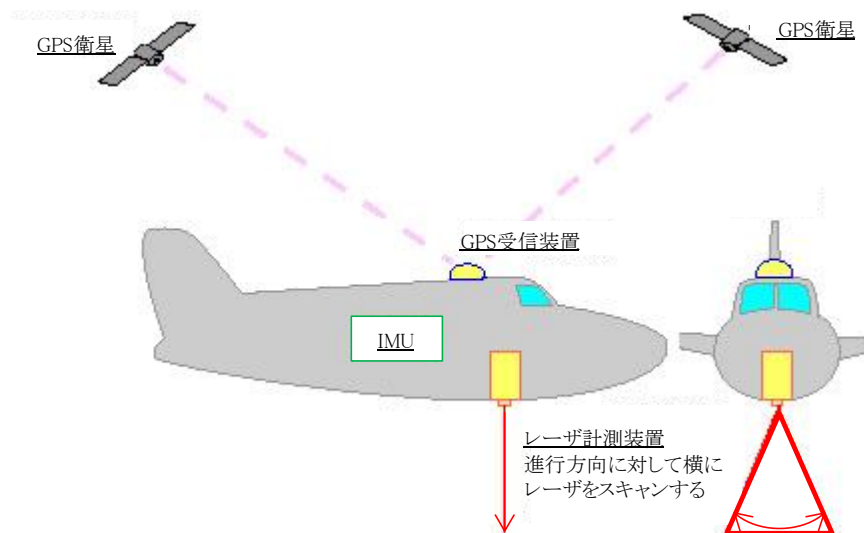


図 2.6 航空レーザ測量の構成

表 2.3 LP データに関する公共測量の仕様

公共測量作業規程の準則		航空レーザ測量による河道および流域の 3次元電子地図作成指針（案）	
項目	精度	項目	精度
調整用 基準点	水平位置 4級基準点測量 標高値 4級水準点測量	調整用 基準点	水平位置 4級基準点測量 標高値 4級水準点測量
オリジナル データ	調整用基準点との標高偏差 25cm 以上の場合、地域全体を 補正	オリジナル データ	記載なし
グラウンド データ	標高偏差 30cm 以上の場合、 再計算または再計測	グラウンド データ	標高偏差 30cm 以上の場合、 再計算または再計測
グリッド データ	メッシュ内に グラウンド 0.3m 以内 データがある	グリッド データ	メッシュ内に グラウンド 0.3m 以内 データがある
	メッシュ内に グラウンド 2.0m 以内 データがない		メッシュ内に グラウンド 2.0m 以内 データがない

航空写真上に LP データのレーザ計測点の位置を赤で示したものを次の図 2.7 に示す。図 2.7 から、画像左下の青い屋根の周辺で、レーザ計測点の少ないことがわかる。現在、国土地理院が公共測量で採用している航空レーザ測量のレーザ光は、このような青や黒い部分が苦手で、反射して戻ってこない場合がある。

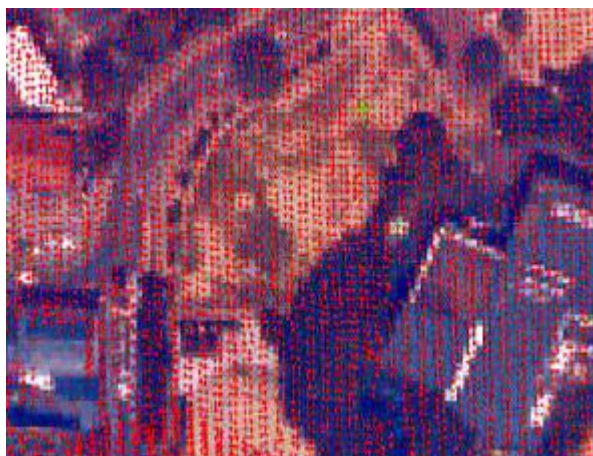


図 2.7 LP データの可視化例

LP データは、航空機に搭載したレーザ測距装置を用いて、地表面の標高を計測した平面直角座標系の計測結果である。そのため、上空から鳥瞰可能な対象を広く範囲に計測できる特徴をもつ。なお、本研究では、国土交通省国土地理院の定めた航空レーザ測定の規定に従って作成されたグラウンドデータを用いる。

### 2.3.3 MMSデータとLPデータの特性分析

#### (1) MMSデータとLPデータの計測範囲の特性

一級水系である淀川の河川堤防を計測したMMSデータとLPデータの計測点を計測地点の河川横断面図と重ね合わせた例を図2.8, 図2.9に示す。図2.8, 図2.9を確認すると、LPデータは、法面や小段、高水敷など天端面以外の地表面形状を含むことがわかる。これは、MMS計測では車両から前方または後方の路面に向けてレーザを照射して計測するのに対して、航空レーザ測量では、天頂方向から地表面に向けてレーザを照射して計測するためである。これらのことから、LPデータは、鳥瞰可能な水平面の形状的な特徴の把握に適していることがわかる。

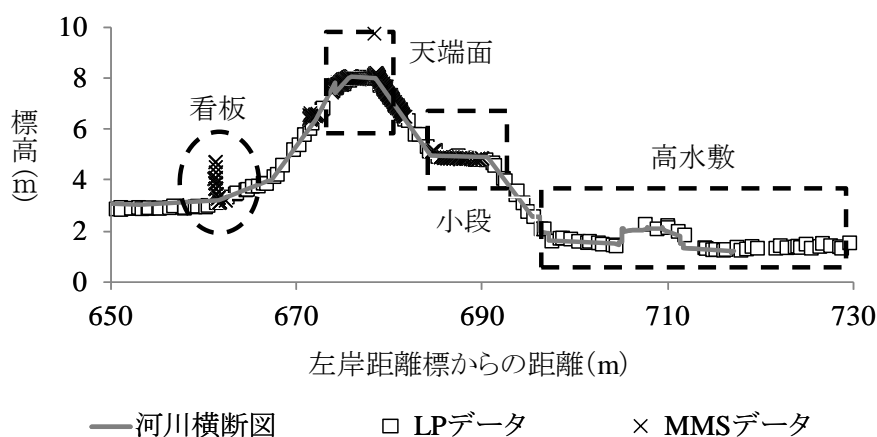


図 2.8 淀川下流の例

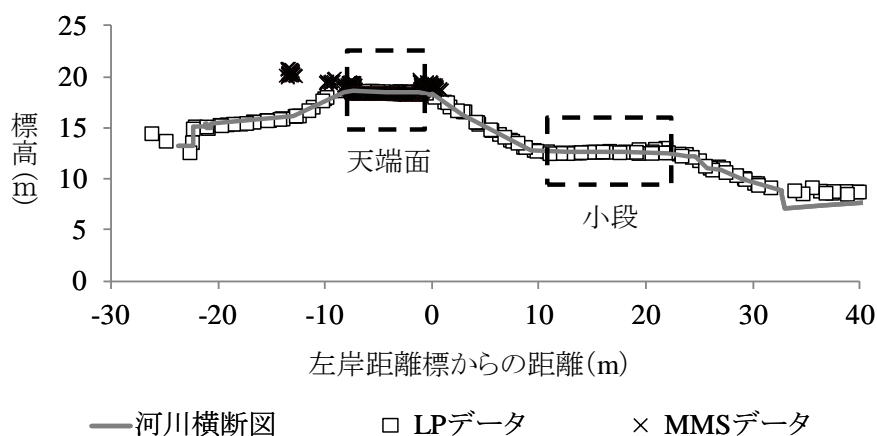


図 2.9 淀川上流の例

## (2) MMS データと LP データの密度分布の特性

図 2.8, 図 2.9 に示す河川横断面図の天端面と小段の計測点の密度を表 2.4 に示す. 表 2.4 を確認すると, MMS データは, 計測位置である天端面の密度と比較して, 小段の密度が下がっていることがわかる. これに対して, LP データの点群密度は, 天端面と小段で一様な密度であることがわかる. また, LP データと比較して MMS データの密度が高いことがわかる. これらのことから, MMS データは, 天端面の形状的な特徴の把握に適していることがわかる.

表 2.4 点群データの密度分布

		MMS データ (点/m <sup>2</sup> )	LP データ (点/m <sup>2</sup> )
淀川下流の例	天端面	185.747	1.810
	小 段	27.649	1.656
淀川上流の例	天端面	172.309	2.184
	小 段	-	2.257

## 2.4 既存研究の課題と対応方針

### 2.4.1 MMSデータから河川空間モデルを生成する既存研究

MMS データから河川空間モデルを生成する作業には, 「膨大なデータ量による利用性の課題」と「河川堤防のブレイクライン抽出が困難な課題」がある. そこで, 本研究では, 「MMS データから抽出したブレイクラインを考慮した間引き手法の考案」により, 本課題を解決する.

MMS データからブレイクラインを抽出する既往研究として, 点群データの相対的な位置関係を用いる手法や点群データに付与された色情報を用いる手法がある. 点群データの相対的な位置関係を用いる手法では, メッシュの法線ベクトルを用いた手法, 曲率を用いた手法, そして角度を用いた手法が研究されている. これらの手法は, 境界面が明確な幾何形状の 3 次元モデルを生成する際に有効である. しかし, 河川堤防は, 人工形状と自然形状が混在するため明確なブレイクラインが存在しない場合があり, さらに砂利や植生などの影響から河川管理で必要ないブレイクラインを誤抽出する可能性がある. また, 点群データに付与された色情報を用いる手法は, センターラインや路側帯などの標識が存在する条件を対象にした 3 次元モデルの生成に有効である. しかし, 河川堤防は路側帯などの明確な識別子が無い場合があるため, 色情報からの判別が困難になることが懸念される.

そこで, 本研究では, MMS データから河川堤防の天端面の形状を抽出し, 天端面の外形線に沿って断面変化点を取得することで河川堤防のブレイクラインを抽出する手法を提案する. そして, 提案手法を用いて生成した河川空間モデルと河川定期横断面図とを重畳して比較することにより, 提案手法の有用性を評価する.

## 2.4.2 LPデータから河川空間モデルを生成する既存研究

LPデータから河川空間モデルを生成する作業には、第2.4.1項と同じく「膨大なデータ量による利用性の課題」と「河川堤防のブレイクライン抽出が困難な課題」があった。そこで、本研究では、「LPデータから抽出したブレイクラインを考慮した間引き手法の考案」により、本課題を解決する。

LPデータからブレイクラインを抽出する既往研究として、点群データから建物を判別して市街地モデルを作成する研究や、航空写真やLPデータから地形の起伏を再現して稜線を抽出する研究がある。前者の既往研究では、建物の屋根と地面との間にできる極端な標高差や、航空写真から画像処理で判別できる建物とその他との境界線などを用いて、人工物の特徴を再現した3次元モデルを生成している。後者の既往研究では、航空写真から山岳地形の陰影に基づいて広範囲な地形の傾きを推定して、地形の特徴を再現した3次元モデルを生成している。これらの既往研究は、都市空間や山岳地形などを対象とした3次元モデルの生成手法であり、河川堤防などの人工物と草木などの自然物とが混在する河川空間モデルの生成には不向きである。

そこで、本研究では、LPデータから河川堤防の天端面や小段などの平坦部の形状を抽出し、平坦部の外形線に沿って断面変化点を取得することで河川堤防のブレイクラインを抽出する手法を提案する。そして、提案手法を用いて生成した河川空間モデルと河川定期横断面図とを重畳して比較することにより、提案手法の有用性を評価する。

## 2.4.3 河川空間モデルを災害時に活用する既存研究

異なる時期に計測した点群データを比較することで、時系列の差分を検出することができる。LPデータは、全国の中小河川を対象に実施されている治水安全度評価プロジェクトなどの公共の取り組みによって公共測量が頻繁に行われており、新鮮な点群データが蓄積されている。航空レーザ測量は、災害時には道路の寸断などの理由から詳細な現地踏査が困難な場合があるため、被害状況の把握を目的とした航空測量が行われる。災害時に被害箇所候補を自動抽出する既存手法として、衛星画像や航空写真による変化域の抽出手法や、DEMデータやLPデータを用いた差分解析手法がある。衛星画像や航空写真による手法では、色情報の変化を用いるため、被害による形状変化の度合いを算出することが困難である。また、DEMデータはメッシュデータであるため、測量地点の形状的な特徴が失われており、災害対応に必要な構造物の詳細を加味して被害箇所候補を検出することは難しい。また、LPデータを単純に比較した場合は、土砂や瓦礫などのノイズが存在するため、災害時に河川堤防の変状把握が困難な課題がある。

そこで、本研究では、災害前後のLPデータから生成した河川空間モデルを重畳して、ブレイクラインの変化を検出することで形状的な変化を把握する手法を提案する。そして、東日本大震災で得られたLPデータを用いて実証実験を行い、提案手法の有用性を評価する。

## 第3章 MMSデータを用いた河川空間モデル生成技術の提案

### 3.1 研究の概要

MMS データから河川空間モデルを生成するためには、「膨大なデータ量による利用性の課題」と「河川堤防のブレイクライン抽出が困難な課題」の 2 つの課題を解決する必要がある。本研究では、「河川堤防のブレイクライン抽出が困難な課題」を解決するため、MMS データから河川堤防の天端面の形状を抽出し、天端面の外形線に従ってブレイクラインを抽出する技術を提案する。また、「膨大なデータ量による利用性の課題」を解決するため、ブレイクラインを考慮して点群データを間引く技術を提案する。そして、提案手法を用いて生成した河川空間モデルと河川定期横断図とを重畳して比較することにより、提案手法の有用性を評価する。

本章では、まず、第 3.2 節でブレイクラインを考慮した河川空間モデルの生成技術を提案する。次に、実証実験によって提案手法の有用性を評価し、提案手法に潜在する課題を見つけ出す。そして、第 3.3 節で河川堤防の特徴を考慮した河川空間モデルの生成技術を提案する。

### 3.2 ブレイクラインを考慮した河川空間モデル生成技術の提案

#### 3.2.1 処理の流れ

「MMS データを用いた河川空間モデル生成技術」では、MMS データのみを入力しブレイクラインを自動的に抽出できる事が理想である。しかし、点群データのみからブレイクラインを抽出する場合、「すべての点群の処理を行う必要があり処理時間が膨大になる」、「ブレイクラインを探索する方向が定まらないため適切にブレイクラインを検出できない」という問題が存在する。

このため、本技術では、ブレイクラインの探索範囲を限定するため、抽出箇所を指定する機能を提案する。また、ブレイクラインの抽出箇所を指定する際に、点群データのみから目視でブレイクラインの抽出箇所を特定することは多大な手間を必要とする。そ

のため、本技術では、背景図として DM データを背景図として読み込み、MMS データからブレイクラインを抽出する機能を提案する。本技術の処理の流れを図 3.1 に示す。

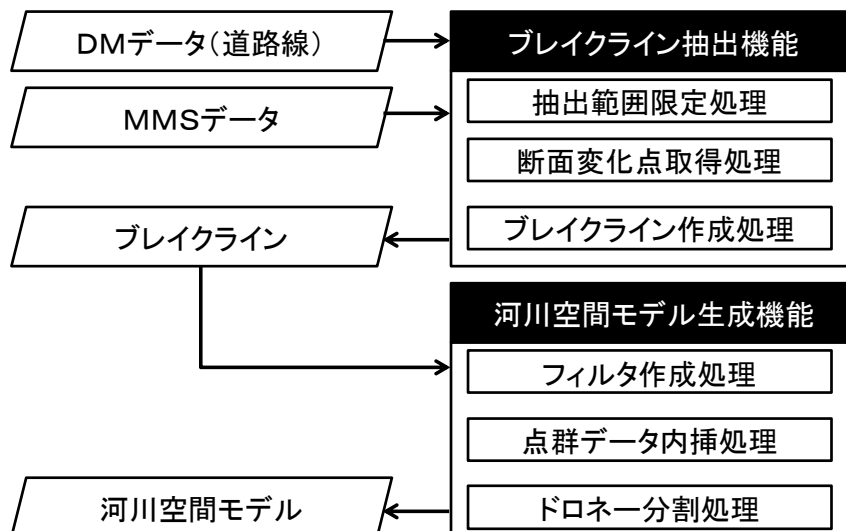


図 3.1 ブレイクラインを考慮した河川空間モデル生成技術の流れ

本技術は、図 3.1 に示すとおり、ブレイクライン抽出機能と河川空間モデル生成機能とで構成する。このふたつの機能を用いて出力した点群データは、MMS により計測された高い計測精度の点群データの特徴を活かした河川空間モデルを生成する手法を実現する。本研究で提案する各機能の処理手順を次に示す。

ブレイクライン抽出機能は、抽出範囲限定処理、断面変化点取得処理とブレイクライン作成処理の 3 つの処理で構成される。「抽出範囲限定処理」では、MMS によって取得した点群データと DM (Digital Mapping) データとを入力する。入力した DM データから抽出したブレイクライン候補線を参考にしてブレイクラインの誤抽出を抑制する。「断面変化点取得処理」では、各領域の点群データを 2 次元空間に圧縮し、断面線の折れ線近似を行う。そして、断面線の水平な線と斜線との交点を断面変化点として領域ごとに取得する。「ブレイクライン作成処理」では、断面変化点取得処理で取得した断面変化点をつないでブレイクラインを作成する。

河川空間モデル生成機能は、フィルタ作成処理と点群データ内挿処理の 2 つの処理で構成される。「フィルタ作成処理」では、ブレイクラインと格子状のフィルタを合わせたブレイクラインフィルタを用意する。次に、「点群データ内挿処理」では、ブレイクラインフィルタを用いて点群データの内挿処理を行う。この処理により、不規則な間隔で計測された点群データからブレイクラインを考慮した格子状の間引き点群データへ変換する。



### 3.2.2 ブレイクライン抽出機能

本機能は、指定されたブレイクライン候補線と点群データからブレイクラインを抽出する。各処理の詳細は、次に示すとおりである。

#### (1) 計算範囲取得処理

抽出範囲限定処理の流れを図 3.2 に示す。本処理では、まず、DM データから道路線を取得し、ブレイクライン候補線として取得する。道路線には、実装規約や各種基準類に基づき、道路線を示す折れ線要素（実装規約で規定の要素番号 2101 および 2106）を採用する。次に、ブレイクライン候補線の始点から距離  $s$  ごとに幅  $w$ 、高さ  $h$  の矩形領域を作成する。そして、作成した領域の範囲内から点群を抽出する。この処理から得た領域を  $RC = \{rc_1, rc_2, rc_3, \dots, rc_j\}$  とし、 $rc_j$  に含まれる点群データを  $P_j = \{pj_1, pj_2, pj_3, \dots, pj_k\}$  とする。

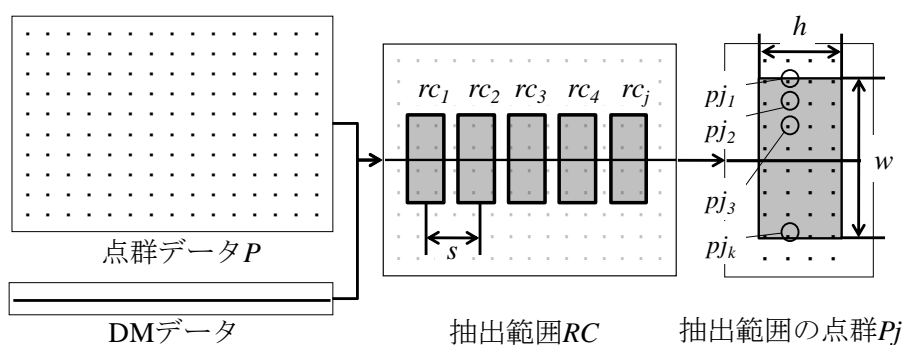


図 3.2 計算範囲抽出処理の流れ

#### (2) 断面変化点取得処理

断面変化点取得処理の流れを図 3.3 に示す。断面変化点取得処理では、抽出範囲限定処理によって取得した領域  $RC$  の各領域  $rc_j$  から断面線を作成するため、点群データ  $P_j$  を各点  $p_{jk}$  とブレイクライン候補線からの距離を利用して、縦軸を標高、横軸をブレイクライン候補線と各点との垂直距離として 2 次元空間に圧縮する。

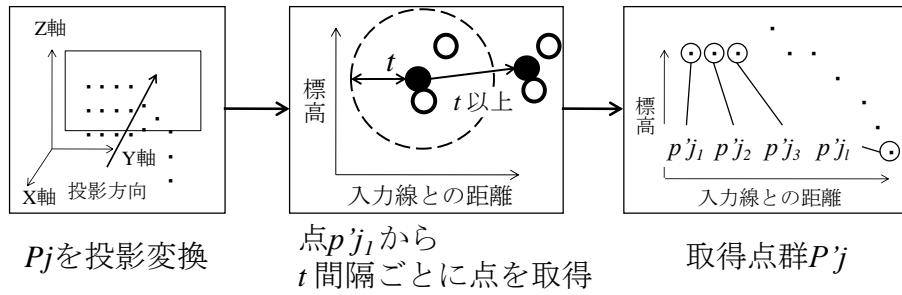


図 3.3 2次元空間への投影変換

次に、投影変換された  $P_j$  の中から横軸最小となる点を最初の候補点  $p'_{j_1}$  とし、 $t$  間隔ごとに候補点を取得する。この処理から得た候補点の集合を2次元点群データ  $P'_j = \{p'_{j_1}, p'_{j_2}, p'_{j_3}, \dots, p'_{j_i}\}$  とする。そして、2次元点群  $p'_{j_i}$  から断面線の近似化を行う。断面線の近似化では、図 3.4 に示すとおり、2次元点群  $p'_{j_i}$  と  $p'_{j_{i+1}}$  を結んで断面線を表す折れ線を作成する。

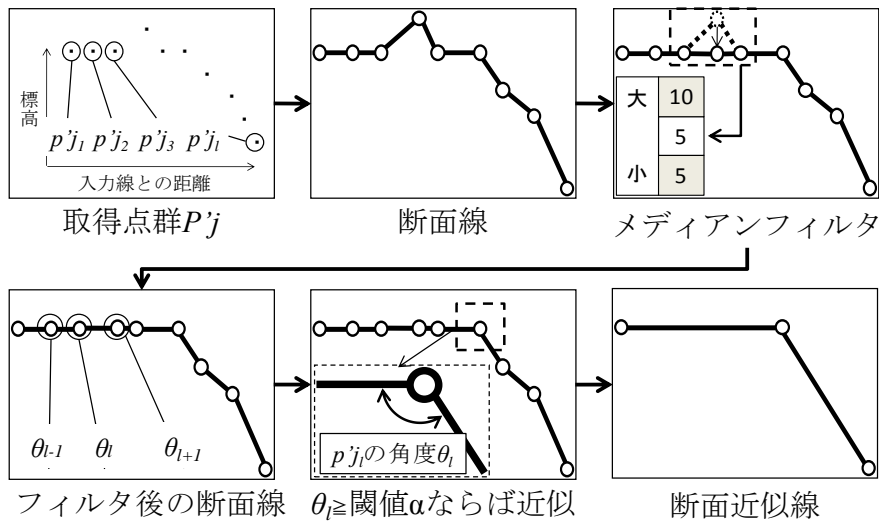


図 3.4 断面線近似

この時、 $p'_{j_i}$  から等距離に複数存在する場合は、標高が高い点を  $p'_{j_{i+1}}$  として採用する。次に、折れ線の縦軸の値をメディアンフィルタによって平滑化する。メディアンフィルタとは、注目する値  $p'_{j_i}$  および前後の値  $p'_{j_{i-1}}$ 、 $p'_{j_{i+1}}$  における値の中央値を有効な値として利用するノイズ除去手法である。そのため、メディアンフィルタによる平滑化は、相加平均による平滑化と異なり集合から突出した値をノイズとして除去した結果を取得できる。ここで、折れ線の頂点  $p'_{j_i}$  の角度  $\theta_i$  が閾値  $\alpha$  以上ならば、頂点  $p'_{j_i}$  を含む2線を直線近似する。最後に、近似された各線分の中から、断面変化点を取得する。断面変化点の取得では、図 3.5 に示すとおり、まず、近似された各断面線分の中から、水平からの角度が閾値  $\beta$  以内の断

面線分を水平線として抽出する。

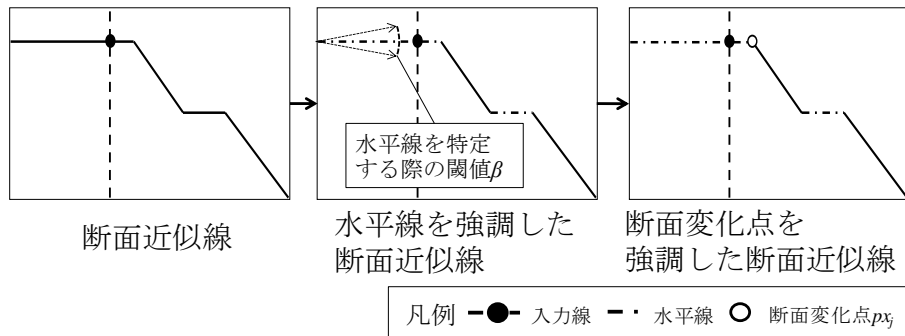


図 3.5 断面変化点の取得

次に、抽出された水平線の端点の中から、最もブレイクライン候補線と距離が近い点を断面変化点として取得する。そして、断面変化点取得処理を領域  $rc_j$  ごとに適用する。この処理から得た断面変化点の集合を  $P_x = \{px_1, px_2, px_3, \dots, px_j\}$  とする。

### (3) ブレイクライン作成処理

ブレイクライン作成処理の流れを図 3.6 に示す。本処理では、取得した断面変化点  $P_x$  からブレイクラインを作成する。具体的には、まず、断面変化点  $P_x$  の各点  $px_j$  を結んで折れ線を作成する。次に、各点  $px_j$  を取得した領域のブレイクライン候補線の始点からの距離を横軸、ブレイクライン候補線に対する各点の垂線の長さを縦軸としてメディアンフィルタによって平滑化する。この処理により、砂利や植生などのノイズによって誤抽出された断面変化点を除去できる。そして、平滑化された断面変化点の点列  $P_x$  を各頂点とするブレイクライン  $L$  を作成する。

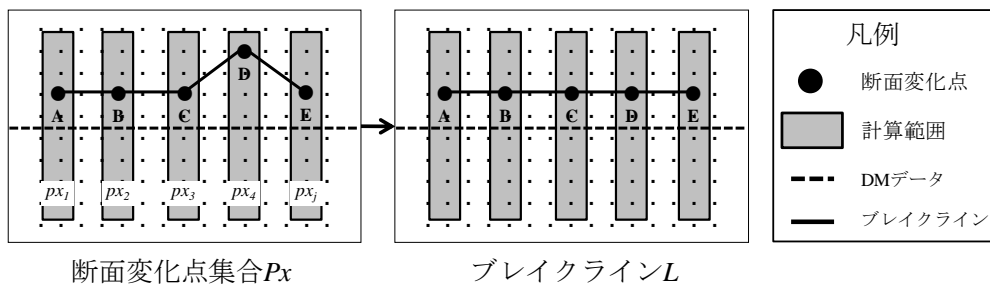


図 3.6 ブレイクライン作成処理の流れ

### 3.2.3 河川空間モデル生成機能

河川空間モデル生成機能では、レーザスキャナによって取得した点群データ  $P$  を間引く処理を行う。各処理の詳細は、次に示すとおりである。

#### (1) フィルタ作成処理

本処理の流れを図 3.7 に示す。本処理では、入力された点群データ  $p_i$  を包括する間隔  $g$  の格子状のフィルタを作成する。この処理で得た格子フィルタの各交点の集合を  $F=\{f_1, f_2, f_3, \dots, f_n\}$  とする。そして、格子フィルタの各交点の集合  $F$  とブレイクライン  $L$  を重ねあわせたブレイクラインフィルタ  $BF=\{bf_1, bf_2, bf_3, \dots, bf_o\}$  を次の式 (1) で算出する。

$$BF = F \cup L \quad (1)$$

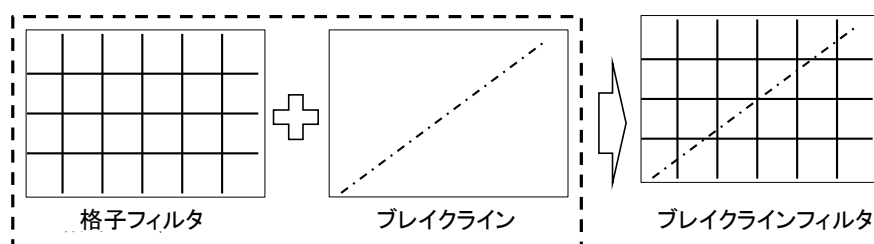
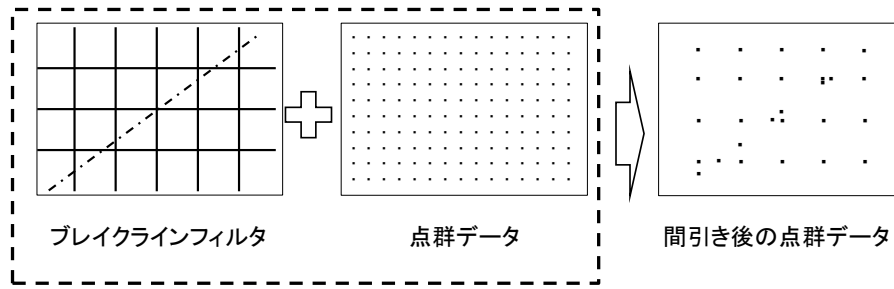


図 3.7 ブレイクラインフィルタ  $BF$

#### (2) 点群データ内挿処理

本処理の流れを図 3.8 に示す。本処理では、フィルタ作成処理によって得られたフィルタ  $BF$  に含まれる点  $bf_o$  からウインド法を用いて点群データ  $P_w=\{pw_1, pw_2, pw_3, \dots, pw_q\}$  を抽出する。ウインド法とは、フィルタの交点  $bf_o$  を中心とする一辺の長さ  $g$  の矩形領域に含まれる点群データ  $p_i$  を処理対象とする絞り込み手法である。

図 3.8 点群データ  $Pw$  の間引き

次に、点  $bf_o$  における標高の値を点群データ  $Pw$  から重みづけ平均による内挿処理で取得する。重み付け平均による内挿処理は、式 (2) と (3) にて算出する。まず、点  $bf_o$  に対する点群データ  $Pw$  の各点に対する重み付けパラメータ  $weight(Pw_q)$  を各点の  $x, y, z$  座標  $bfx_o, bfy_o, bfz_o, pwx_q, pwy_q, pwz_q$  を用いて次の式 (2) で算出する。次に、式 (3) にて  $bf_o$  の標高  $Z_{bf_o}$  を求める。

$$weight(Pw_q) = \frac{1}{\sqrt{(pwx_q - bfx_o)^2 + (pwy_q - bfy_o)^2}} \quad (2)$$

$$bfz_o = \frac{\sum weight(Pw_q) \cdot pwz_q}{\sum weight(Pw_q)} \quad (3)$$

ウインド法を用いた重み付け平均による内挿計算の概要を図 3.9 に示す。内挿計算とは、 $r$  個の 3 次元データ  $Pa = \{pa_1, pa_2, pa_3, \dots, pa_r\}$  がある時、任意の点  $pa_{r+1}$  の値を推定する計算手法である。本研究では、ウインド法によって対象となる点  $bf_o$  を中心に一辺  $g$  の矩形ウインドに含まれる  $Count(Pw)$  個のデータを対象として、重み付け平均によって  $bf_o$  の標高を求める。重み付け平均とは、一般的な相加平均と異なり各値の重みを考慮した平均の計算手法である。この時、各値に対する重みパラメータは任意の点  $bf_o$  から各点  $pw_q$  への水平距離とする。そして、各交点  $bf_o$  に標高を与えた 3 次元の点群データ以外を除去することで、格子状に整理された間引き点群データへ変換する。

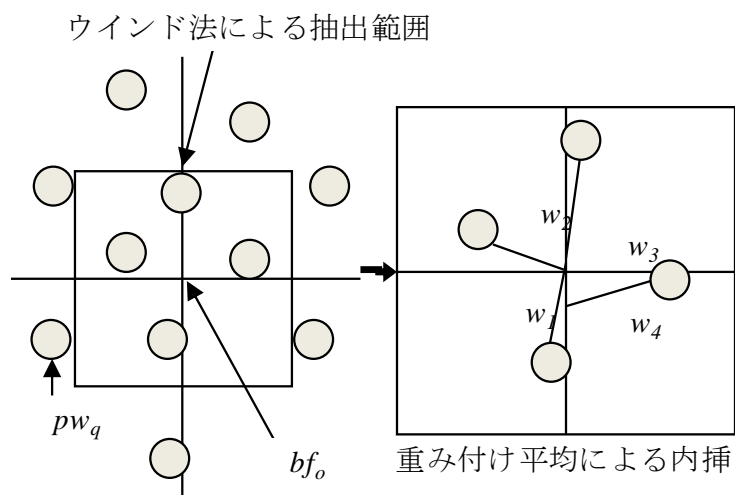


図 3.9 ウインド法による重み付け平均の内挿計算

### 3.2.4 実証実験

ブレイクラインを考慮した河川空間モデル生成技術（以下，第 3.2.4 項では「本手法」という）の有用性と，砂利やノイズによる影響を明らかにするため，実証実験を実施した．実験では，単純な形状を表現した人工データと，実際の河川堤防を対象に計測した点群データとを用いた．

#### (1) 実験環境

本実験で用いた機器の仕様を表 3.1 に示す．本実験では，格子フィルタを用いて間引いた点群データから河川空間モデルを生成する手法（従来手法）と，提案手法を用いて河川空間モデルを生成する．

表 3.1 実験環境

項目	値
CPU	Inter® Core™2 Duo CPU 2.50Ghz
メモリ	4.0GB
開発環境	VisualStudio2005
開発言語	Visual C++

## (2) 実験データ

本研究では、実験データとして、生成される河川空間モデルの現況地形に対する再現精度を評価するために、人工的に作成したデータと MMS データを用意した。人工データは、理想的な堤防形状（図 3.10）を入力し、それぞれの面から計測間隔 50mm，計測誤差 10mm を想定した点群を生成した。また，MMS データは，図 3.11 の楕円で囲まれている堤防沿いの経路を走行して計測した結果を用いた。各点群データの詳細を表 3.2 に示す。

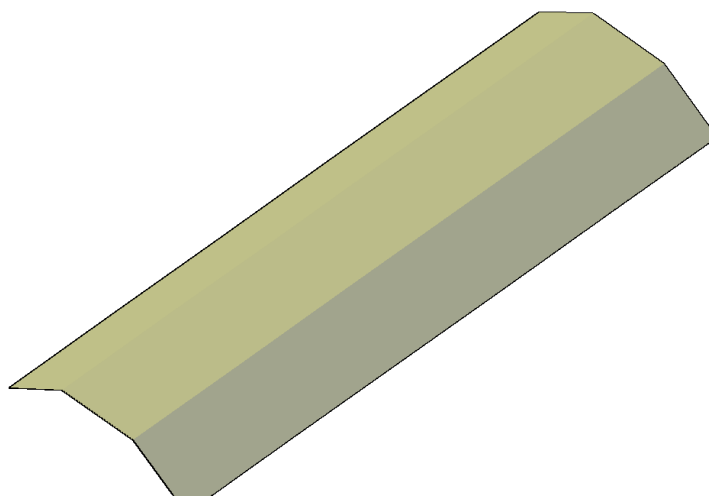


図 3.10 理想的な堤防形状

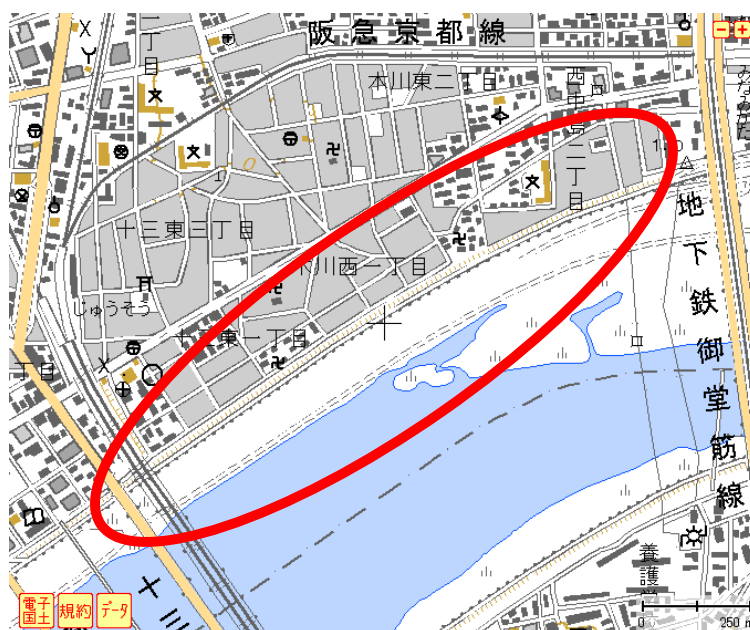


図 3.11 計測位置（大阪府淀川堤防）

【出典】国土地理院：地理院地図

表 3.2 実験データの詳細

項目	人工データ	MMS データ
点数	約 150 万点	約 30 万点
計測距離	45m	90m
計測誤差	0.01m	0.01m
計測時期	—	2009 年

### (3) 実験条件

本項では、提案手法で用いる 7 つのパラメータ  $s$ ,  $w$ ,  $h$ ,  $t$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $g$  を実験条件として設定する。このうち、パラメータ  $s$  および  $h$  の値は、予備実験の結果から経験的に値を設定した。予備実験では、実験とは異なる堤防形状に基づき作成した人工データを用いた。各パラメータの説明と予備実験より得られた結果を次に示す。

#### a) パラメータ $s$ の設定

パラメータ  $s$  は、「抽出範囲限定処理」にて、断面変化点の抽出間隔を設定する値である。予備実験では、パラメータ  $s$  の最適な値を決定するために 0.1m から 2.0m まで、0.1m 間隔



で河川空間モデルを生成した。生成されたそれらのモデルと人工点群データの生成に用いた堤防形状との差異を比較した。その結果、 $s$  の値が  $0.5\text{m}$  の場合が最も正確に堤防形状を再現していたことから、本実験では  $s = 0.5(\text{m})$  を採用した。

#### b) パラメータ $w$ , $h$ の設定

パラメータ  $w$ ,  $h$  は、「抽出範囲限定処理」にて、断面変化点の抽出範囲を設定する値である。パラメータ  $w$  は、抽出範囲  $rc$  の縦幅を設定する値であり、抽出範囲内に断面変化点を含む必要がある。そのため、本実験では十分に大きな値として  $3\text{m}$  を採用した。パラメータ  $h$  は、抽出範囲  $rc$  の横幅を設定する値である。予備実験では、パラメータ  $h$  の最適な値を決定するために  $0.1\text{m}$  から  $10.0\text{m}$  まで、 $0.1\text{m}$  間隔で断面変化点を取得した。取得したそれらの断面変化点と手作業によって取得した断面変化点との差異を比較した。その結果、 $h$  の値が  $1.0\text{m}$  の場合に取得した断面変化点と正解データとの差異が最小となったため、本実験では  $h = 1.0(\text{m})$  を採用した。

#### c) パラメータ $t$ の設定

パラメータ  $t$  は、「断面変化点取得処理」にて、点群  $P_j$  から断面線の候補点を取得する間隔を設定する値である。点群  $P_j$  は投影変換によって密度が高まるために線形化を行うと急な傾きが頻出し、本来ノイズでない値がノイズとして検出される可能性がある。そのため、 $t$  間隔ごとに候補点を取得することで、急な傾きによるノイズの頻出を除去する。本実験では、 $t$  の値に投影変換前の点群データから、天端面における点同士の平均間隔である  $0.05\text{m}$  を採用した。

#### d) パラメータ $g$ の設定

パラメータ  $g$  は「フィルタ作成処理」にて、格子フィルタの間隔を設定する値である。パラメータ  $g$  に小さい値を設定すると生成される河川空間モデルの再現度が向上するが、出力されるデータ量も増加する。本実験では、同様の格子フィルタを用いて地形を 3 次元モデル化した既存研究<sup>24)</sup>を参考に  $g = 5(\text{m})$  を採用した。

#### e) パラメータ $\alpha$ , $\beta$ の設定

パラメータ  $\alpha$ ,  $\beta$  は「断面変化点取得処理」にて、道路の傾きを特定する際に利用する閾値である。そのため、本実験では道路構造令 24 条の横断勾配の最大値である  $5\%$  ( $2.9$  度) を採用した。

### (4) 実験内容

本実験では、まず、本研究で提案した手法を用いて河川空間モデルを生成する。次に、従来手法によるブレイクラインを考慮しない間引き点群データを用いて生成した河川空間

モデルと提案手法の結果とを比較して考察し、有用性・有効性を評価する。評価では、生成した河川空間モデルが正しく元の形状を再現しているのかを確認する。また、実験には、人工データおよび実測による点群データを用い、それぞれを評価する。

### 3.2.5 実験結果と考察

#### (1) 人工データを用いた河川空間モデルの生成実験

##### a) 河川空間モデルの可視化による評価

人工データから各手法を用いて生成した点群データより河川空間モデルを生成した結果を図 3.12, 図 3.13 に示す。各図を比較すると、提案手法の方が元の形状に従って、正確に形状を再現できていることが分かる。各手法の断面変化部分を拡大した結果を確認すると、提案手法は、ブレイクラインを正確に表現できており、従来手法の問題点を解消できていることが分かる。

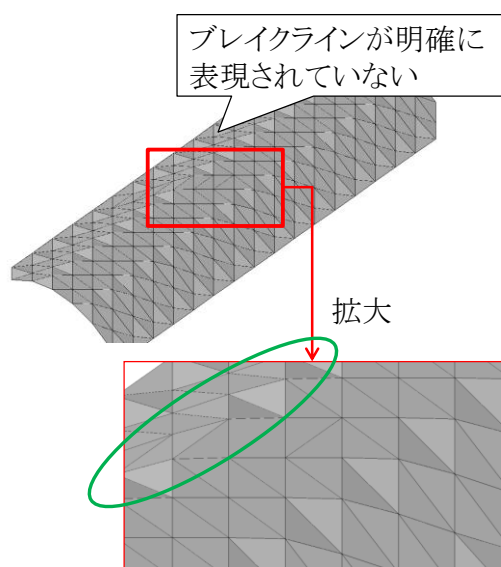


図 3.12 人工データから生成した従来手法の河川空間モデル

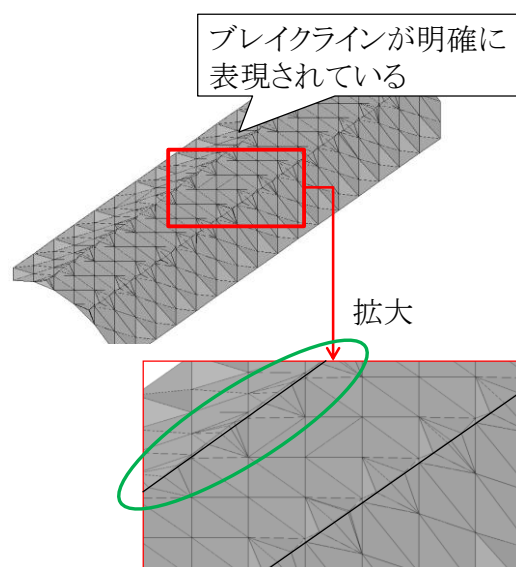


図 3.13 人工データから生成した提案手法の河川空間モデル

##### b) ブレイクラインの作成結果と考察

本実験では、断面変化点の再現精度を評価するため、ブレイクラインの正解データを元データから手作業で作成した。その正解データを 10cm 間隔で分割した点からモデルへの最短距離を算出し、その距離に基づき集計した結果を比較した。比較結果を図 3.14, 図 3.15 に示す。

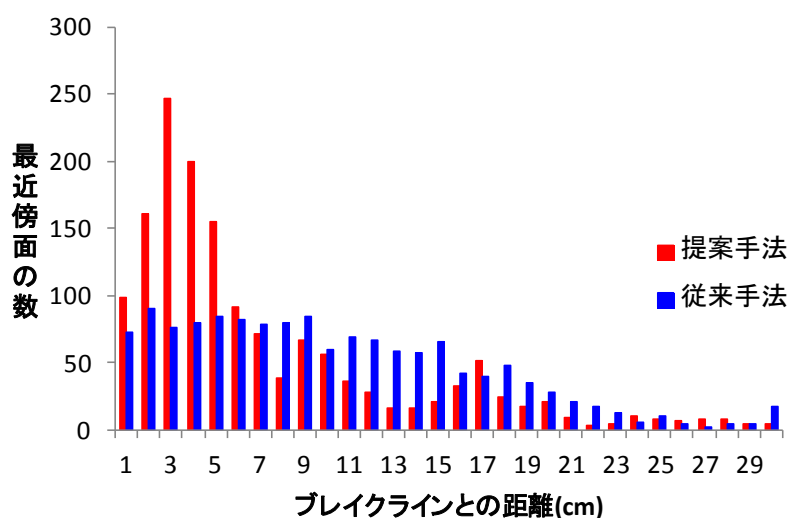


図 3.14 断面変化における近傍面の集計結果

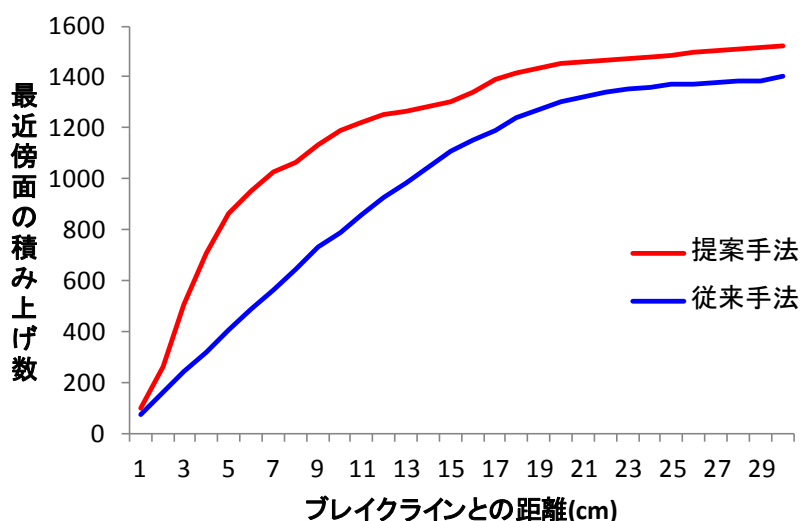


図 3.15 集計結果の積み上げグラフ

図 3.14 は、縦軸を最近傍面の数、横軸を最近傍面とブレイクラインとの距離を表現したグラフである。図 3.15 は縦軸を最近傍面の積み上げ数として集計結果を表現したグラフである。この結果、ブレイクラインを高い再現精度で作成できたことが確認できた。図 3.14 から、従来手法では、正解データから河川空間モデルを構成する点までの距離が 15cm 以上離れた箇所に存在するのに対して、提案手法では、1cm 以内の距離から取得できていることが分かる。また、図 3.15 を確認すると、提案手法では、全体の約 98% が 10cm で収束していることが分かる。それに対して、従来手法では、15cm から一定の増加率で積み上げ数が

増加している。これらの結果から、提案手法で生成した河川空間モデルは、従来手法で生成したモデルと比較して、元の形状を正確に再現できていることが分かる。

## (2) MMS データを用いた河川空間モデル生成実験

### a) 河川空間モデルの可視化による評価

MMS によって実測した点群データを用いて河川空間モデルを生成した結果を図 3.16, 図 3.17 に示す。各図を比較すると、従来手法と比べて、提案手法では容易に天端面を確認できる。各手法の断面変化部分を拡大した結果を確認すると、提案手法は、ブレイクラインを正確に表現できており、従来手法の問題点を解消できていることが分かる。

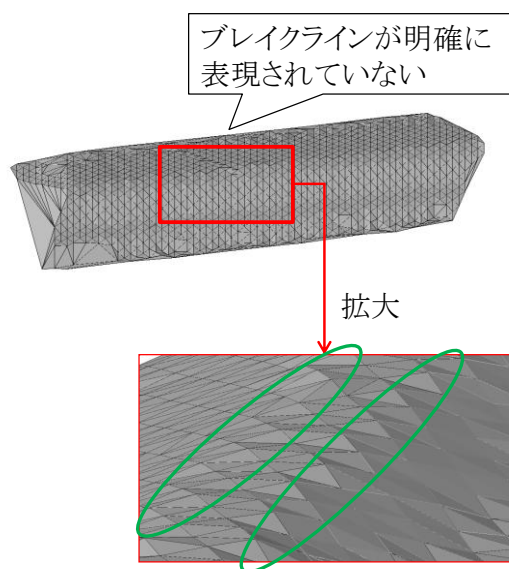


図 3.16 MMS データから生成した河川空間モデル (従来手法)

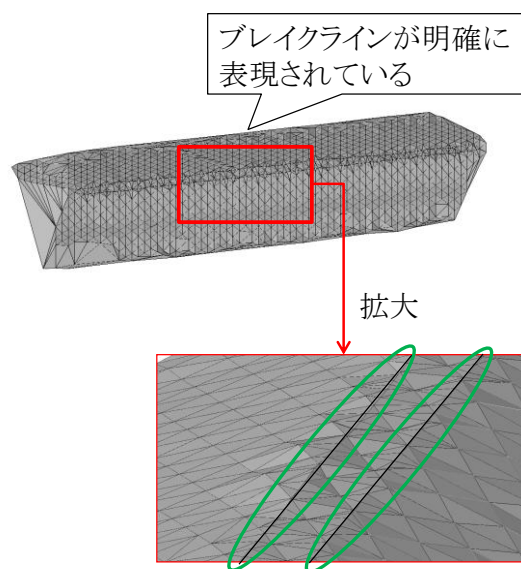


図 3.17 MMS データから生成した河川空間モデル (提案手法)

### b) ブレイクライン抽出の結果と考察

人工データの実験と同様にブレイクラインの構成点と最近傍面までの距離を集計した。この時、正解データには DM データの道路線で堤防形状の法肩に最も近い位置にあるものを利用した。比較結果を次の図 3.18, 図 3.19 に示す。

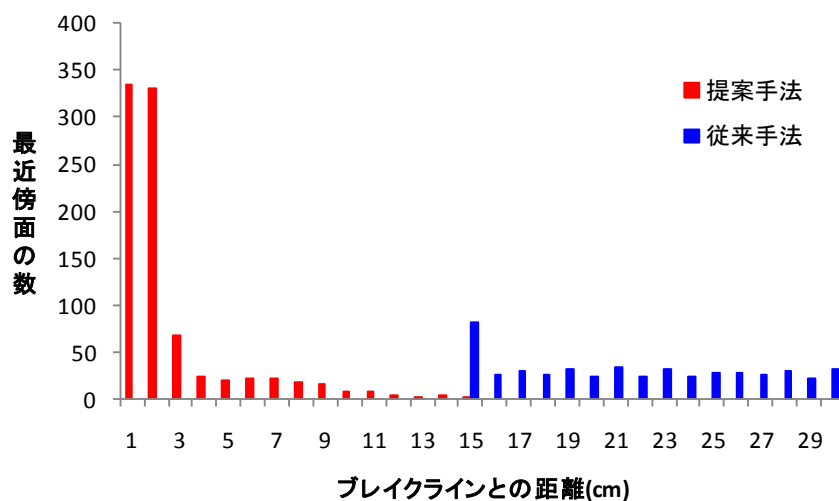


図 3.18 断面変化における近傍面の集計結果

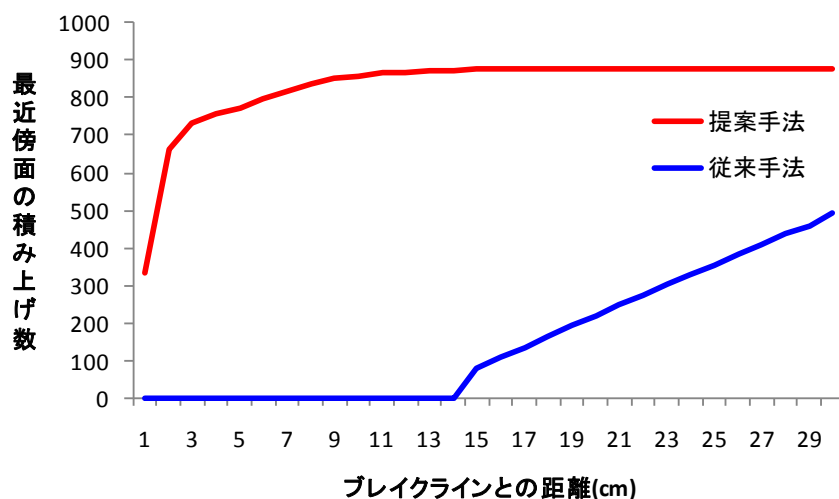


図 3.19 集計結果の積み上げグラフ

図 3.18, 図 3.19 からは次の 2 点の知見を得た。1 点目は、本提案手法によって高い再現精度でブレイクラインが作成可能であることが確認できた。提案手法では、約 70% の点群データが 7cm 以内に収まっているのに対し、従来手法では約 40% に留まっている。また、従来手法にて 70% に達するのは約 15cm の段階である。これらの結果から、MMS の点群データを対象とした場合でも提案手法の方が優れていることが分かった。2 点目は、情報化施工の出来形管理にも利用できることが確認できた。国土交通省の定める道路土工の出来形管理基準および規格値を表 3.3 に示す。出来形管理基準で定められた測定間隔は 40m であ

るため、90m の施工延長に対して計測点数は約 2 点である。この 2 点を一回の出来形計測で取得すると仮定すると、点群データの計測誤差を考慮しない場合、本提案手法による一回の計測で取得できる計測点は、現況地形の形状が 1cm 以内の再現精度の場合は図 3.19 から分かるように約 100 点(約 50 倍)、2cm の再現精度の場合は約 250 点(約 125 倍)である。従来の出来形計測の労力と、本提案手法による労力とを比較した作業負荷の効果を検証する課題は残るが、これらの結果から、本提案手法を利用することで、出来形管理の品質向上に寄与できると考えられる。

表 3.3 道路土工の出来形管理基準および規格値

工種	測定項目	規格値(mm)
盛土工	幅	100
	法長 5m 以上	法長の 2%
	法長 5m 未満	100
切土工 (掘削工)	幅	100
	法長 5m 以上	法長の 4%
	法長 5m 未満	200

c) 領域ごとによる評価

本項では、図 3.18、図 3.19 が示す提案手法の結果が 10cm 以内の段階に含まれなかった約 20%の結果の原因を考察する。図 3.18 は、提案手法による結果として次の表 3.4 の3つの領域に分けることができる。表 3.4 に示す各領域は、図 3.20 の河川空間モデルの各箇所と対応している。また、色情報付きの点群データを図 3.21 に可視化した。

表 3.4 各領域の範囲

領域	範囲	点数	割合
A	1cm から 7cm	1,025	67.4%
B	8cm から 13cm	242	15.9%
C	14cm から 21cm	194	12.8%

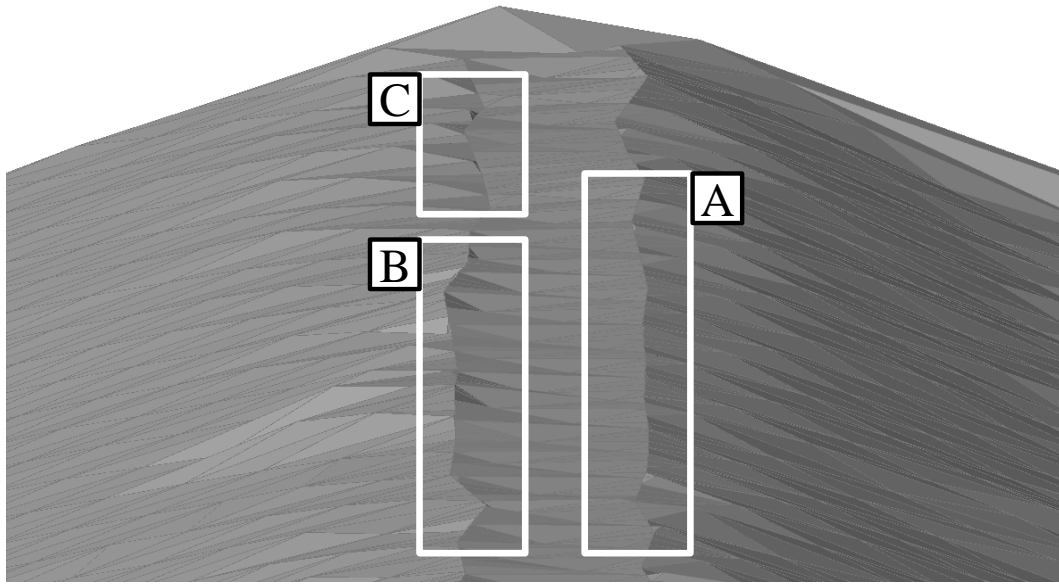


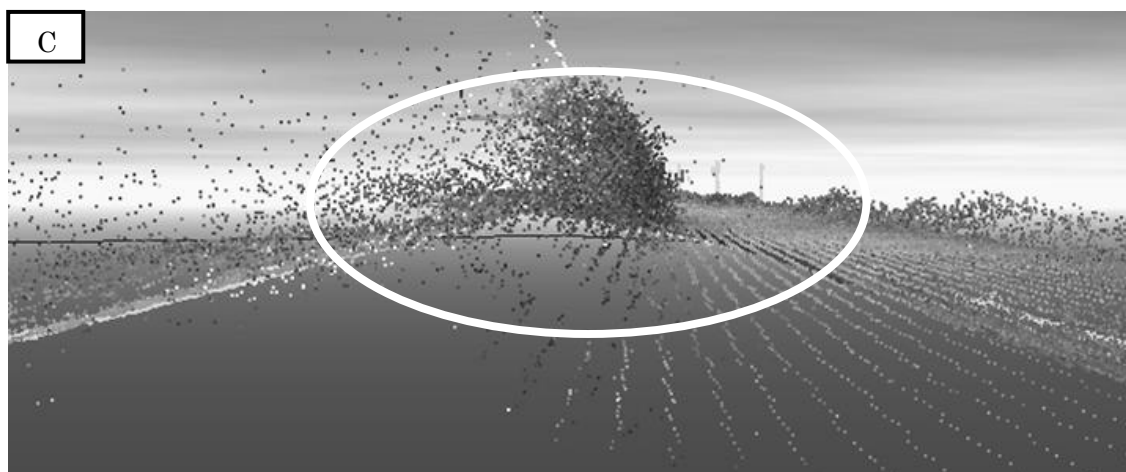
図 3.20 道路面部分の拡大図



A 領域の横断方向からの可視化例



B 領域の横断方向からの可視化例



C 領域の横断方向からの可視化例

図 3.21 横断方向からの可視化例



図 3.20 および図 3.21 の結果から、次に示す各領域の内容を確認できた。

図 3.20 の A 領域では、ブレイクラインが正しく直線として抽出されていることが分かる。図 3.21 の「A 領域の横断方向からの可視化例」を確認すると、A 領域では、植生のノイズが少なく斜面がなだらかであり、断面変化点を正しく認識できていることが分かる。

図 3.20 の B 領域では、ブレイクラインの抽出で吸収しきれなかったノイズが折れ線としてブレイクラインに影響していることが分かる。図 3.21 の「B 領域の横断方向からの可視化例」を確認すると、B 領域では、A 領域に比べて断面変化点上に植生のノイズが山なりに集中しており、断面変化点を正しく認識する上で障害となっていることが分かる。

図 3.20 の C 領域では、ブレイクラインは A 領域と同様に直線として抽出されているが、ブレイクライン間の距離が A 領域と比べて狭まっていることが分かる。図 3.21 の「C 領域の横断方向からの可視化例」を確認すると、C 領域では植生による強いノイズが路面から斜面にかけて壁のように連なっており、点群から断面変化点の認識が困難であることが分かる。これらの結果から、提案手法は図 3.21 の B 領域のノイズの強さまでならばある程度植生によるノイズの影響を抑えることができるといえる。しかし、C 領域では、植生によるノイズが壁のように路面と斜面とを隔てており、ノイズとして影響を抑えきれずに路面と壁の断面変化点としてブレイクラインが誤抽出されている。

この問題に対して、あらかじめ堤防形状の特徴を利用して天端面以上の標高を持つ点群をノイズとして除去することでブレイクラインを正しく抽出する対策手法が考えられる。

### 3.3 河川堤防の特徴を考慮したブレイクラインの自動抽出技術の提案

#### 3.3.1 植生による壁状ノイズへの対策

本手法では、河川堤防の形状と計測ノイズの特徴に基づき、壁状ノイズを自動的に除去して曖昧な地表面を推定する。本手法の基礎となる計測ノイズの特徴の調査結果および解決策を次に示す。

##### (1) 調査内容

本調査では、まず淀川の河川堤防を現地踏査し、天端面、法面の植生や人工物などのノイズ候補を確認した。次に、確認結果と MMS データを照らし合わせて計測ノイズの特徴を分析した。そして、図 3.22 の楕円で示す計測範囲の点群データを抽出した。最後に、走行方向と垂直な横断面を 50m 間隔で指定し、各横断面の前後 25m の範囲に存在する点群データの投影により横断図を作成し、ノイズを整理した。

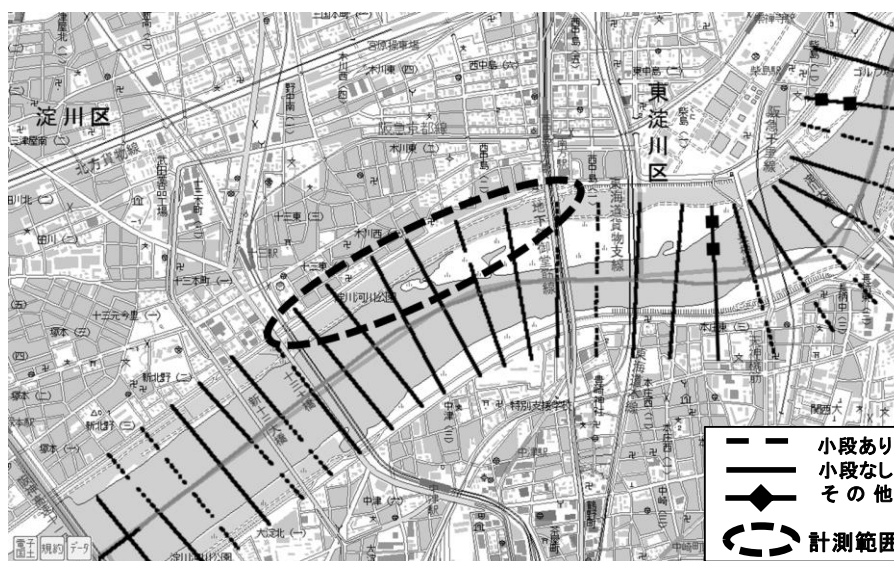


図 3.22 MMS での計測範囲

【出典】国土地理院：地理院地図

## (2) 調査結果

調査で作成した横断図 (29 断面) に含まれるノイズを整理した結果を表 3.5, 各計測ノイズの例を図 3.23 および図 3.24 に示す。植生ノイズの多くは、天端面と法肩に存在している。天端面の植生ノイズは約 9 割 (29 断面中 26 断面), 法肩の植生ノイズは約 7 割 (29 断面中 19 断面) 存在し、天端面と法面の境界や地表面が曖昧な箇所が多く存在することがわかった。一方、人工物ノイズの多くは、天端面と法面に集中している。天端面の人工物ノイズには、通行人や通行車両が見られた。また、法面の人工物ノイズには、手すり、電柱や電線などが見られた。人工物ノイズは、法肩に存在することが少なく、天端面と法面の境界が曖昧になるケースは見られなかった。これらの調査結果から、天端面と法肩に存在する植生ノイズと、天端面に存在する人工物ノイズとを除去する手法を考案することで、曖昧な境界線や地表面を明らかにできることがわかった。

表 3.5 ノイズの整理結果 (29 断面)

種類	天端面	法肩	法面
植生	26	19	1
人工物	11	1	8

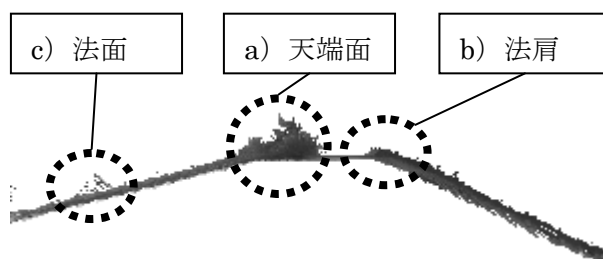


図 3.23 ノイズによる横断面の類型化 (植生によるノイズ)

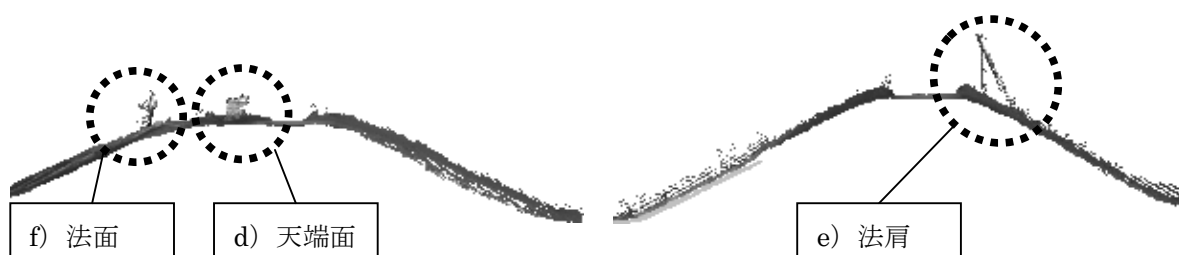


図 3.24 ノイズによる横断面の類型化 (人工物によるノイズ)

### (3) 解決手法

MMS データから植生ノイズを除去する既存手法としては、路面周辺に存在する柱状構造物の大きさや高さなどの形状的特徴との類似点から地表面とその他を判別する手法[78]や、路面と異なる色情報から植生を判別する手法がある。しかし、河川堤防の植生は計測時期によって色の特徴が異なり、路面との区別が困難な場合がある。そこで、本研究では、河川堤防の形状の調査（第 2 章）と計測ノイズの特徴の調査（第 3 章）の結果を踏まえ、天端面の上部に存在する点群をノイズとして除去する手法を提案する。本手法は、天端面の特定処理、計測ノイズの除去処理および地表面の推定処理の 3 つの処理を行う。

天端面の特定処理では、河川堤防の凸型形状の特徴を考慮したアルゴリズムを考案する。具体的には、まず、天端面の特徴を考える。図 3.25 に示すように、凸型形状の点群データを一定間隔の水平断面で分割すると、天端面を含む水平断面で点群データが高密度に集中する特徴がある。そのため、本処理では、各水平断面の密度を比較して点群データが高密度に集中している水平断面を天端面と判断して特定する。天端面上部の計測ノイズの除去処理では、壁状ノイズが天端面上部に集中していることから、天端面上部に存在する点群データを除去する。地表面の推定処理では、図 3.26 に示すとおり周辺の点群データから内挿点の位置を計算する。本手法では、これら 3 つの処理を組み合わせ、曖昧な堤防形状の境界線を推定する。

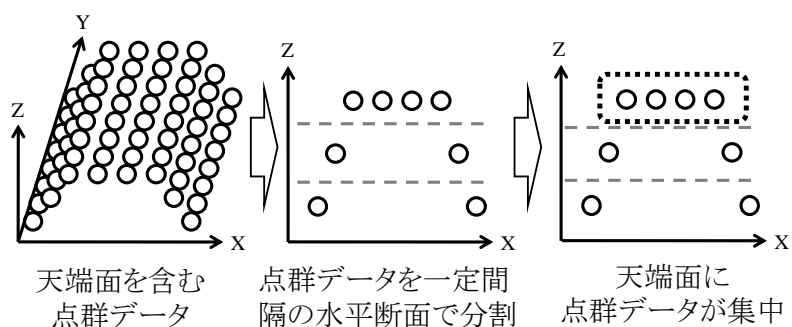


図 3.25 天端面の特定処理の概要

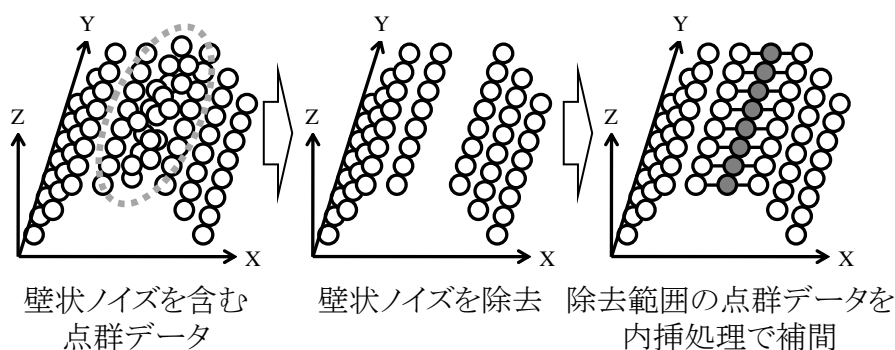


図 3.26 地表面の推定処理の概要

### 3.3.2 ブレイクラインを考慮した河川空間モデル生成技術との関係

本節で提案する処理の流れを図 3.27 に示す。本節では、第 3.2 節で提案した技術に対して、天端面特定機能と壁状ノイズ除去処理とを追加する。天端面特定機能では、既存研究で DM データからブレイクライン候補線を取得していたのに対して、点群データから天端面を特定し、天端面の外形線をブレイクラインとして取得する。具体的には、まず、点群データから堤防形状の特徴を利用して天端面の点群データを推定する。次に、堤防形状の天端面の点群データの外形線を取得する。以後、この点群データの外形線を領域外形線とする。そして、取得した領域外形線をブレイクライン候補線として利用する。壁状ノイズ除去処理では、天端面上に存在する点群データをノイズとして除去する。具体的には、まず、点群データから堤防形状の断面モデルを生成する。次に、堤防形状の断面モデルから、天端面を特定し、その天端面より上方にある点群データをノイズとして除去する。そして、壁状ノイズを除去した範囲に地表面を表現する点群データを内挿処理により補間する。これらの処理を経て、ブレイクラインの誤抽出の課題を解消する。

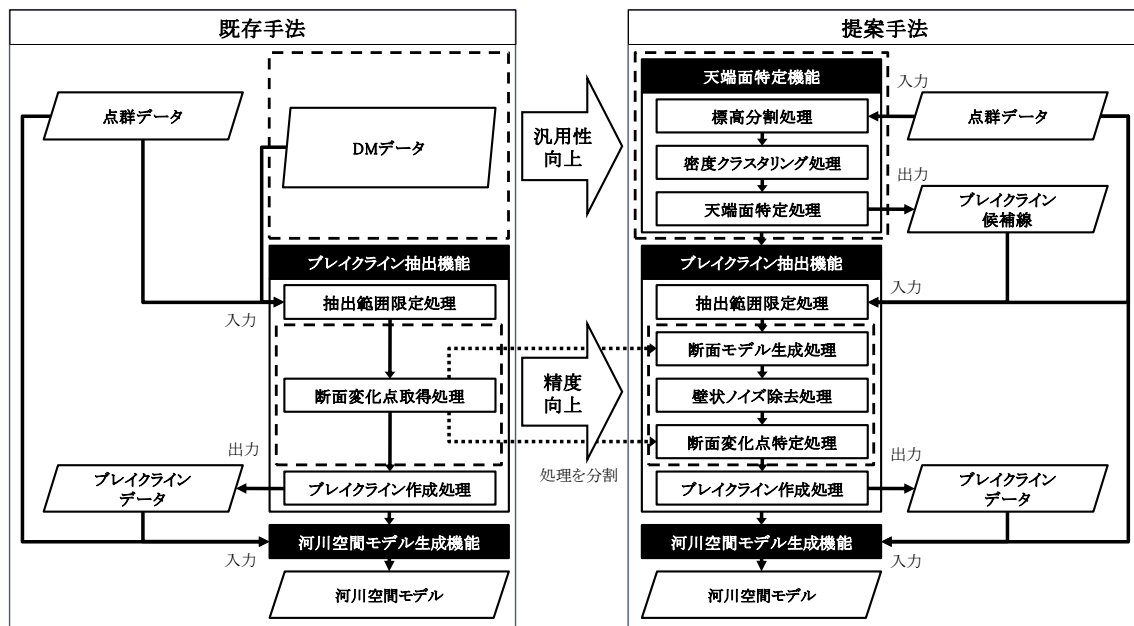


図 3.27 第 3.2 節の手法を拡張した提案手法の流れ

### 3.3.3 処理の流れ

提案手法（図 3.27）は、天端面特定機能、ブレイクライン抽出機能と河川空間モデル生成機能で構成される。各機能の処理手順を次に示す。

天端面特定機能は、標高分割処理、密度クラスタリング処理と天端面特定処理の 3 つの処理で構成される。標高分割処理では、点群データを入力し、標高の値を用いて複数のレイヤに分割する。密度クラスタリング処理では、まず、分割された各レイヤに含まれる点群データを点間の相対距離に基づきクラスタリングする。次に、各クラスタの領域外形線を取得し、その面積を算出する。以後、この領域外形線で囲まれた範囲の面積をクラスタの領域面積とする。天端面特定処理では、まず、各レイヤのクラスタ集合の中から、クラスタの領域面積が閾値以下の微小クラスタを除去する。次に、各レイヤに含まれる点群データの領域外形線を取得し、その領域面積を算出する。以後、この領域外形線で囲まれた範囲の面積をレイヤの領域面積とする。そして、各レイヤの領域面積とそのレイヤに含まれるクラスタの領域面積の総和との割合を算出し、クラスタの領域面積の総和が占める割合が最も高いレイヤを天端面と推定する。最後に、天端面に含まれる点群データの領域外形線をブレイクライン候補線として取得する。

ブレイクライン抽出機能は、抽出範囲限定処理、断面モデル生成処理、壁状ノイズ除去処理、断面変化点特定処理とブレイクライン作成処理の 5 つの処理で構成される。抽出範囲限定処理では、点群データとブレイクライン候補線取得機能によって取得したブレイクライン候補線とを入力して、断面変化点の抽出範囲を限定する。断面モデル生成処理では、限定された各抽出範囲に含まれる点群データを Y-Z の 2 次元空間に圧縮し、断面線の折れ

線近似を断面モデルとして取得する。壁状ノイズ除去処理では、まず、断面モデルの天端面を示す線分を特定する。次に、天端面を示す線分よりも高い標高を持つ点群データを除去し、ノイズの影響を除去した断面モデルを取得する。断面変化点特定処理では、壁状ノイズを除去した断面モデルから天端面を示す線分と法面を示す線分とを抽出し、それらの交点を断面変化点として取得する。ブレイクライン作成処理では、断面変化点特定処理で取得した断面変化点を繋いでブレイクラインを作成する。

### 3.3.4 天端面特定機能

天端面特定機能は、点群データからブレイクライン候補線を生成する。ここで、レーザスキャナで計測した現況地形の点群データを  $P=\{p_1, p_2, p_3, \dots, p_i\}$  とする。本機能により、DM データに依存することなく点群データから天端面を特定し、ブレイクライン候補線を取得する。

#### (1) 標高分割処理

本処理では、点群データの中から天端面の領域を判別する前処理として、点群データを複数のレイヤに分割する。具体的には、図 3.28 に示すとおり、点群データ  $P$  を高さ  $h$  ごとに一定間隔で分割する。この処理から得たレイヤ集合を  $L=\{l_1, l_2, l_3, \dots, l_j\}$  とする。

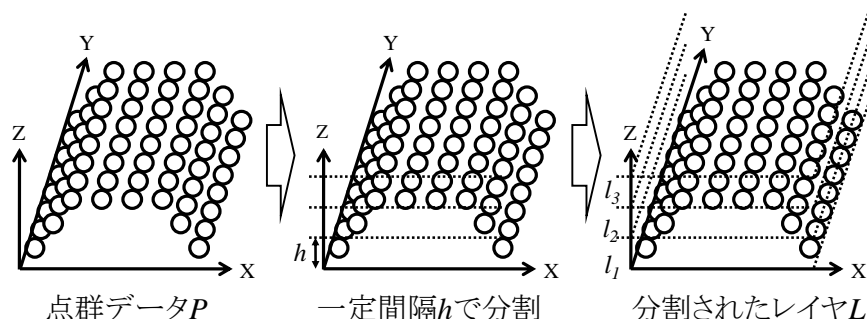


図 3.28 標高分割処理の概要

#### (2) 密度クラスタリング処理

本処理では、点群データが集中しているレイヤを判別するため、レイヤに対する点の密度によるクラスタリングを行い、各クラスタの領域面積を算出する。MMS にて河川堤防を計測した点群データの特徴には、計測車両近くの天端面の点群データの密度は高く、計測車両から離れた法面や法尻などの点群データの密度は低くなる傾向が見られる。そのため、本処理では、密度に基づくクラスタリング手法として、データマイニングの一手法である DBSCAN 法[79]を用いた。DBSCAN 法によるクラスタリングの概要を図 3.29 に示す。

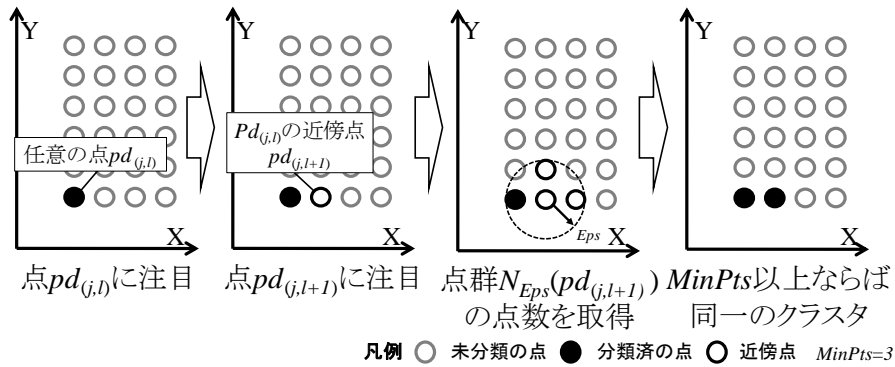


図 3.29 DBSCAN 法によるクラスタリング

DBSCAN 法とは、距離の閾値  $Eps$  と対象数の閾値  $MinPts$  の 2 つの値を用いた点の密度に基づくクラスタリング手法である。密度クラスタリング処理の方法を図 3.30 に示す。まず、任意のレイヤ  $l_j$  に含まれる点群データ  $P_{dbscan}=\{pd_{(j,1)}, pd_{(j,2)}, pd_{(j,3)}, \dots, pd_{(j,l)}\}$  を DBSCAN 法にてクラスタリングする。点群データ  $P_{dbscan}$  中の任意の点  $pd_{(j,l)}$  とその点から距離  $Eps$  内の近傍点群  $N_{Eps}(pd_{(j,l)})$  に含まれる近傍点  $pd_{(j,l+1)}$  が次の条件式 (1) と (2) を満たす場合、近傍点  $pd_{(j,l+1)}$  を点  $pd_{(j,l)}$  と同一のクラスタとして分類する。

$$pd_{(j,l)} \in N_{Eps}(pd_{(j,l+1)}) \quad (1)$$

$$\left| N_{Eps}(pd_{(j,l+1)}) \right| \geq MinPts \quad (2)$$

任意のレイヤ  $l_j$  から DBSCAN 法によりクラスタリングした結果を  $Cl_j=\{cl_{(j,1)}, cl_{(j,2)}, cl_{(j,3)}, \dots, cl_{(j,k)}\}$  とする。そして、クラスタ集合  $Cl_j$  の各クラスタ  $cl_{(j,k)}$  の領域外形線を動的輪郭法<sup>26)</sup>によって取得する。また、動的輪郭法の対象となる点群データを  $P_{snake}=\{ps_{(j,1)}, ps_{(j,2)}, ps_{(j,3)}, \dots, ps_{(j,m)}\}$  とする。

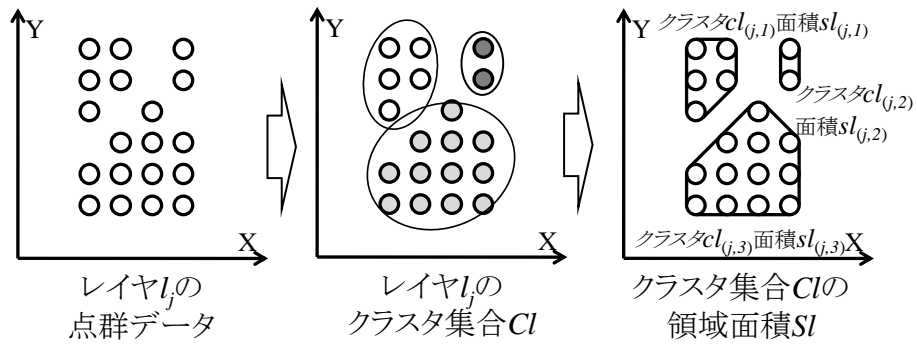


図 3.30 密度クラスタリング処理の概要

本研究で利用する動的輪郭法の概要を図 3.31 に示す。動的輪郭法とは、対象を内包する閉曲線が移動と変形を繰り返して対象の輪郭を捉える手法である。

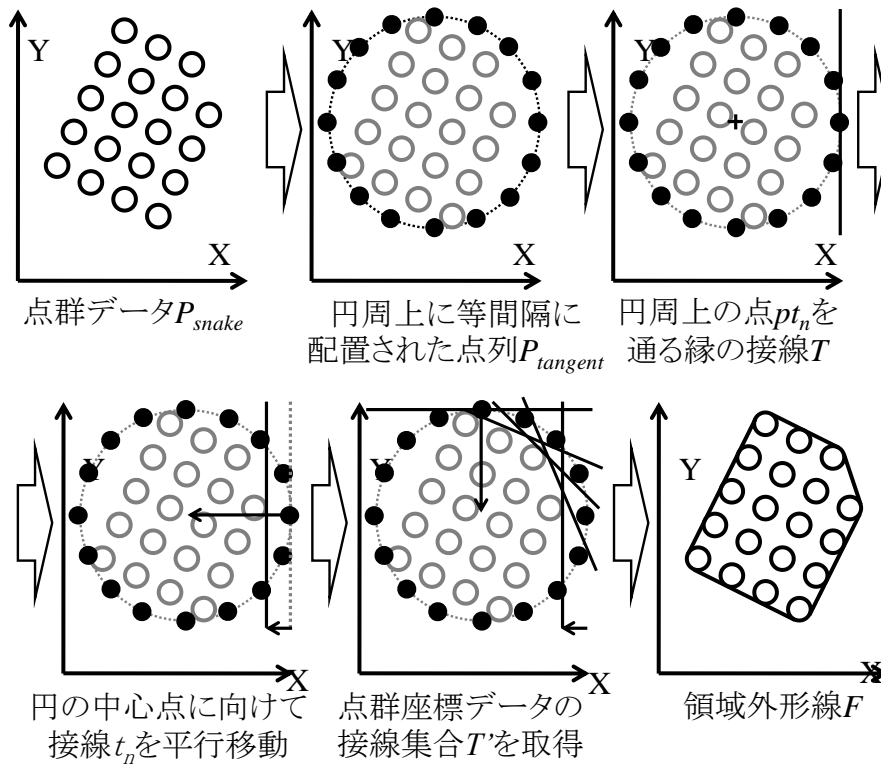
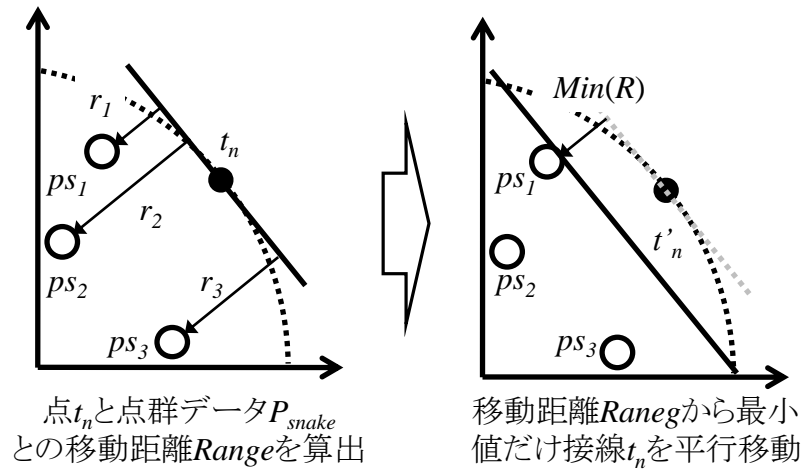


図 3.31 本研究で利用する動的輪郭法の概要

まず、対象となる点群データ  $P_{snake}$  に外接する円を作成する。次に、円周上に等間隔に配置した点列  $P_{tangent} = \{pt_1, pt_2, pt_3, \dots, pt_n\}$  と  $pt_n$  を通る円の接線  $T = \{t_1, t_2, t_3, \dots, t_n\}$  とを作成する。そして、図 3.32 に示すとおり、円周上の点  $pt_n$  を通る円の接線  $t_n$  を円の中心点に向けて対象の点群データ  $ps_{(j,m)}$  と重なるまで平行移動する。




図 3.32 円の接線  $t_n$  の平行移動

このとき、 $pt_n$  が平行移動した距離  $Range$  は式 (3) を用いて算出する。ここで、 $t_n$  は直線の公式  $ax+by+c=0$  とする。また、 $x_t, y_t$  は、平行移動する点  $pt_n$  の  $x, y$  座標とし、 $x_s, y_s$  は、対象の点群データ  $ps_{(j,m)}$  の  $x, y$  座標とする。

$$Range = \left| \frac{|a \cdot x_t + b \cdot y_t + c| - |a \cdot x_s + b \cdot y_s + c|}{\sqrt{a^2 + b^2}} \right| \quad (3)$$

この処理から得た点群データの接線の集合を  $T'=\{t'_1, t'_2, t'_3, \dots, t'_n\}$  とする。また、接線集合  $T'$  の交点の集合を領域外形線  $F=\{f_1, f_2, f_3, \dots, f_o\}$  とする。そして、動的輪郭法によって取得したクラスタの領域外形線  $F$  からクラスタ集合  $Cl_j$  の領域面積  $Sl_j=\{sl_{(j,1)}, sl_{(j,2)}, sl_{(j,3)}, \dots, sl_{(j,k)}\}$  を算出する。各クラスタの領域面積  $Sl_j$  は、次の多角形の面積を式 (4) により算出する。

$$sl_{(j,k)} = \frac{1}{2} \sum_{o=1}^{|F|} (x_o - x_{o+1}) \cdot (y_o + y_{o+1}) \quad (4)$$

式 (4) の  $x_o, y_o$  は、領域外形線  $F$  の頂点  $f_o$  の  $x, y$  座標である。また、 $x_{o+1}, y_{o+1}$  は頂点  $f_o$  と隣り合う点  $f_{o+1}$  の  $x, y$  座標である。

### (3) 天端面特定処理

天端面特定処理方法を図 3.33 に示す。天端面特定処理では、ブレイクライン候補線を取得するため、天端面のレイヤを特定する。天端面のレイヤは、レイヤに属する点群データの領域面積と各クラスターの領域面積  $Sl_j$  の総和との割合や、点群データが存在する領域の大きさをを用いて推定する。このとき、各レイヤの領域面積をそれぞれ  $S=\{s_1, s_2, s_3, \dots, s_j\}$  とする。なお、これらの領域面積は、各レイヤのクラスタリング処理の結果に依存するため、レイヤ単位で異なる。

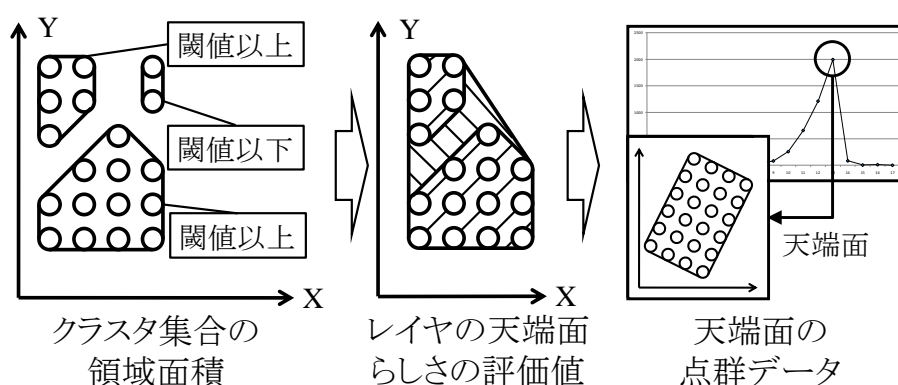


図 3.33 天端面特定処理

まず、各クラスターの領域面積が閾値  $MinSize$  以下の微小クラスターであった場合、任意のレイヤ  $l_j$  から微小クラスターを除去する。次に、任意のレイヤ  $l_j$  の領域外形線と領域面積を前項と同様に動的輪郭法を用いて算出する。そして、レイヤの領域面積とレイヤに含まれるクラスターの領域面積とを用いて、天端面となるレイヤ  $l_j$  を式 (5) にて特定する。最後に、天端面のレイヤ  $l_j$  の領域外形線をブレイクライン候補線  $BL$  として取得する。

#### 3.3.5 植生ノイズを考慮したブレイクライン抽出機能

ブレイクライン抽出機能は、ブレイクライン候補線と点群データ  $P$  とを入力してブレイクラインを抽出する。本機能では、壁状ノイズ除去処理を追加することによって、前述した植生によるノイズが原因で断面変化点を誤抽出される課題を解消する。改良した各処理の詳細は、次に示すとおりである。

##### (1) 抽出範囲限定処理

本処理では、まず、ブレイクライン候補線の始点から一定の距離ごとに矩形領域を作成す

る．次に，作成した領域の範囲内から点群データを抽出する．この処理から得た領域を  $RC=\{rc_1, rc_2, rc_3, \dots, rc_o\}$  とし， $rc_o$  に含まれる点群データを  $P_o=\{po_1, po_2, po_3, \dots, po_p\}$  とする．

## (2) 断面モデル生成処理

本処理（図 3.34）では，抽出範囲限定処理によって取得した領域  $RC$  に含まれる点群  $P_o$  を 2 次元空間に圧縮し，線形近似を行う．この処理から得た断面を示す折線を断面モデル  $P_{xsection}=\{px_1, px_2, px_3, \dots, px_q\}$  とする．

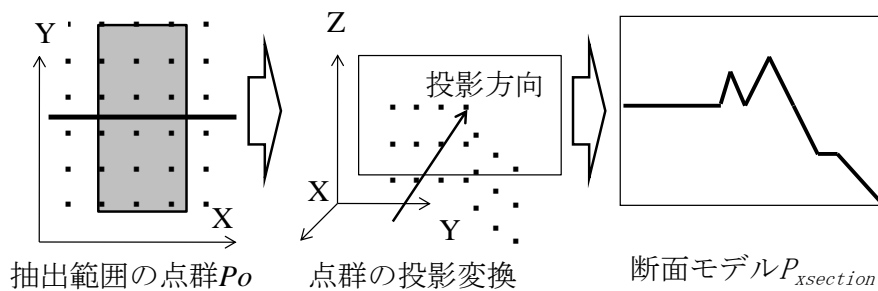


図 3.34 断面モデルの生成処理

## (3) 壁状ノイズ除去処理

壁状ノイズ除去処理では，断面モデル生成処理によって取得した断面モデル  $P_{xsection}$  を利用して，天端面よりも高い位置に存在する点群データを壁状ノイズとして取り除く．また，内挿処理によって壁状ノイズで隠れていた天端面を補間する．本処理（図 3.35）では，まず，壁状ノイズに覆われた天端面を推定するため，断面モデル  $P_{xsection}$  の中から，水平との角度が閾値  $\beta$  以内の線分を探索する．そして，その中から最も高い位置に存在する線分を特定し，天端面を示す線分として取得する．以後，この線分を天端面線分とする．そして，天端面線分を延長し，既存の断面モデルとの交点の中から，最も天端面線分との距離が離れた交点  $px_{q+1}$  を断面モデル  $P_{xsection}$  に追加する．最後に，断面モデル  $P_{xsection}$  の中から，天端面上に存在する点群データをノイズとして除去する．

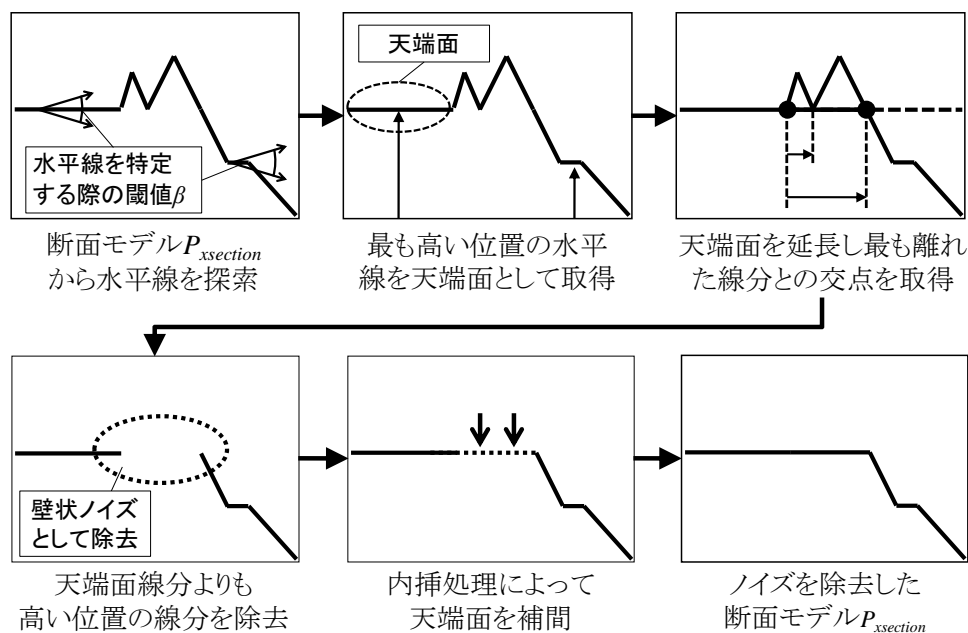


図 3.35 壁状ノイズ除去処理

#### (4) 断面変化点特定処理

本処理 (図 3.36) では、まず、近似された各断面線分の中から、水平からの角度が閾値  $\beta$  以内の断面線分を水平線として抽出する。次に、抽出された水平線の端点の中から、最もブレイクライン候補線と距離が近い点を断面変化点として取得する。そして、断面変化点特定処理を各領域  $rc_o$  に適用する。この処理から得た断面変化点の集合を  $P_x = \{px_1, px_2, px_3, \dots, px_o\}$  とする。

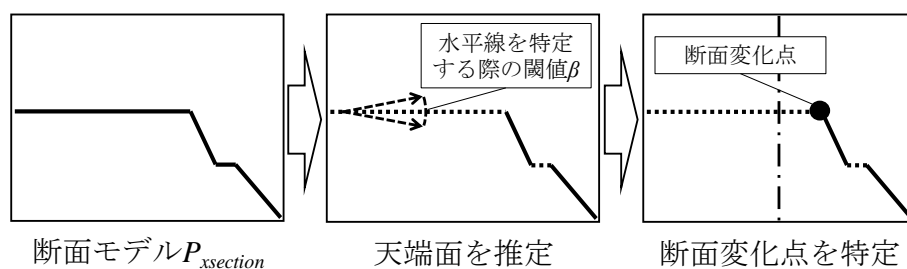


図 3.36 断面変化点特定処理

#### (5) ブレイクライン作成処理

本処理では、取得した断面変化点の集合  $P_x$  からブレイクラインを作成する。具体的には、断面変化点の集合  $P_x$  の各点  $px_o$  を結んで折れ線を作成する。次に、各点  $px_o$  を取得した領域

のブレイクライン候補線の始点からの距離を横軸，ブレイクライン候補線に対する各点の垂線の長さを縦軸としてメディアンフィルタ<sup>27)</sup>によって平滑化する．この処理により，砂利や植生などのノイズによって誤抽出された断面変化点を除去できる．そして，平滑化された断面変化点の点列  $P_x$  を各頂点とするブレイクラインを作成する．

### 3.3.6 実証実験

本実験では，天端面の外形線を抽出できているか，壁状ノイズによるブレイクラインを誤抽出を解決できているかを確認するため，既存手法と提案手法とで生成した河川空間モデルの再現精度を比較・評価する．

#### (1) 実験概要

河川空間モデルの再現精度は，河川空間モデルから抽出したブレイクラインを用いた比較，河川空間モデルから生成した横断面図を用いた比較と河川空間モデルの可視化による比較の3つの指標を用いて評価する．ブレイクラインを用いた比較では，各手法で生成した河川空間モデルのブレイクラインと評価基準として手作業で取得したブレイクラインとの誤差を用いて評価する．横断面図を用いた比較では，各手法で生成した河川空間モデルから作成した横断面図と実際の河川管理で利用している河川定期横断面図とを比較して評価する．可視化による比較では，各手法で生成した河川空間モデルを AutoCAD Civil3D で可視化し，ブレイクラインを考慮した河川空間モデルが生成されているかを確認する．

#### (2) 実験環境と実験データ

本実験で用いた機器の仕様を表 3.6 に示す．また，本実験で利用する MMS データは，処理時間や河川管理の距離標の関係から 200m 毎（幅約 40m，面積約 8,000m<sup>2</sup>）に区切って用いる．本実験で対象とする計測エリアは，淀川堤防沿いの区間の右岸とした．これは，第2章の調査結果からも明らかなように，河川堤防の典型的形状で構成されており，天端面付近には壁状ノイズが多く含まれているためである．MMS データの詳細を表 3.6 に示す．また，既存手法では，ブレイクライン候補線として DM データに含まれる道路線を背景図として用いる．

表 3.6 実験データの詳細

項目	MMS データ
点数	約 410 万点
計測距離	800m
絶対精度	水平 10cm, 鉛直 15cm
相対精度	1cm
計測時期	2009 年

### (3) パラメータの設定

本項では、提案手法で用いる 3つのパラメータ  $h$ ,  $Eps$ ,  $MinPts$  と  $MinSize$  を実験条件として設定する。パラメータ  $h$  は、天端面特定機能の標高分割処理にて、DBSCAN 法の閾値として設定する。

パラメータ  $Eps$  と  $MinPts$  は、天端面特定機能の密度クラスタリング処理にて、点群データをクラスタリングする際に用いる値である。パラメータ  $Eps$  は、任意の点をクラスタに含めるかどうかを判定するための閾値で、パラメータ  $MinSize$  は、天端面特定機能の天端面特定処理にて微小クラスタを除去するための値である。このうち、パラメータ  $h$ ,  $MinPts$ ,  $MinSize$  の値は、予備実験の結果から経験的に値を設定した。予備実験では、本実験と同様に典型的な凸型の堤防形状の点群データを用いた。これは、典型的な凸型の堤防形状を対象とすることで、本実験とほぼ同様の値を設定することが可能であると考えたためである。なお、ブレイクライン抽出機能で用いるパラメータの閾値は、第 3.2.4 項と同様の値を用いた。

#### a) パラメータ $h$

予備実験では、パラメータ  $h$  の最適な値を決定するために 0.1m から 0.6m まで、0.1m 間隔で点群データを分割し天端面の特定処理を行った。予備実験の結果を図 3.37 に示す。0.1 m と 0.2 m では、点群データが疎な状態となっており、天端面を特定できていない。0.3m 以上は天端面を特定可能であるが、外形線の幅が徐々に広がっており、法面部分も天端面として誤抽出していると考えられる。これらの結果から、本実験では  $h = 0.3(m)$  を採用する。

図 3.37 パラメータ  $h$  の予備実験**b) パラメータ  $Eps$ ,  $MinPts$** 

パラメータ  $Eps$  は、本実験で利用する点群データから、各点の最近傍点までの距離の平均値を算出して、 $Eps=0.79\text{cm}$  を採用する。

予備実験では、パラメータ  $Eps$  の値を固定して、 $MinPts$  の値を 1 から 5 まで変化させ、密度によるクラスタリング処理を行った。その結果、 $MinPts$  の値が 2 以下の場合、図 3.38 に示すとおり複数の領域が結合された 1 つのクラスタが形成される結果となった。それに対し、 $MinPts$  の値が 3 以上の場合、領域単位にクラスタリングされ、正常に点群データを分割される結果となった。この結果から、本実験では  $MinPts=3$  を採用する。

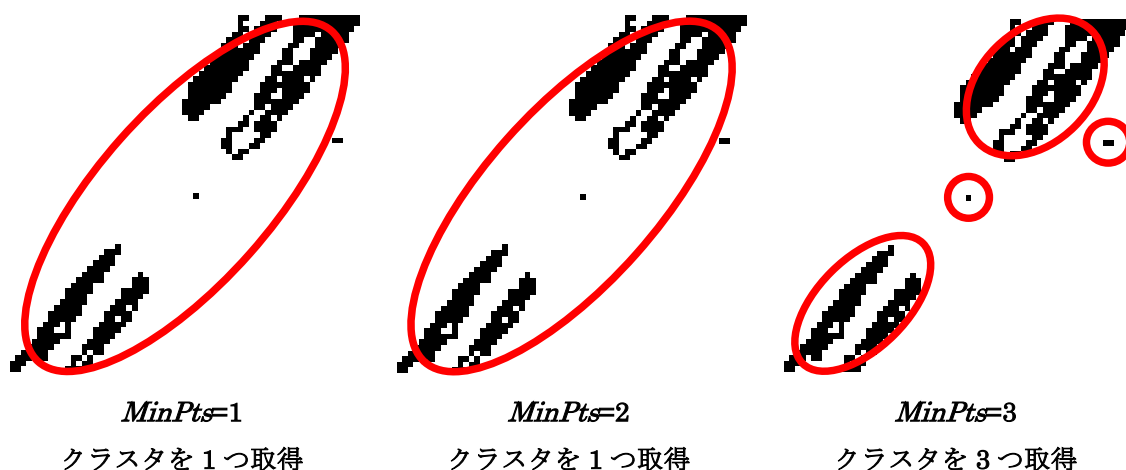


図 3.38 パラメータ *MinPts* の予備実験

c) パラメータ *MinSize*

予備実験では、パラメータ *MinSize* の最適な値を決定するために  $0.01\text{m}^2$  から  $1.0\text{m}^2$  まで、 $0.01\text{m}^2$  間隔の閾値で天端面特定処理を行った。予備実験の結果を図 3.39、レイヤの領域面積と *MinSize* との関係を図 3.40 に示す。レイヤの領域面積 ( $\text{m}^2$ ) の値が大きい場合、微小クラスタを含めた領域外形線を取得しており、ノイズが混入している可能性が高いと考えられる。具体的には、 $0\text{m}^2$  から  $0.11\text{m}^2$  未満の場合にはコンクリート柱（電柱など）の領域外形線がノイズとして含まれており、領域外形線を誤抽出する原因となった。そのため、本実験では、*MinSize* に設定する値として、コンクリート柱の断面積を用いる。コンクリート柱の断面形状は、JIS 規格（JIS A 5373）に従って NTT や各電力会社で独自に規格を定めている。本実験では、各規格の中で最大直径である NTT の  $407\text{mm}$  から面積を算出して  $\text{MinSize}=0.13\text{m}^2$  を採用する。

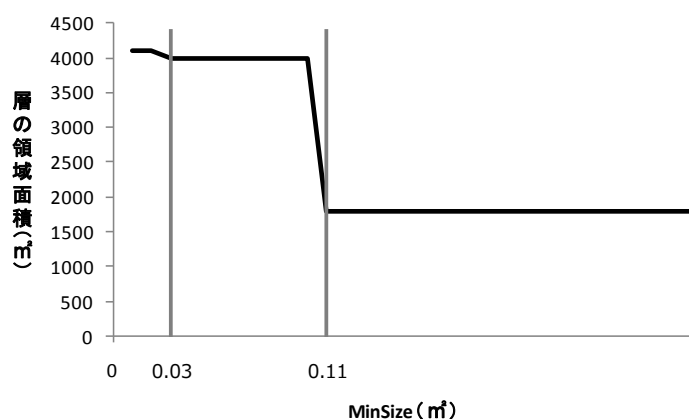


図 3.39 パラメータ *MinSize* の予備実験（レイヤの領域外形線）



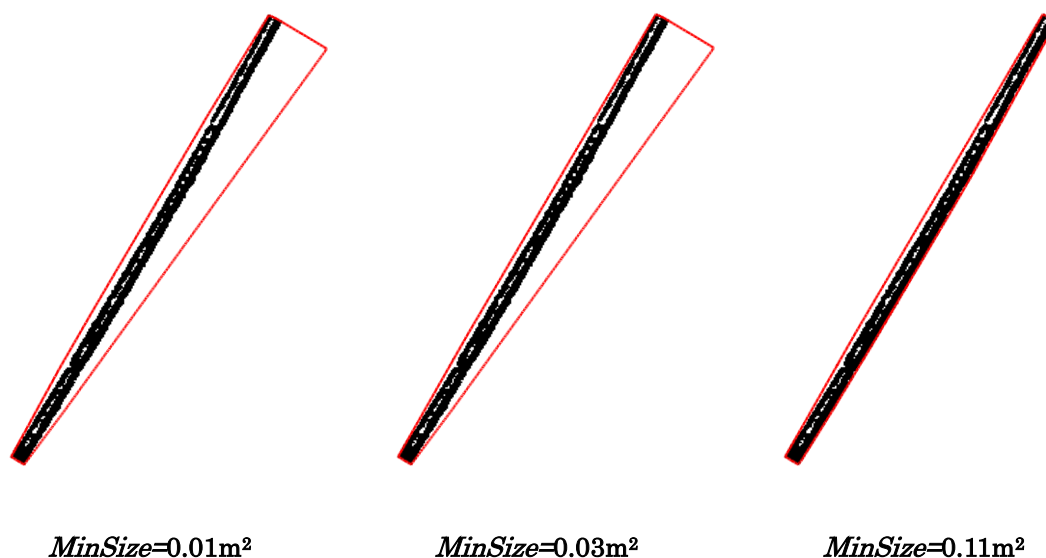


図 3.40 パラメータ *MinSize* の予備実験 (レイヤの領域面積)

#### (4) ブレイクライン正解データ

ブレイクラインの正解データは、点群データから人手で作成 (以下、「ブレイクライン正解データ」) した。ブレイクライン正解データは、点群データから任意の間隔で横断図を取得し、その横断図内で断面変化点を目視で確認しながら作成した。断面変化点の判断基準を図 3.41 に示す。A の地点は、断面変化点が明確に確認可能な例である。この場合、天端面と法面の交点を断面変化点とした。B の地点は、道路の縁石に壁状ノイズが存在する例である。この場合、道路面を延長し、法面と交差した点を断面変化点とした。C は、天端面と法面の双方が途切れている例である。この場合、天端面と法面をそれぞれ延長し、交差した点を断面変化点とした。D は、道路面両端に草むらなどのノイズが存在する例である。この場合、草むらをノイズとするため、道路面を延長した直線と法面とが交差する点を断面変化点とした。

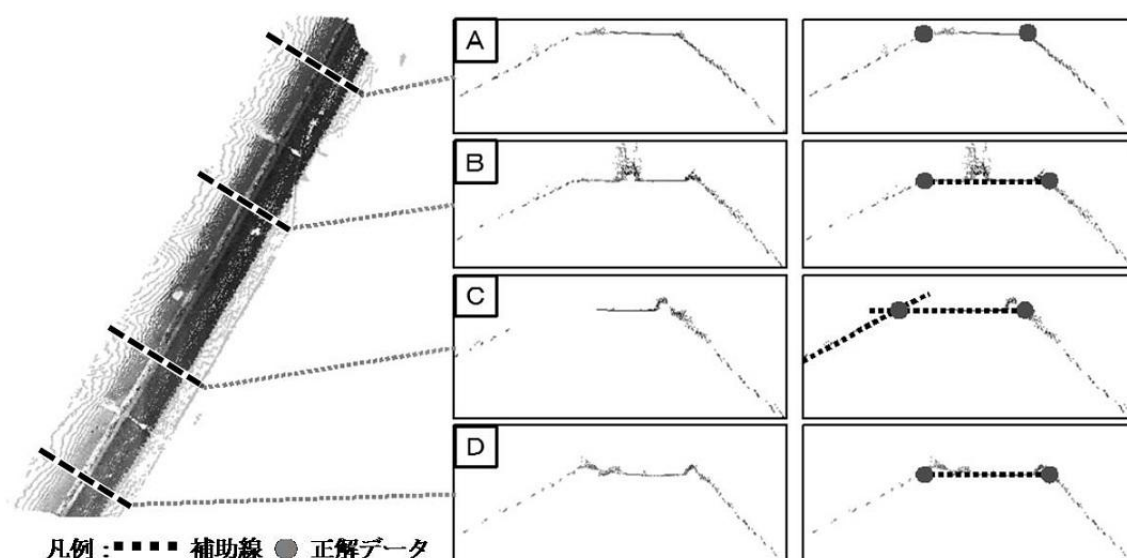


図 3.41 正解データの判断基準

## (5) 実験内容

本実験では、第 3.2 節の提案手法と本改良手法とで生成した河川空間モデルの再現精度の比較により検証する。実験手順を次に示す。まず、次に示す 3 つの手法にて河川空間モデルを生成する。

- 第 3.2 節の提案手法（手法 a）
- 第 3.2 節の提案手法に天端面特定機能を追加した提案方法（手法 b）
- 第 3.2 節の提案手法に天端面特定機能と壁状ノイズ除去処理を追加した提案手法（手法 c）

次に、生成した河川空間モデルからブレイクラインと横断面図とを取得する。横断面図は、正解データの河川定期横断面図の距離標の経緯度を用いて同一箇所情報を抽出する。なお、距離標の経緯度は、国土地理院が公開する地理院地図を用いて目視で取得する。最後に、横断面図とブレイクラインそれぞれの正解データと比較して精度を評価する。

本実験にて、手法 a と手法 b とを比較して既存手法で指摘していた DM データから取得した補助線が必要である課題が解消できているかを確認する。また、手法 b と手法 c とを比較し、河川堤防の天端面と法面との間の壁状ノイズに起因したブレイクラインの誤抽出の課題を解消しているかを確認する。

### 3.3.7 実験結果と考察

#### (1) ブレイクラインの抽出精度の評価

本実験では、各手法で生成した河川空間モデルに含まれるブレイクラインの再現精度を評価するため、ブレイクライン正解データと比較した。植生ノイズが含まれない箇所は、各手法ともほぼ同様のブレイクラインが抽出できていたため、本実験では、植生ノイズが多く含まれる距離標 7.8km～8.0km の区間を対象とした。ブレイクライン正解データと各手法とで生成した河川空間モデルとの比較手順を次に示す。

まず、ブレイクライン正解データを 10cm 間隔で分割した点（以下、「ブレイクライン構成点」）を取得する。次に、ブレイクライン正解データを分割したブレイクライン構成点から河川空間モデルを構成する面への最短距離を算出する。そして、算出した最短距離に基づきブレイクライン構成点をグループ化し、その集計されたブレイクライン構成点の数で比較する。また、集計の際、手法 a は DM データの誤差が精度に影響を与えている可能性が高いと考えられるため、補正処理を行った結果を用いた。手法 a の抽出結果の補正手順を次に示す。

まず、手法 a にて河川空間モデルを作成する。次に、ブレイクライン構成点と河川空間モデルとの最短距離を算出する。そして、算出した最短距離から 0cm～87.5cm の範囲内から無作為に取得した値を減算する。ここで、87.5cm は、DM データ（地図情報レベル 2,500）に含まれる水平標準誤差 175cm の 1/2 の値である。これにより、DM データと正解データとの間に存在する水平標準誤差を考慮した結果の算出が可能となる。

集計結果を図 3.42 と図 3.43 に示す。図 3.42 は、縦軸をブレイクライン構成点の数、横軸を河川空間モデルの構成する面とブレイクライン正解データの構成点との距離（cm）とした。図 3.43 では縦軸をブレイクライン構成点の累積数とした。これらの図は、河川空間モデルと正解データの距離が短い集計グループに集中する場合、現況地形を高精度に再現した河川空間モデルが生成できていることを示す。

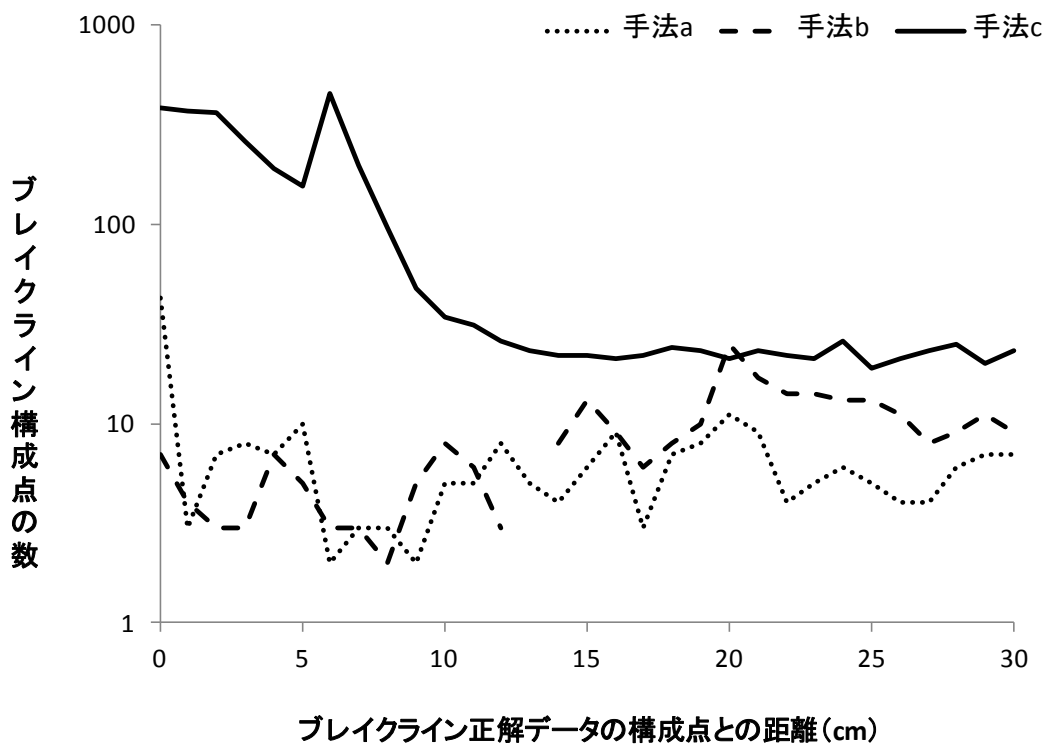


図 3.42 断面変化点における近傍面の集計結果

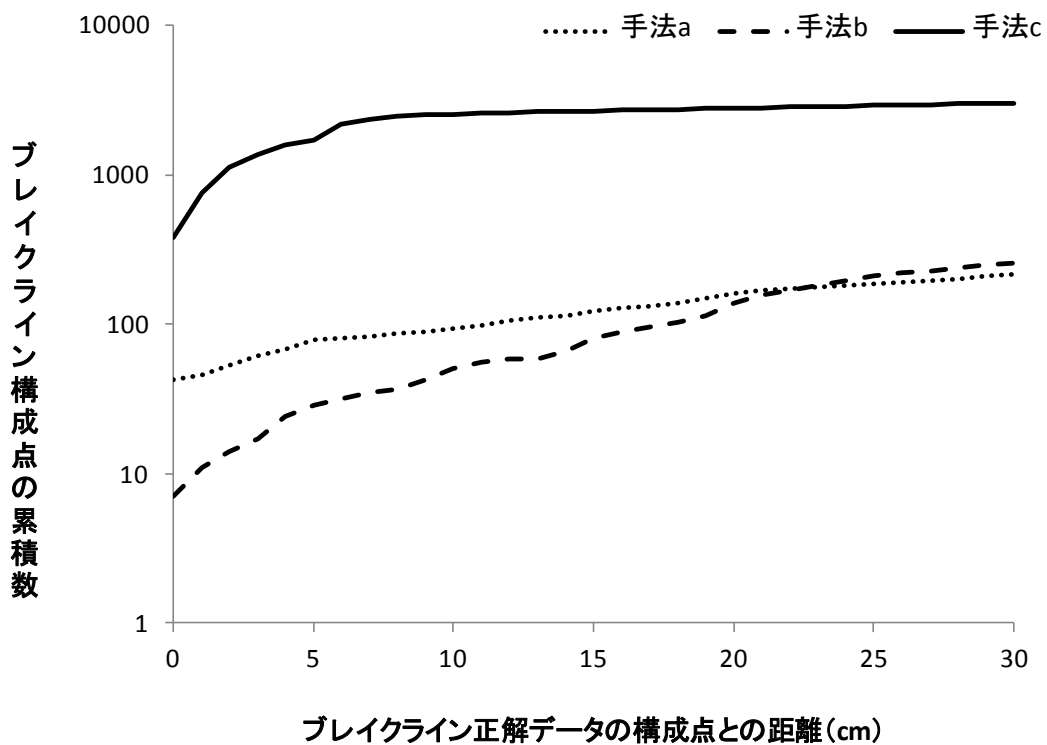


図 3.43 最近傍面の累積グラフ

図 3.42 の手法 a と b を確認すると、ほぼ同様の軌跡をたどっていることがわかる。そこで、手法 a と b の最近傍面の数の差を図 3.44 に示す。図 3.44 から、0cm の集計結果を除き、ほぼ中央値である 0 で遷移していることがわかる。また、0cm の集計結果の詳細を確認したところ、手法 a に対して DM データの水平標準誤差を考慮した補正を適用したことにより発生したノイズであることがわかった。これらの結果から、ブレイクライン候補線取得機能により生成したブレイクラインは、手法 a と同様の精度で断面変化点を発見できることが判明した。したがって、手法 b では、DM データの道路線をブレイクライン候補線として用いずに河川空間モデルを生成できているため、MMS データから河川堤防の天端面を自動抽出できていることがわかった。

図 3.42 と図 3.43 の手法 b と c のグラフを確認すると、手法 b では 7cm 以内には 35 件（全体の 0.8%）であるのに対して、手法 c では 7cm 以内に 2,371 件（全体の 54%）含まれていることがわかる。この結果から、壁状ノイズ除去処理により正確にノイズが除去されていることがわかる。また、手法 c の 10cm 以内の集計結果（図 3.45）を確認すると、正解データと同様の点を抽出した件数は、計測範囲 200m に対して 384 点であった。

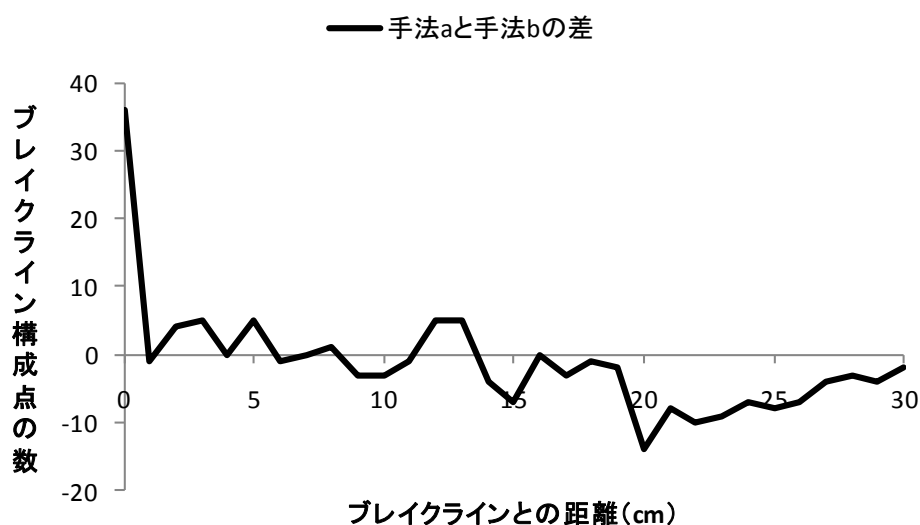


図 3.44 手法 a と手法 b の差分グラフ

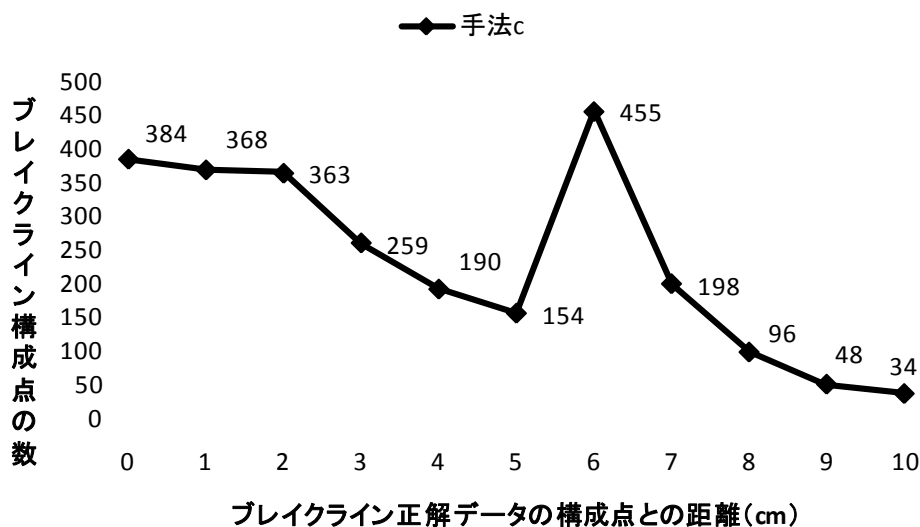


図 3.45 手法 c の 10cm 以内の集計結果

## (2) 河川定期横断図を用いた精度評価

本実験では、各手法による河川空間モデルの横断図と河川定期横断図とを重ね合わせ、各横断面の標高差を用いて精度を評価する。精度評価の指標に、標高差を用いることで、断面変化点を正確に再現した河川空間モデルが作成できていることと、天端面に存在する壁状ノイズを適切に除去できていることの 2 点を評価できる。本実験で用いる河川定期横断図は、MMS の計測エリアに含まれる距離標 7.2km 地点から 8.0km 地点までの間 200m 毎の 5 図面とした。横断図の比較のイメージを図 3.46 に示す。

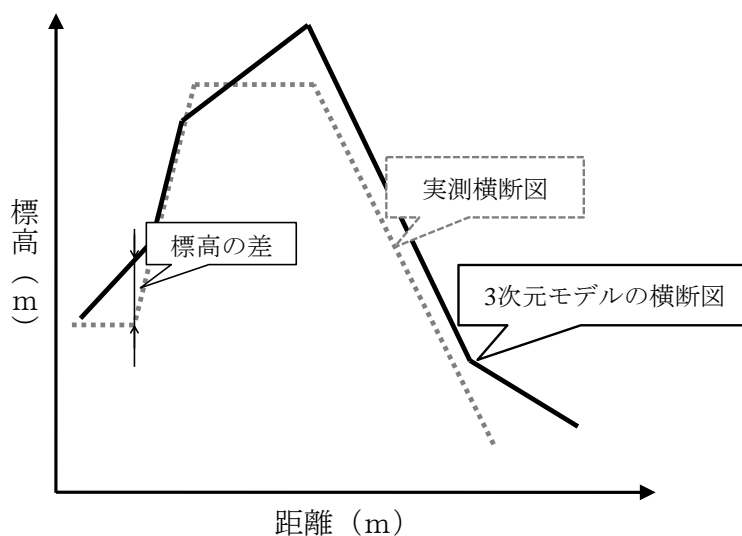


図 3.46 横断面の比較のイメージ

ここで、標高差の比較は、河川定期横断面を 1cm 間隔に区切って作成した評価点を対象に算出する。また、図 3.47 に示すとおり、比較結果を全体、A 区間と B 区間の 3 つの区間に分類して集計する。その値を参考に決定した。

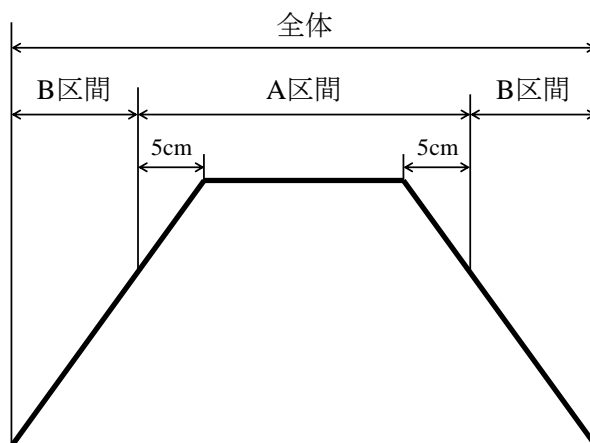


図 3.47 比較結果の集計グループ

A 区間は、天端面の幅に両端 5cm を加えた範囲とする。これは、河川土工の盛土工の出来形管理基準では、天端面の幅の誤差を 10cm 以内と定められているためである。B 区間は、A 区間に含まれない天端面以外の範囲とする。それぞれの手法で生成した河川空間モデルと河川定期横断面との集計結果を表 3.7 に示す。

表 3.7 河川空間モデルと河川定期横断図との比較結果

計測箇所		全体(%)			A 区間(%)			B 区間(%)		
		手法 a	手法 b	手法 c	手法 a	手法 b	手法 c	手法 a	手法 b	手法 c
距離標 7.2km	～ 5cm	22.68	20.45	<b><u>23.64</u></b>	64.86	81.08	<b><u>91.89</u></b>	<b><u>17.03</u></b>	12.32	14.49
	～10cm	29.71	29.07	<b><u>37.38</u></b>	72.97	<b><u>100.00</u></b>	<b><u>100.00</u></b>	23.91	19.57	<b><u>28.99</u></b>
	～15cm	35.46	33.23	<b><u>45.37</u></b>	78.38	<b><u>100.00</u></b>	<b><u>100.00</u></b>	29.71	24.28	<b><u>38.04</u></b>
距離標 7.4km	～ 5cm	6.33	<b><u>10.67</u></b>	8.33	0.00	0.00	0.00	6.99	11.76	<b><u>9.19</u></b>
	～10cm	16.00	<b><u>25.33</u></b>	21.67	0.00	0.00	<b><u>3.57</u></b>	17.65	<b><u>27.94</u></b>	23.53
	～15cm	29.00	41.33	<b><u>49.33</u></b>	60.71	7.14	<b><u>75.00</u></b>	31.99	44.85	<b><u>46.69</u></b>
距離標 7.6km	～ 5cm	2.33	2.33	<b><u>2.84</u></b>	0.00	0.00	<b><u>2.44</u></b>	2.69	2.69	<b><u>2.99</u></b>
	～10cm	5.43	5.43	<b><u>15.50</u></b>	0.00	0.00	<b><u>90.24</u></b>	6.29	6.29	<b><u>6.89</u></b>
	～15cm	11.37	8.79	<b><u>20.67</u></b>	12.20	0.00	<b><u>100.00</u></b>	<b><u>11.68</u></b>	10.18	<b><u>11.68</u></b>
距離標 7.8km	～ 5cm	23.49	16.95	<b><u>24.94</u></b>	53.06	0.00	<b><u>73.47</u></b>	<b><u>19.51</u></b>	19.23	18.41
	～10cm	37.29	<b><u>37.77</u></b>	<b><u>37.77</u></b>	81.63	81.63	<b><u>91.84</u></b>	31.32	<b><u>31.87</u></b>	30.49
	～15cm	50.36	<b><u>50.85</u></b>	49.15	100.00	100.00	<b><u>100.00</u></b>	43.68	<b><u>44.23</u></b>	42.31
距離標 8.0km	～ 5cm	15.38	15.38	<b><u>21.47</u></b>	48.94	59.57	<b><u>85.11</u></b>	9.43	7.55	<b><u>10.19</u></b>
	～10cm	27.88	27.56	<b><u>33.65</u></b>	89.36	<b><u>100.00</u></b>	<b><u>100.00</u></b>	16.98	14.72	<b><u>21.89</u></b>
	～15cm	53.21	50.96	<b><u>54.49</u></b>	<b><u>100.00</u></b>	<b><u>100.00</u></b>	<b><u>100.00</u></b>	<b><u>44.91</u></b>	42.26	46.42
全体平均	～ 5cm	14.04	13.15	<b><u>16.25</u></b>	33.37	28.13	<b><u>50.58</u></b>	<b><u>11.13</u></b>	10.71	11.05
	～10cm	23.26	25.03	<b><u>29.20</u></b>	48.79	56.33	<b><u>77.13</u></b>	19.23	20.08	<b><u>22.36</u></b>
	～15cm	35.88	37.03	<b><u>43.80</u></b>	70.26	61.43	<b><u>95.00</u></b>	32.39	33.16	<b><u>37.03</u></b>



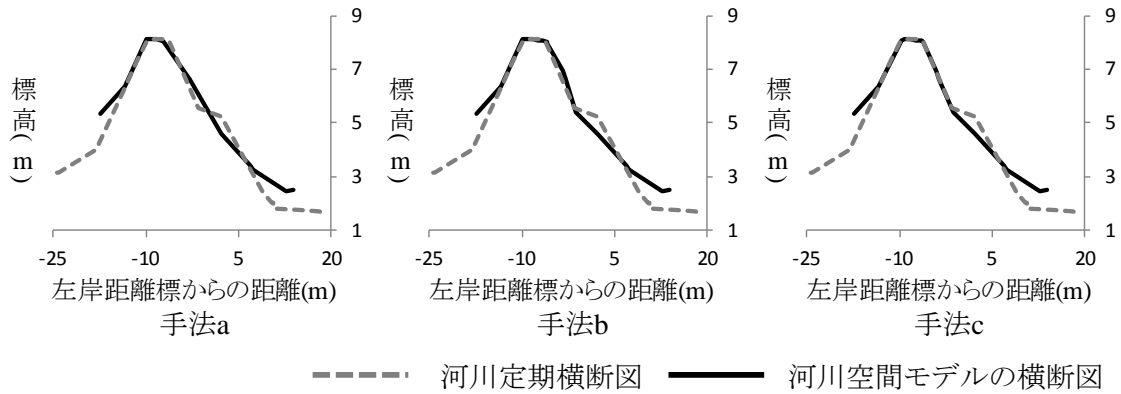


図 3.48 河川空間モデルと河川定期横断図との重ね合わせ結果 (距離標 7.2km 地点)

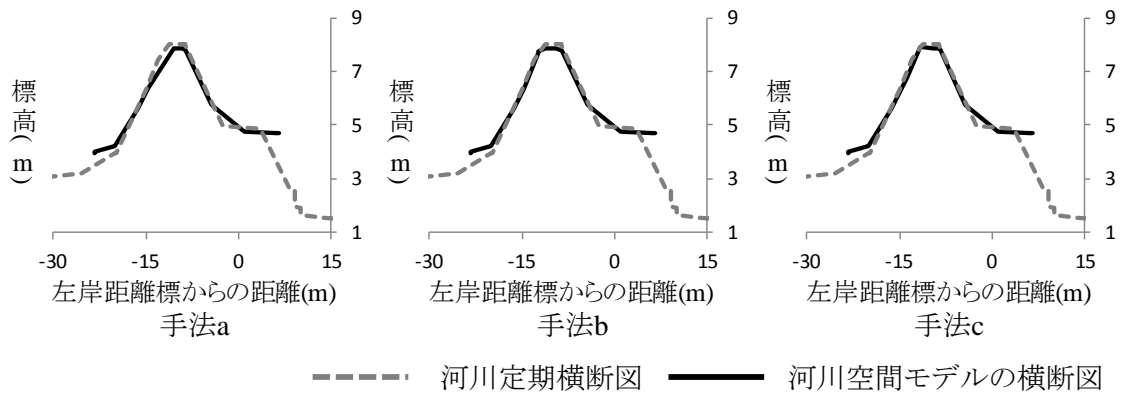


図 3.49 河川空間モデルと河川定期横断図との重ね合わせ結果 (距離標 7.4km 地点)

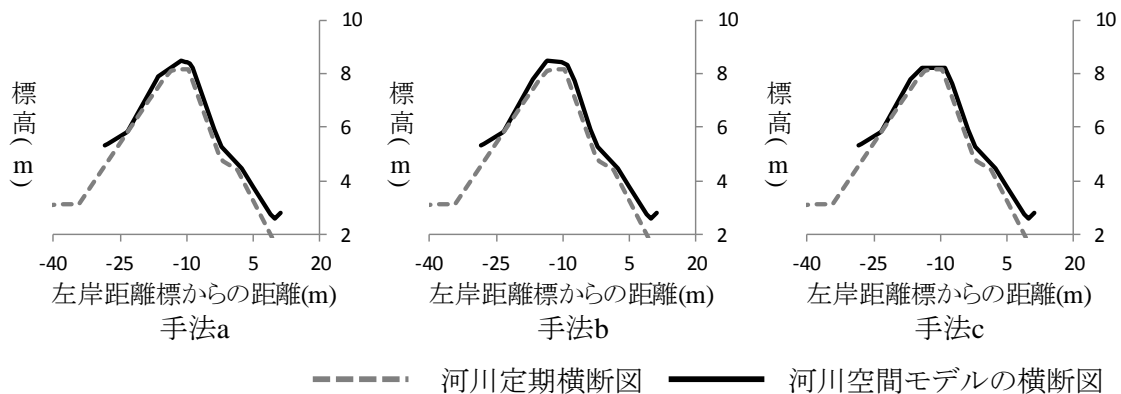


図 3.50 河川空間モデルと河川定期横断図との重ね合わせ結果 (距離標 7.6km 地点)

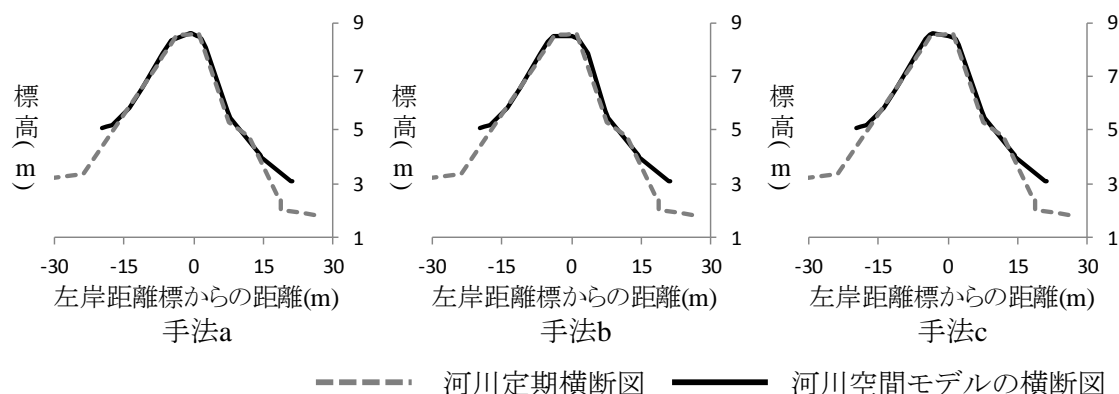


図 3.51 河川空間モデルと河川定期横断図との重ね合わせ結果（距離標 7.8km 地点）

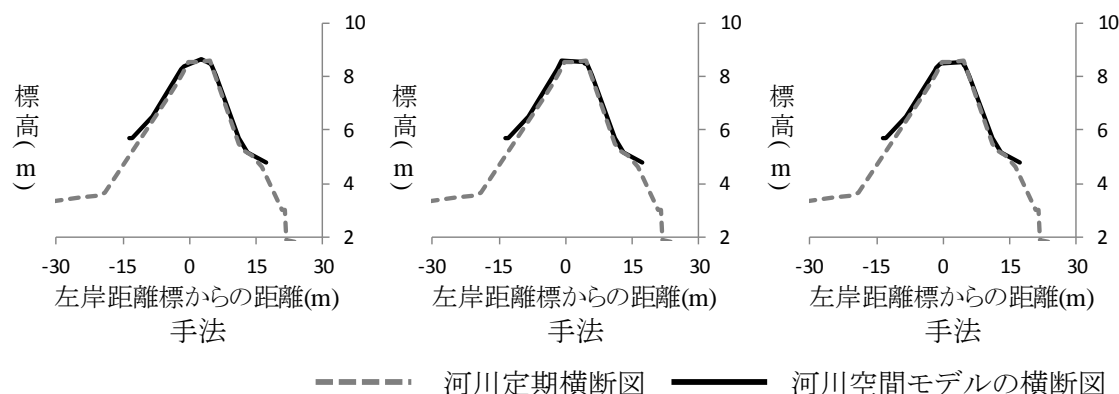


図 3.52 河川空間モデルと河川定期横断図との重ね合わせ結果（距離標 8.0km 地点）

本実験では、横断図間の標高差が 15cm 以内にどの程度含まれているかを 5cm 間隔で集計した。これは、MMS による計測データには、15cm（鉛直方向）の絶対誤差が存在するためである。また、それぞれの集計区間に対し、3 手法で生成した河川空間モデルの横断図と河川定期横断図との誤差が最も低い値に下線を付与した。実験結果から、次の 3 つの内容が明らかとなった。

1 つ目は、表 3.7 の全体平均を確認すると、全体、A 区間、B 区間のすべてを通して、提案手法である手法 c が最も河川定期横断図との誤差が小さくなった。また、A 区間の集計結果の平均を確認すると、MMS の許容誤差である 15cm 以内に約 95% が含まれており、高精度な河川空間モデルが生成できていることがわかる。これは、天端面の上方にある植生ノイズを適切に除去できているためである。

2 つ目は、表 3.7 の A 区間を確認すると、手法 c で生成した河川空間モデルが他の 2 手法で生成した河川空間モデルと比較してより高精度に天端面を再現できた。各手法の河川空

間モデルから作成した横断面図と河川定期横断面図を重ね合わせた結果を図 3.48 から図 3.52 に示す。ここで、図 3.49 および図 3.50 を確認すると、手法 a と b で作成した河川空間モデルの横断面図は河川定期横断面図の天端面と高さが一致しておらず、表 3.7 を確認すると 15cm 以上の標高差があることがわかる。一方、手法 c で作成した河川空間モデルでは、天端部が河川定期横断面図と同様の形状を示しており、現況形状を再現できている。この距離標 7.4km および距離標 7.6km 地点の点群データを分析したところ、天端面上部に法肩を含む壁状ノイズが存在していた。このことから、提案手法を用いて生成した河川空間モデルは、天端部の壁状ノイズを高精度に除去できていることが分かる。

3 つ目は、表 3.7 の B 区間を確認すると、すべての手法で、約 3 割程度の点数が標高差 15cm 以内に収まっていることが明らかとなった。これは、MMS による計測では、計測車両の正面や近傍エリアは大量の点群データを取得可能であるが、法面や法尻などのレーザが届きにくい場所は取得可能な点群データの件数が減少する特性の影響と考えられる。そのため、B 区間では、少数の点群データに依存して河川空間モデルを生成する必要があり、天端面の精度と比較して精度が低下したと考えられる。

### (3) 河川空間モデルの可視化による評価

手法 b と手法 c により出力された点群データを AutoCAD Civil3D にて可視化（図 3.53 と図 3.54）した。図 3.53 では、ブレイクラインが正しく認識できておらず、壁状ノイズの影響を受けていることがわかった。それに対して、図 3.54 では、壁状ノイズを除去できており、ブレイクラインを正しく抽出できていることがわかった。

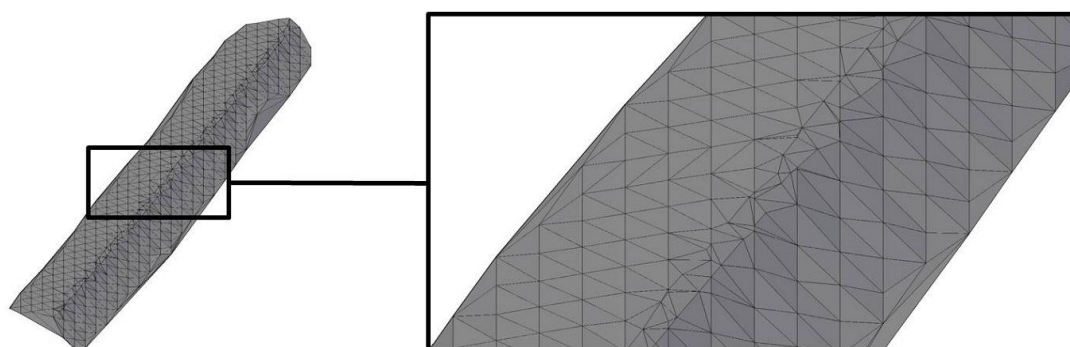


図 3.53 手法 b の河川空間モデル

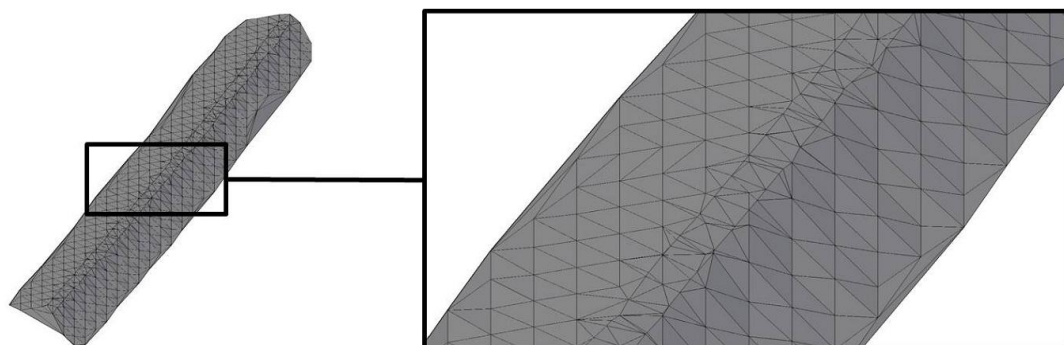


図 3.54 手法 c の河川空間モデル

図 3.11 の点群データに対して、壁状ノイズ除去処理を適用した手法 c の結果を図 3.55 に示す。図 3.55 から壁状ノイズを正確に除去できていることがわかった。これらの結果より、壁状ノイズの除去が行われ、ノイズによって曖昧であった現況地形の断面変化点を正確に再現できた。

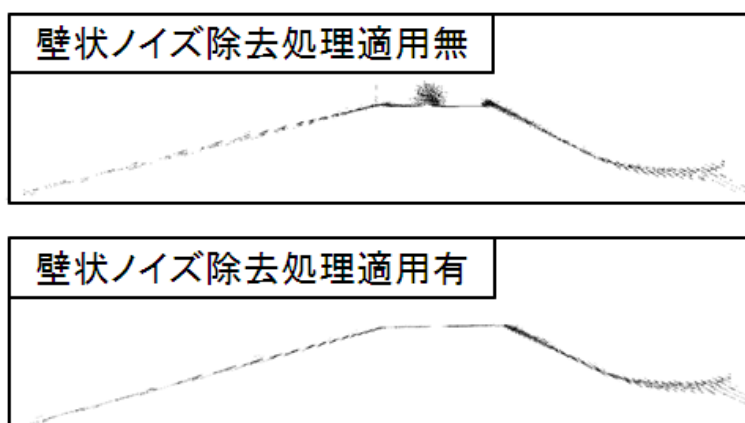


図 3.55 壁状ノイズ除去処理前後の点群データ

## 第4章 LPデータを用いた河川空間モデル生成技術の提案

### 4.1 研究の概要

LP データから河川空間モデルを生成するためには、「河川堤防のブレイクライン抽出が困難な課題」を解決する必要がある。本研究では、「河川堤防のブレイクライン抽出が困難な課題」を解決するため、LP データから河川堤防の平坦部の形状を抽出し、平坦部の外形線に従ってブレイクラインを抽出する技術を提案する。そして、提案手法を用いて生成した河川空間モデルと河川定期横断面図とを重畳して比較することにより、提案手法の有用性を評価する。

本章では、まず、第 4.2 節で、LP データに「MMS データを用いた河川空間モデル生成技術（以下、「MMS 手法」という）」を適用した場合に解消すべき課題を分析する。次に、第 4.3 節で、MMS 手法を LP データに適用する場合の課題への対応方針を検討する。そして、第 4.4 節で、LP データの特性を考慮した河川空間モデルの生成手法を提案し、第 4.5 節で実証実験によって提案手法の有用性を評価する。

### 4.2 LPデータを用いたMMS手法による河川空間モデル生成の課題分析

本章では、MMS データと LP データの特性の違いを踏まえて、LP データに MMS 手法を適用した場合の解決すべき課題を明らかにする。具体的には、まず、MMS 手法の概要について説明する。次に、MMS 手法を用いて LP データから生成した河川空間モデルを検証し、MMS 手法を LP データに適用する場合に解消すべき課題を分析する。

#### 4.2.1 MMS手法の概要

MMS 手法は、河川空間を計測した MMS データからブレイクラインを再現した河川空間モデルを自動生成する技術である。具体的には、まず、計測車両が走行した平坦部の形状を推定し、ブレイクライン候補線を自動生成する。次に、推定したブレイクライン候補線を基に平坦部のブレイクラインを抽出する。そして、ブレイクラインを考慮した格子状のフィルタを用いて膨大な MMS データを間引く。間引いた点群を使って河川空間モデルを作る。

## 4.2.2 LPデータを用いた河川空間モデル生成実験

### (1) 実験概要

本節では、LPデータにMMS手法を適用した場合の技術的な課題を分析するため、ブレイクライン候補線の生成実験とブレイクラインの抽出実験との2つの実験を実施する。ブレイクライン候補線の生成実験では、MMS手法を用いてLPデータからブレイクライン候補線を正しく生成できるかを確認する。ブレイクラインの抽出実験では、正しくブレイクライン候補線を入力した場合にMMSデータと同様にブレイクラインを抽出できるかを確認する。ブレイクラインの抽出実験には、ブレイクライン候補線が正しく抽出できた前提が必要である。そのため、手作業で作成したブレイクライン候補線を用いてブレイクラインを抽出する。

### (2) ブレイクライン候補線およびブレイクラインと平坦部の関係

本節では、提案手法によって抽出したブレイクライン候補線やブレイクラインが実際の平坦部や法面と比較してどのような関係であるを説明する。ブレイクラインは、実際の平坦部と法面のブレイクラインを再現した形状である。ブレイクライン候補線は、実際の平坦部を包括し、実際の平坦部と相似の形状である。

本実験では、平坦部およびブレイクラインの正解データをLPデータから人手で作成した。正解データは、LPデータから任意の間隔で横断図を作成し、その横断図内で断面変化点を目視で確認しながら作成した。

### (3) 実験結果

#### a) ブレイクライン候補線の生成実験

MMS手法を用いてLPデータから生成したブレイクライン候補線と評価基準となる平坦部との重ね合わせ結果を図4.1に示す。図4.1を確認すると、淀川上流の実験結果では、天端面からブレイクライン候補線を生成していることがわかる。しかし、淀川下流の実験結果では、高水敷のブレイクライン候補線を生成していることがわかる。また、MMS手法は、LPデータに含まれる複数の平坦部からブレイクライン候補線を1つだけ生成していることがわかる。これは、計測位置の密度が最も高いというMMSデータの密度分布の特性を用いて、計測車両が走行した平坦部のブレイクライン候補線を生成しているためである。これらのことから、LPデータにMMS手法を適用した場合に「ブレイクライン候補線を正しく生成できない課題」が明らかとなった。

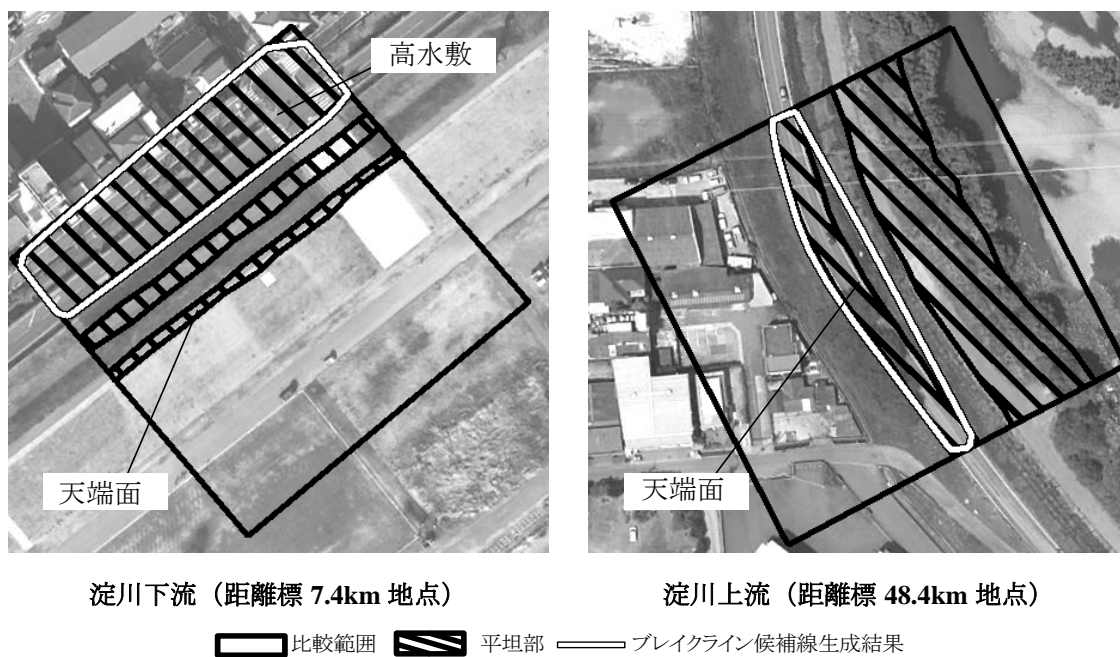


図 4.1 LP データを用いたブレイクライン候補線の生成結果

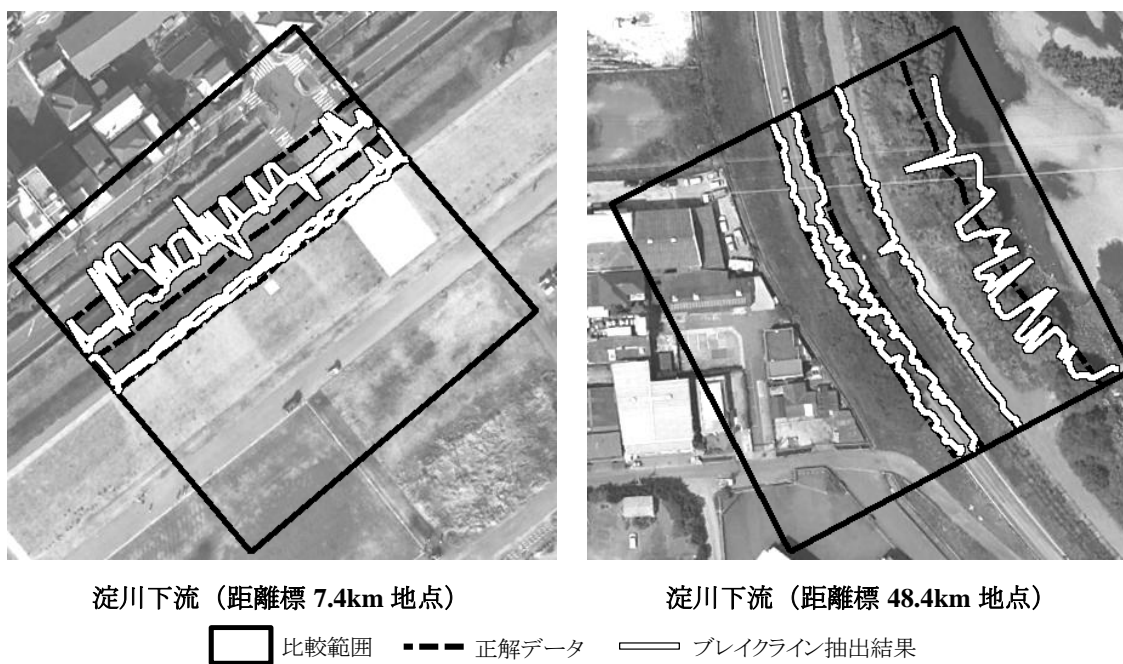


図 4.2 LP データを用いたブレイクラインの抽出結果

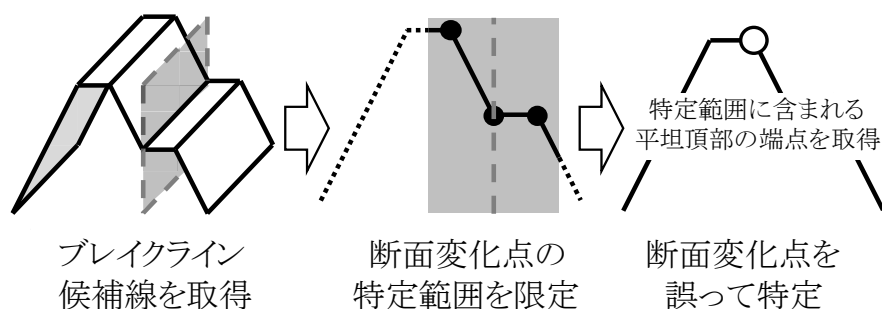


図 4.3 MMS 手法のブレイクライン抽出手法

#### b) ブレイクラインの抽出実験

MMS 手法を用いて LP データから抽出したブレイクラインと正解データとの重ね合わせ結果を図 4.2 に示す。図 4.2 を確認すると、淀川上流では問題なくブレイクラインを抽出できているが、淀川下流では小段を示すブレイクライン候補線から天端面のブレイクラインを誤抽出していることがわかる。その理由について、実験に用いた淀川下流地点を詳細に調査したところ、MMS データと LP データの計測範囲の特性が異なる影響であることがわかった。MMS 手法は、ブレイクライン候補線の近傍にある平坦部を区別せずにブレイクラインを抽出する。しかし、LP データは、天端面や小段など複数の平坦部が含まれる計測結果である。そのため、図 4.3 に示す「天端面や小段の区別が出来ない課題」が明らかとなった。

### 4.3 MMS手法をLPデータに適用する場合の課題への対応方針

#### 4.3.1 LPデータの特性を考慮したブレイクライン候補線生成技術の対応

本節では、「ブレイクライン候補線を正しく生成できない課題」を踏まえて、LP データから河川空間全体の平坦部をそれぞれ特定し、ブレイクラインを抽出する手法を新たに提案する。

ブレイクライン候補線の抽出は、点群データから平坦部の領域を抽出する技術にて対応する。本研究で用いる領域抽出技術を選定するため、点群データから領域を抽出する代表的な技術である領域成長法、RANSAC 法、MMS 手法で用いた DBSCAN 法の改良手法を比較する。



領域成長法は、任意に指定したシード領域に含まれる点群データから平面式を算出し、平面上に存在する点群データの領域を抽出する。RANSAC 法は、点群データから繰り返し平面領域を探索し、最も多くの点群データを含む平面領域を抽出する。MMS 手法で用いた手法は、まず、一定の標高ごとの点群データから、それぞれ距離や密度が閾値以下の点群データの領域を抽出し、その中から最も平坦部らしい集合を取得する。これらの技術を用いて河川周辺環境の LP データからの平坦部抽出を実施したところ、次のことがわかった。領域成長法では、開始時に設定したシード領域から算出した平面式を基準として領域を抽出する。しかし、河川堤防の平坦部は緩やかな傾斜やクラックなどがあり複数の平面で構成されるため、平面式が異なり、平坦部を正しく抽出できない課題が見られた。RANSAC 法では、法面と一部の広範囲な平坦部の領域を抽出できたが、天端面や小段などの平坦部は抽出できなかった。RANSAC 法は、異常値が少なく、最も多くの点群データを含む領域を抽出するため、幅の狭い小段などの平坦部をノイズとして除外したためであると考えられる。MMS で用いた手法では、LP データの密度が一樣であるため、LP データの点と点との距離に基づいて平坦部を抽出する。河川堤防は、一定の標高ごとに領域を抽出すると、天端面を含む集合のみ点群データがひとつの領域に集中し、その他の集合では、河川堤防の表側と裏側で2つ以上に領域が分散する特徴があるため、MMS で用いた手法は、河川堤防の特徴に基づいて平坦部と平坦部から続く法面を含む領域を抽出できた。

このことから、本研究では、MMS 手法で用いた平坦部領域の抽出技術を改良してブレイクライン候補線を正しく生成できない課題に対応する。しかし、河川堤防には、天端面以外にも小段などの平坦部が含まれている。また、実際の河川横断図を整理したところ、図 4.4 に示すような用水路等の構造物を挟む複数の堤防形状が並ぶ事例が見られた。そこで、本研究では、平坦部を中心に点群データを河川堤防の表側と裏側に分割し、それぞれ繰り返し平坦部を抽出する処理を追加する。また、河川堤防を一定の標高ごとに分割すると、平坦部の集合は法面の集合と比べて横断方向に広い領域となる特徴に基づいて小段などの平坦部を抽出する処理を新たに追加する。

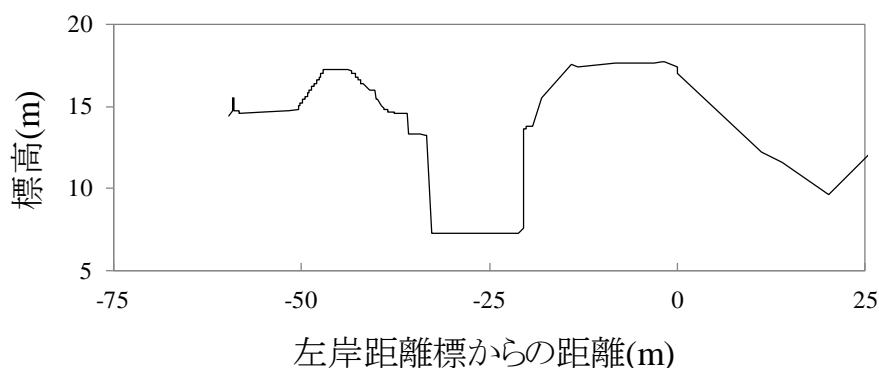


図 4.4 淀川 34.6km 地点 (左岸)

### 4.3.2 LPデータの特性を考慮したブレイクライン抽出技術の対応

天端面や小段を区別せずにブレイクラインが誤抽出される課題には、ブレイクライン候補線の高さを考慮してブレイクラインを抽出する処理にて対応する。具体的には、ブレイクライン候補線が通る高さ周辺のLPデータからブレイクラインを抽出する処理を新たに追加する。

## 4.4 LPデータの特性を考慮した河川空間モデル生成技術の提案

### 4.4.1 処理の流れ

LP手法の処理の流れを図4.5に示す。LP手法は、平坦部特定機能およびブレイクライン抽出機能、点群データ整理機能の3つの機能で構成される。LP手法は、LPデータと河川堤防の範囲と方向を示す基準線（以下、「河川堤防ガイドライン」という。）を入力して、3つの機能を経てブレイクラインを考慮して整理した点群データを生成する。河川堤防ガイドラインは、河川空間に設置された距離標を繋いだ距離標側線や、航空写真から判読した河川堤防の形状を参考に作成した河川の長手方向を示す折線などを用いる。

平坦部特定機能は、「ブレイクライン候補線を正しく生成できない課題」に対応するため、LPデータから平坦部を繰り返し特定する処理と、平坦部を統合してブレイクライン候補線を生成する処理をMMS手法に加えた7つの処理を構成される。特定範囲取得処理は、河川空間周辺の処理範囲からLPデータを取得する。標高分割処理は、標高の値を用いてLPデータを複数のレイヤに分割する。距離クラスタリング処理は、レイヤに含まれるLPデータ

を距離に基づいてクラスタリングする。平坦部評価値算出処理は、平坦部である度合いを示す平坦部評価値をレイヤごとに算出する。平坦部取得処理は、平坦部評価値と平坦部の幅の閾値とに基づき平坦部を取得する。なお、平坦部の幅が閾値未満の場合は、特定範囲分割処理を省略し、平坦部統合処理に遷移する。特定範囲分割処理は、まず、平坦部を基準に処理範囲を分割する。次に、再び距離クラスタリング結果分割処理に遷移し、処理を継続する。平坦部統合処理は、複数の平坦部を一つに統合し、ブレイクライン候補線を生成する。

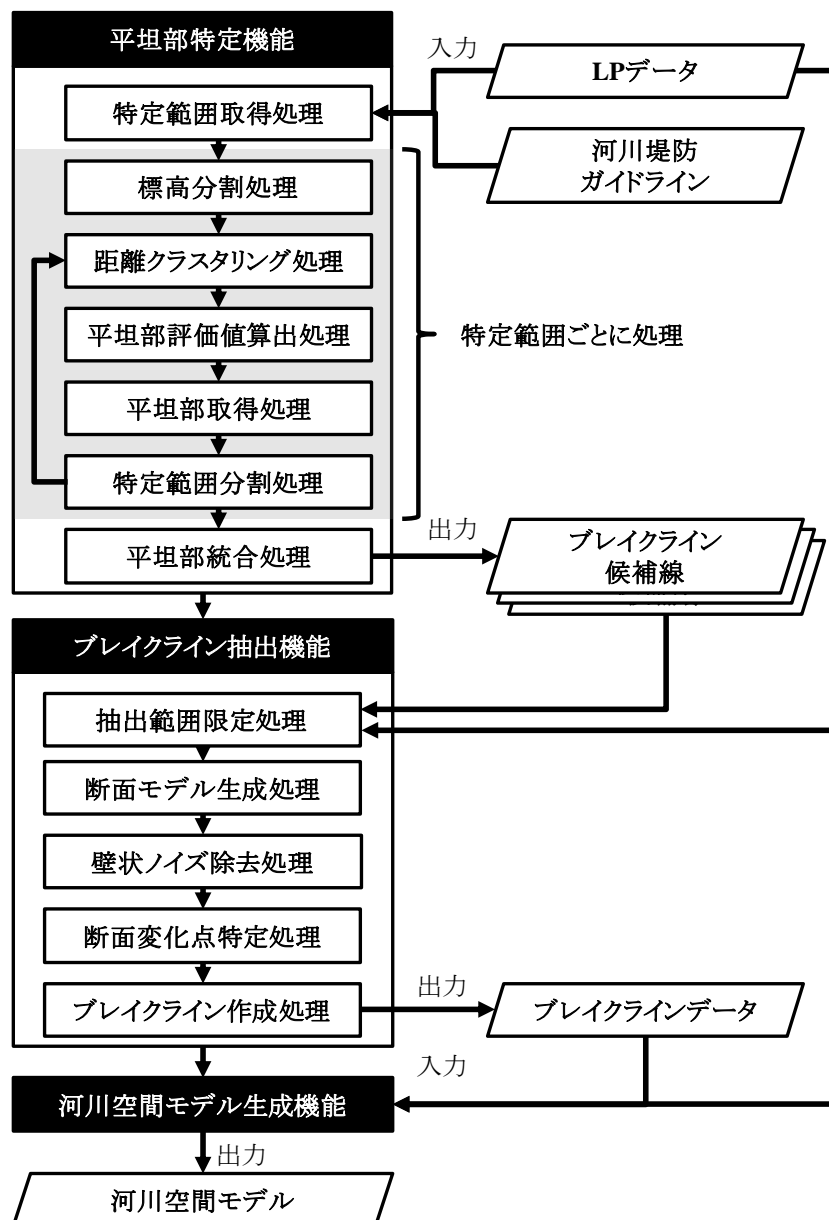


図 4.5 LP データの特性を考慮した河川空間モデル生成技術の流れ

ブレイクライン抽出機能は、「天端面や小段を区別せずにブレイクラインが誤抽出される課題」に対応するため、ブレイクライン候補線の高さを考慮した処理をMMS手法に加えた5つの処理を経て、ブレイクライン候補線の高さを考慮したブレイクラインを抽出する。抽出範囲限定処理は、ブレイクライン候補線を用いて標高を考慮した断面変化の抽出範囲を限定する。断面モデル生成処理は、各抽出範囲の点群データを用いて断面モデルを作成する。壁状ノイズ除去処理は、断面モデルを用いて天端面よりも高い標高の点群データを除去した断面モデルを作成する。断面変化点特定処理は、断面モデルから天端面と法面の交点を断面変化点として取得する。ブレイクライン作成処理は、断面変化点を繋いでブレイクラインを作成する。

河川空間モデル生成機能の詳細は、3つの処理を経てLPデータを整理した点群データを生成する。なお、各処理の詳細は、第3章の点群データ間引き機能を参照されたい。

#### 4.4.2 平坦部特定機能

本項では、第3章の天端面特定機能を拡張して、LPデータに含まれる天端面や小段などの平坦部から、それぞれブレイクライン候補線を生成する手法を提案する。本機能のアルゴリズムの流れを次に示す。ここで、LPの点群データをPとする。なお、本章では、河川に対する横断方向をX軸、縦断方向をY軸、高さ方向をZ軸として図示する。

- Step1. 特定範囲取得処理は、広範囲なLPデータから平坦部を特定する処理範囲（以下、「特定範囲」という。）を複数取得する。
- Step2. 特定範囲取得処理で取得した特定範囲ごとにStep3～Step8の処理を繰り返し実行する。
- Step3. 標高分割処理は、特定範囲の点群データを一定の標高間隔で複数のレイヤに分割する。
- Step4. クラスタリング処理は、標高分割処理にて複数のレイヤに分割された点群データを距離に基づきクラスタリングする。
- Step5. 平坦部評価値算出処理では、各レイヤのクラスタの領域外形線およびレイヤの領域面積に基づき、平坦部評価値をレイヤ単位に算出する。
- Step6. 平坦部取得処理では、算出した平坦部評価値と、平坦部の幅の閾値とに基づき平坦部を取得する。
- Step7. 平坦部が存在しない場合はStep9.へ遷移する。
- Step8. 特定範囲分割処理は、平坦部取得処理で取得した平坦部の中央線を用いて特定範囲を2つに分割し、Step3.へ遷移する。
- Step9. 平坦部統合処理では、特定範囲取得処理で取得した特定範囲間で重複する平坦部を一つに統合し、ブレイクライン候補線を生成する。

## (1) 特定範囲取得処理

本処理は、広範囲な LP データから河川堤防の平坦部を判別する前処理として、LP データから特定範囲を取得する。特定範囲取得処理の方法を図 4.6 に示す。本処理では、まず、河川堤防ガイドラインに沿って縦断方向  $v_{\text{candidate}}$ 、横断方向  $c_{\text{candidate}}$  の矩形領域を作成する。このとき、矩形領域は、縦断方向に  $v_{\text{candidate}}$  の半分だけ重ねて作成する。次に、作成した領域の範囲内から点群データを抽出する。この処理から得た特定範囲の集合を  $R=\{r_1, r_2, r_3, \dots, r_i\}$ 、特定範囲  $r_i$  の点群データを  $P_i=\{p_{(i,1)}, p_{(i,2)}, p_{(i,3)}, \dots, p_{(i,a)}\}$  とする。なお、本機能では、特定範囲  $r_i$  ごとに標高分割処理から特定範囲分割処理までの 5 つの処理をそれぞれ実施する。そのため、本章で説明する各変数の添え字  $i$  は、特定範囲を示す値とする。

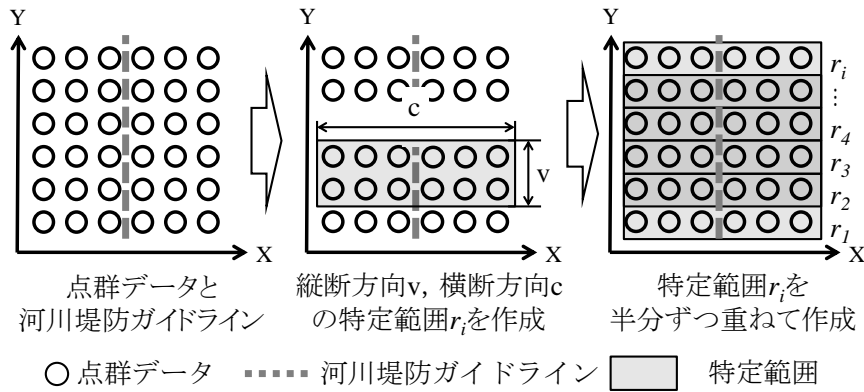


図 4.6 特定範囲取得処理

## (2) 標高分割処理

本処理は、特定範囲  $r_i$  から平坦部の領域を特定する前処理として、点群データ  $P_i$  を一定の標高間隔で複数のレイヤに分割する。標高分割処理は、図 4.7 に示すとおり、特定範囲  $r_i$  の点群データ  $P_i$  を高さ  $h$  ごとの領域（以下、「レイヤ」という。） $L_i=\{l_{(i,1)}, l_{(i,2)}, l_{(i,3)}, \dots, l_{(i,j)}\}$  に分類する。

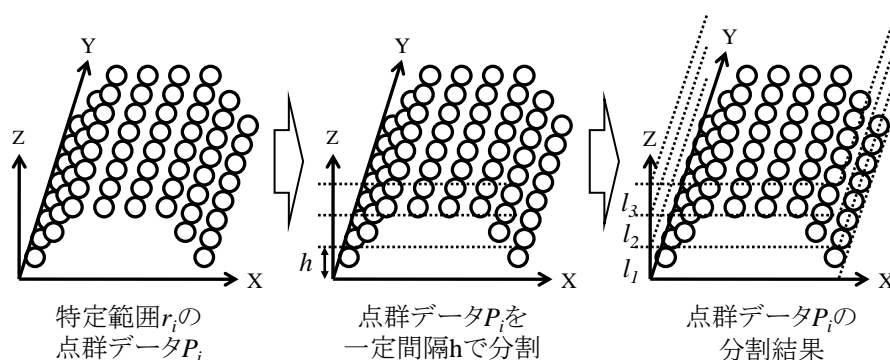


図 4.7 標高分割処理

### (3) 距離クラスタリング処理

本処理は、レイヤ内の点群データに対して計測点間の距離に基づくクラスタリングを行い、点群データをクラスタ単位に分割する。各レイヤ単位で距離に基づくクラスタリングを実行した場合、図 4.8 に示すように、点群データが一箇所に集中した平坦部のレイヤと、その他のレイヤに分類できる。具体的には、天端面や高水敷などの一箇所にクラスタが集中するレイヤと、法面や小段などの数か所に別れてクラスタが分散するレイヤとに分類される。クラスタリング対象の各点の距離に基づくクラスタリング手法として、データマイニングの一手法である DBSCAN 法がある。ただし、LP データの点群密度は一様であるため、本処理でのクラスタの所属の有無は、点間の相対的な距離のみと距離の閾値  $Eps$  を用いる。点間の相対的な距離と距離の閾値  $Eps$  に基づくクラスタリング処理の方法を図 4.9 に示す。まず、任意のレイヤ  $l_{(i,j)}$  に含まれる点群データ  $PL_{(i,j)} = \{pl_{(i,j,1)}, pl_{(i,j,2)}, pl_{(i,j,3)}, \dots, pl_{(i,j,m)}\}$  をクラスタリングする。具体的には、まず、点群データ  $PL_{(i,j)}$  から任意の点  $pl_{(i,j,m)}$  を取得する。次に、任意の点  $pl_{(i,j,m)}$  から距離  $Eps$  内の近傍点  $pl_{(i,j,m+1)}$  を同クラスタの点群として取得する。そして、クラスタに属する点群データ  $pl_{(i,j,m+1)}$  から距離  $Eps$  内の近傍点を繰り返し取得する。この処理を新たな点が取得できなくなるまで続ける。この処理から得た任意のレイヤ  $l_{(i,j)}$  のクラスタ集合を  $Cl_{(i,j)} = \{cl_{(i,j,1)}, cl_{(i,j,2)}, cl_{(i,j,3)}, \dots, cl_{(i,j,k)}\}$  とする。

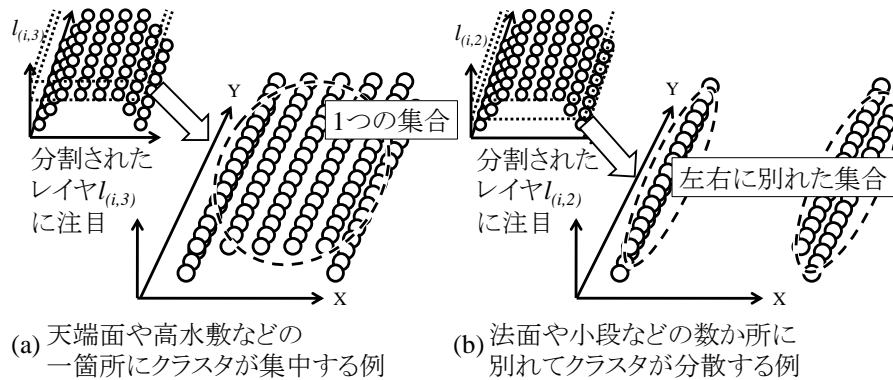


図 4.8 平坦部とその他に分類されたクラスタ

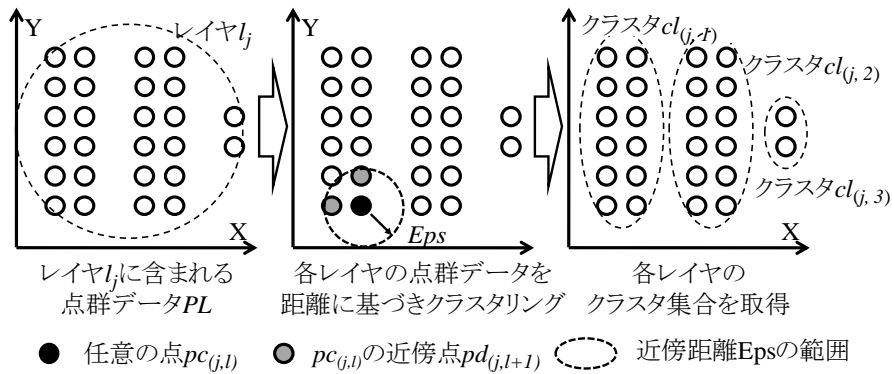


図 4.9 距離クラスタリング処理

#### (4) 平坦部評価値算出処理

本処理は、点群データの中から天端面や小段などの平坦部を特定するため、各レイヤの領域面積とレイヤに属するクラスタの領域面積との割合を用いて各レイヤの平坦部評価値を算出する。点群データは計測点間に間隙があるため、明確な領域境界を持たない。そのため、本処理では、各レイヤに含まれる点群データの領域面積を求める手法として、動的輪郭法によって取得した輪郭線から面積を算出する。動的輪郭法とは、対象を内包する閉曲線が移動と変形を繰り返して対象の輪郭を捉える手法である。

動的輪郭法によって取得した輪郭線の面積に対する平坦部候補取得処理の方法を図 4.10 に示す。まず、クラスタ集合  $Cl_{(i,j)}$  の各クラスタに含まれる点群データから、動的輪郭法を用いて領域外形線を取得し、領域外形線の面積を算出する。ここで、領域外形線の構成点を  $F = \{f_1, f_2, f_3, \dots, f_o\}$  とし、クラスタ集合  $Cl_{(i,j)}$  の各領域面積を  $Sl_{(i,j)} = \{sl_{(i,j,1)}, sl_{(i,j,2)}, sl_{(i,j,3)}, \dots, sl_{(i,j,k)}\}$  とする。各クラスタの領域面積  $sl_{(i,j,k)}$  は、式 (1) により算出する。

$$sl_{(i,j,k)} = \left| \frac{1}{2} \sum_{o=1}^{|F|} (x_o \cdot y_{o+1} - x_{o+1} \cdot y_o) \right| \quad (1)$$

式(1)の $x_o, y_o$ は、領域外形線 $F$ の頂点 $f_o$ の $x, y$ 座標である。また、 $x_{o+1}, y_{o+1}$ は頂点 $f_o$ と隣り合う点 $f_{o+1}$ の $x, y$ 座標である。次に、レイヤ集合 $L$ の各レイヤ $l_{(i,j)}$ に含まれる点群データから、前述したクラスタと同様にレイヤの領域面積 $s_{(i,j)}$ を算出する。このとき、レイヤ $l_{(i,j)}$ に含まれるクラスタの領域面積 $sl_{(i,j,k)}$ が閾値 $MinSize$ 以下であった場合、微小面積のクラスタ $cl_{(i,j,k)}$ を除去したレイヤ $l_{(i,j)}$ の点群データを用いてレイヤの領域面積を算出する。そして、レイヤの領域面積とレイヤに含まれるクラスタの領域面積とを用いて、平坦部評価値 $He_i = \{he_{(i,1)}, he_{(i,2)}, he_{(i,3)}, \dots, he_{(i,j)}\}$ を式(2)により算出する。

$$he_{(i,j)} = \frac{\sum_{k=1}^{|sl_{(i,j)}|} sl_{(i,j,k)}}{s_{(i,j)}} \quad (2)$$

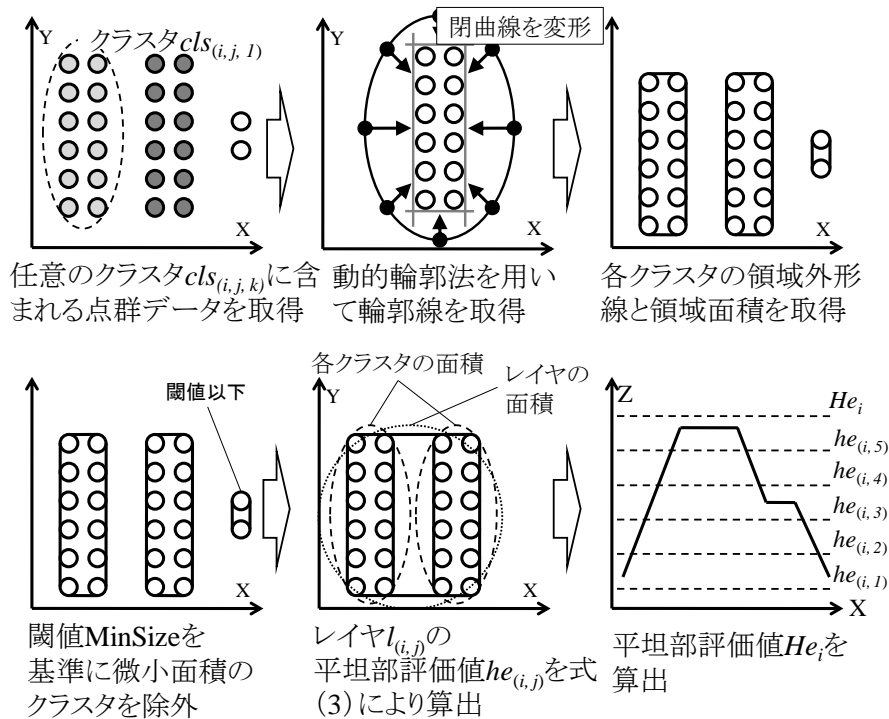


図 4.10 平坦部評価値算出処理



## (5) 平坦部取得処理

本処理は、河川堤防を一定の標高ごとの集合に分割すると、天端面を含む集合のみ点群データがひとつに集中する特徴と、平坦部の集合や法面の集合と比べて横断方向に広い領域となる特徴に基づいて平坦部のレイヤを特定する。具体的には、各レイヤの平坦部評価値  $he(i,j)$  と平坦部の幅を用いて平坦部のレイヤを特定する。平坦部の幅は、領域の中央線の長さで領域面積を算出して算出する。なお、領域の中央線は、領域外形線の構成点を最小自乗法でフィットした直線とする。平坦部評価値  $he(i,j)$  と平坦部の幅とを用いて平坦部を特定する方法を図 4.11 に示す。まず、各レイヤの領域外形線から最も平坦部評価値が高いレイヤを平坦部候補となるレイヤ（以下、「平坦部候補レイヤ」という。）として取得する。なお、複数のレイヤを取得した場合は、最も標高の高い位置のレイヤを平坦部候補レイヤとして取得する。次に、平坦部候補レイヤに含まれる点群データから、動的輪郭法を用いて領域外形線  $F$  を取得する。そして、平坦部候補レイヤの幅を算出するため、式 (3)、(4) を用いて平坦部候補レイヤの領域外形線から平坦部の中央線  $y=ax+b$  のパラメータを算出する。

$$a = \frac{\sum_{o=1}^{|F|} (x_o - t) \cdot (y_o - u)}{\sum_{o=1}^{|F|} (x_o - t)^2} \quad (3)$$

$$b = u - a \cdot t \quad (4)$$

式 (3) の  $x_o$ 、 $y_o$  は、領域外形線  $F$  の座標の集合  $X = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_o\}$ 、 $Y = \{y_1, y_2, y_3, \dots, y_o\}$  内の座標値である。また、 $t$  は  $X$  の平均値、 $u$  は  $Y$  の平均値である。そして、中央線と平坦部候補レイヤの領域外形線の 2 交点間の距離を平坦部の長さとして算出する。最後に、平坦部候補レイヤの領域面積と平坦部の長さを用いて算出した平坦部の領域幅が閾値  $hw$  以上ならば、平坦部候補レイヤを平坦部として取得する。

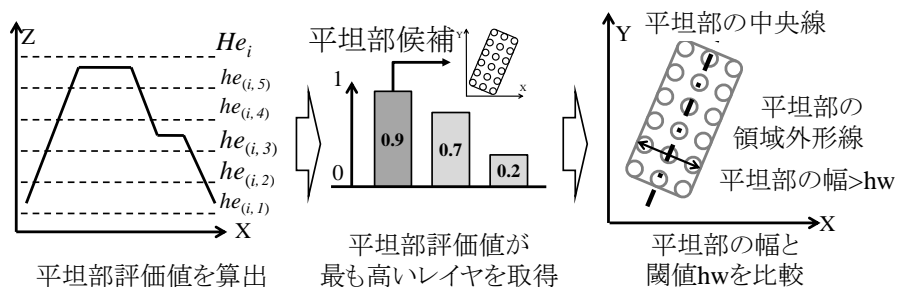


図 4.11 平坦部取得処理

### (6) 特定範囲分割処理

本処理では、河川堤防の天端面と小段、高水敷などの平坦部をそれぞれ特定するため、平坦部取得処理で取得した平坦部のレイヤに含まれる点群データを取り除き、特定範囲を分割する。本処理によって特定範囲を分割することで、河川空間に存在する天端面以外の平坦部を特定できるようにする。特定範囲の分割イメージを図 4.12 に示す。まず、 $P_i$  から平坦部に含まれる点群データを取り除く。次に、平坦部取得処理で算出した平坦部の中央線を用いて点群データを左右に分割する。ここで、左右に分割された点群データの集合を  $Ps_i = \{ ps_{(i,1)}, ps_{(i,2)}, ps_{(i,3)}, \dots, ps_{(i,q)} \}$  とする。なお、 $q$  は繰り返し分割した総数を示す。

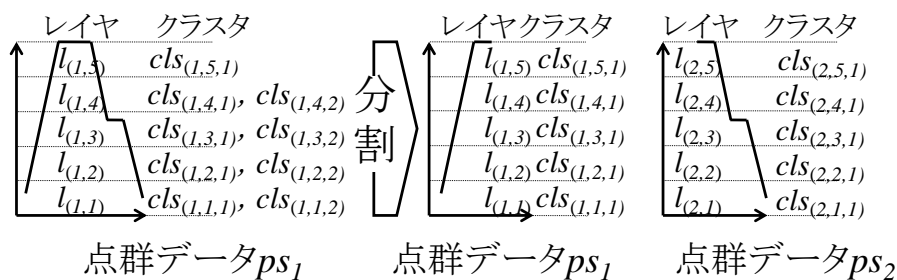


図 4.12 特定範囲分割処理

### (7) 平坦部統合処理

点群データから特定した複数の平坦部を一つに統合してブレイクライン候補線を取得するため、特定した平坦部の領域外形線を統合する。これにより、標高分割処理によって緩やかな傾斜の平坦部が複数のレイヤに分割された場合でも、1つの平坦部として統合することが出来る。平坦部統合処理の流れを図 4.13 に示す。本処理では、まず、領域  $r_i$  と隣接する領域  $r_{i+1}$  で重複する平坦部を取得する。図 4.13 に示すとおり、領域外形線は、始点

と終点が一致する閉じた折線である。そのため、平坦部の重複は、平坦部の領域外形線の交差により判定する。次に、領域外形線が交差する 2 つの平坦部を 1 つに統合する。この処理を交差する領域外形線が無くなるまで繰り返す。そして、統合された平坦部の領域外形線をブレイクライン候補線 BL candidate として取得する。

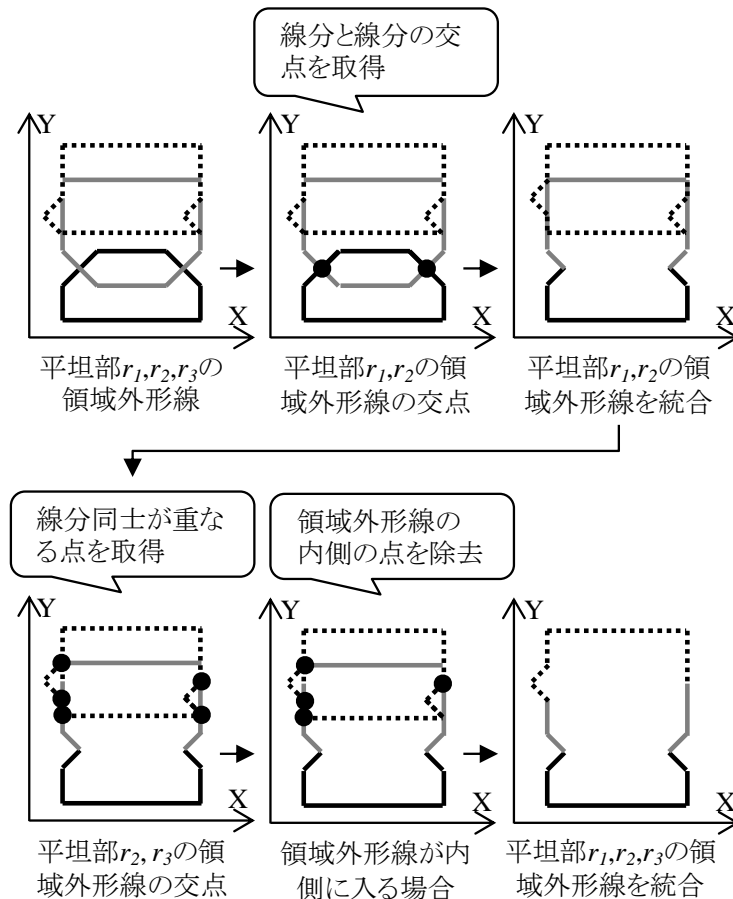


図 4.13 平坦部統合処理

#### 4.4.3 ブレイクライン抽出機能

本項では、MMS 手法のブレイクライン抽出機能を拡張して、LP データに含まれる天端面や小段などのブレイクライン候補線から、それぞれブレイクラインを抽出する手法を提案する。本機能のアルゴリズムの流れを次に示す。

- Step1. 抽出範囲限定処理では、ブレイクライン候補線を中心に抽出範囲を複数取得する。  
 Step2. 抽出範囲限定処理で取得した抽出範囲ごとに Step3～Step4 の処理を繰り返し実行する。

Step3. 断面モデル生成処理および壁状ノイズ除去処理では，抽出範囲の点群データから壁状ノイズを除去した断面モデルを生成する。

Step4. 断面変化点特定処理では，Step3 で生成した断面モデルから平坦部の断面変化点を特定する。

Step5. ブレイクライン生成処理では，断面変化点特定処理で取得した複数の断面変化点を一つに統合し，ブレイクラインを生成する。

## (1) 抽出範囲限定処理

本処理では，「天端面や小段を区別せずにブレイクラインが誤抽出される課題」に対応するため，ブレイクライン候補線を中心とする直方体領域から抽出した点群データを用いてブレイクラインを抽出する。これにより，高さの異なる平坦部のブレイクラインが誤抽出される事を防ぐ。抽出範囲の限定イメージを図 4.14 に示す。まず，ブレイクライン候補線の始点からブレイクラインに沿って，縦断方向  $v_{breakline}$  および横断方向  $c_{breakline}$ ，鉛直方向  $h$  の直方体領域を連続して作成する。次に，作成した各領域から点群データを抽出する。この処理で得た領域を  $RC = \{rc_1, rc_2, rc_3, \dots, rc_b\}$  とし， $rc_b$  に含まれる点群データを  $Pr = \{pr_1, pr_2, pr_3, \dots, pr_e\}$  とする。ここで，縦断方向  $v_{breakline}$  の値は，河川堤防の縦断勾配の影響を受けない範囲を適用する。

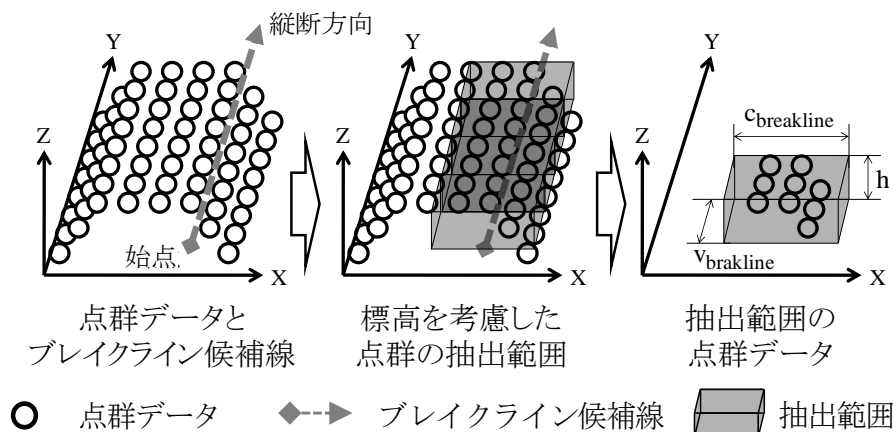


図 4.14 抽出範囲限定処理

## (2) 断面モデル生成処理

本処理では，抽出範囲限定処理によって限定した各領域  $rc_b$  の断面形状を明らかにするために，抽出した点群データ  $pr_e$  から断面モデルを生成する。断面モデルの生成イメージを図 4.15 に示す。まず，抽出範囲限定処理で抽出した点群データ  $pr_e$  を縦断方向に投影変換した

2次元の点群データ  $Pr' = \{pr'_1, pr'_2, pr'_3, \dots, pr'_e\}$  を作成する。次に、2次元の点群データ  $Pr'$  を折線近似して断面モデルを生成する。この処理で得た断面モデルの構成点を  $Px = \{px_1, px_2, px_3, \dots, px_g\}$  とする。

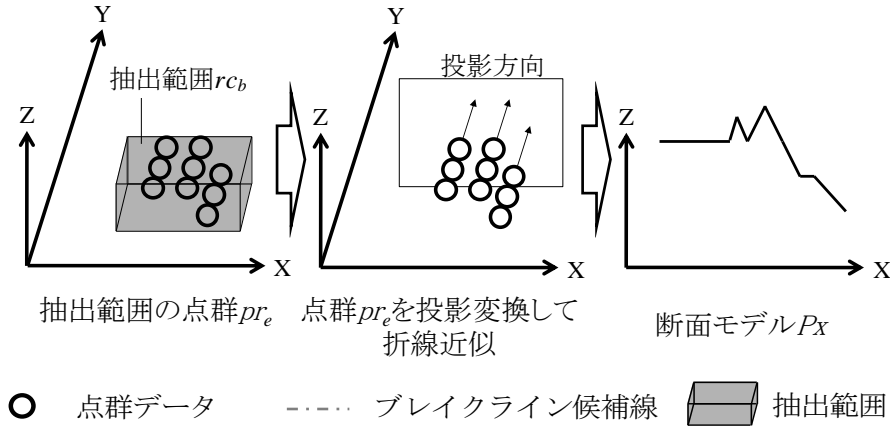


図 4.15 断面モデル生成処理

### (3) 壁状ノイズ除去処理

本処理では、断面モデル生成処理によって生成した断面モデルを利用して、平坦部よりも高い位置に存在する点群データを壁状ノイズとして取り除く。また、内挿処理によって壁状ノイズで隠れていた天端面を補間する。壁状ノイズの除去イメージを図 4.16 に示す。まず、壁状ノイズに覆われた平坦部を推定するため、断面モデル  $Px$  から、水平との角度が閾値  $\beta$  以内の線分を探索する。そして、その中から最も高い位置に存在する線分を平坦部として取得する。そして、平坦部を延長し、既存の断面モデルとの交点の中から、最も平坦部との距離が離れた交点を断面モデルに追加する。最後に、平坦部より高い点群データを断面モデルの中からノイズとして除去する。この処理で得た壁状ノイズを除去した断面モデルを  $Pm = \{pm_1, pm_2, pm_3, \dots, pm_n\}$  とする。

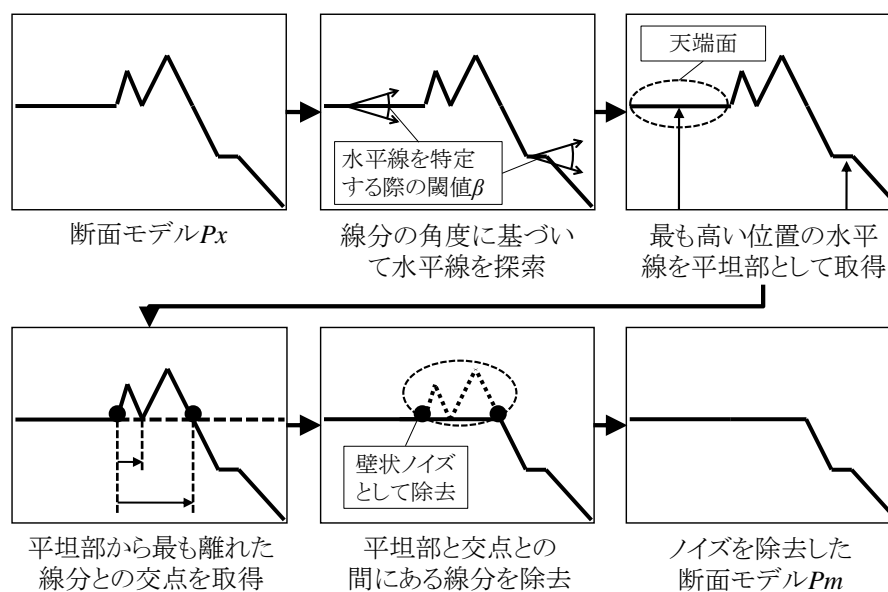


図 4.16 壁状ノイズ除去処理

#### (4) 断面変化点特定処理

本処理では、断面モデル生成処理および壁状ノイズ除去処理で生成した断面モデルから、平坦部の断面変化点を特定する。断面変化点の特定イメージを図 4.17 に示す。まず、断面モデル  $P_m$  から、水平との角度差が閾値  $\beta$  以内の線分を平坦部として抽出する。次に、平坦部から連続する水平幅が鉛直幅を上回る面を平坦部の延長として抽出する。そして、これらの抽出した面の端点の中から、最もブレイクライン候補線と距離が近い点を断面変化点として取得する。これにより、植生や風化等の影響による平坦部の変形を考慮した断面変化点が取得できる。そして、この処理から得た断面変化点を  $pc_b$  とし、各領域の断面変化点の集合を  $P_c = \{pc_1, pc_2, pc_3, \dots, pc_b\}$  とする。

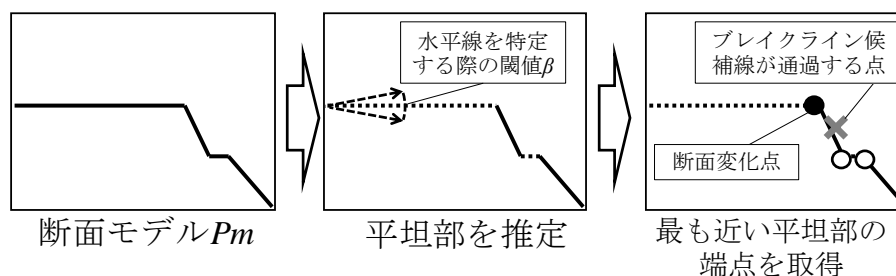


図 4.17 断面変化点特定処理

## (5) ブレイクライン作成処理

本処理では、断面変化点  $P_c$  からブレイクラインを作成する。具体的には、断面変化点  $P_c$  の各点を結んで折れ線を作成する。次に、各領域のブレイクライン候補線の始点からの距離を横軸、ブレイクライン候補線に対する各点の垂線の長さを縦軸としてメディアンフィルタによって平滑化する。そして、平滑化された断面変化点の点列  $P_c$  を各頂点とするブレイクライン  $BL_{breakline}$  を作成する。

## 4.5 実証実験

### 4.5.1 実験概要

本実験では、MMS 手法における「ブレイクライン候補線を正しく生成できない課題」と「天端面や小段を区別せずにブレイクラインが誤抽出される課題」の 2 つの課題が、LP 手法にて解消できているかを確認するため、MMS 手法と LP 手法とで生成した河川空間モデルの再現精度を比較して評価する。また、LP 手法の大規模な点群データへの適用可能性を評価するため、点群データ数と河川空間モデル生成時間の関係性を評価する。河川空間モデルの再現精度は、河川空間モデルから生成した横断面図を用いた比較と河川空間モデルの可視化による比較との 2 つの指標を用いて評価する。横断面図を用いた比較では、各手法で生成した河川空間モデルの横断面図と実際の河川管理で用いられている河川横断面図とを比較して評価する。可視化による比較では、各手法で生成した河川空間モデルを AutoCAD Civil3D 2012 で可視化し、天端面や小段などの各平坦部を再現した河川空間モデルが生成されているかを確認する。河川空間モデル生成時間の評価では、点群データ数ごとの河川空間モデルの生成時間を記録し、大規模な点群データを対象とした場合の適用可能性を確認する。

### 4.5.2 実験条件

#### (1) 実験環境と実験データ

本実験で用いた実験環境を表 4.1、実験データを表 4.2 に示す。また、評価対象の河川横断面図の計測位置 10 か所を図 4.18 に示す。計測位置は、平成 22 年度に淀川水系本川で測量された河川横断面図 186 枚の左右岸から、次の 2 つの条件に該当する 10 か所を選定した。

- 河川横断面の左右岸から河川堤防が築堤されており，天端面と小段を確認できる典型的な凸型形状の地点を選定する。
- 河川堤防における河川横断面と LP データの標高差の平均が，本研究で用いた LP データの鉛直方向の計測誤差である 25cm 以内に収まっている断面を選定する。

表 4.1 実験環境

項目	値
CPU	Inter® Core™2 Duo CPU 2.50Ghz
メモリ	4.0GB
開発環境	VisualStudio2005
開発言語	Visual C++

表 4.2 本実験で用いた点群データ

項目	MMS データ	LP データ
計測範囲	走行距離 100m 分	100m <sup>2</sup> 範囲
計測点数	約 30 万点	約 8 千点
水平方向の計測誤差	±15cm	±25~30cm
鉛直方向の計測誤差	±10cm	±25cm
計測時期	2009 年	2010 年



図 4.18 実験データ計測位置 【出典】国土地理院：地理院地図



## (2) 実験パラメータの設定

本項では、LP 手法で用いる 8 つのパラメータ  $v_{\text{candidate}}$ ,  $c_{\text{candidate}}$ ,  $hw$ ,  $Eps$ ,  $v_{\text{breakline}}$ ,  $c_{\text{breakline}}$ ,  $h$ ,  $\beta$  を実験条件として設定する。パラメータ  $v_{\text{candidate}}$  と  $c_{\text{candidate}}$  は、平坦部特定機能の特定範囲取得処理にて特定範囲を設定する際の値で、パラメータ  $v_{\text{candidate}}$  は特定範囲の縦断方向、パラメータ  $c_{\text{candidate}}$  は特定範囲の横断方向の値である。パラメータ  $hw$  は、平坦部特定機能の平坦部取得処理にて、平坦部と判定するための閾値である。パラメータ  $Eps$  は、平坦部特定機能のクラスタリング処理にて、任意の点をクラスタに含めるかどうかを判定するための閾値である。ブレイクライン抽出機能にて抽出範囲を設定する値である。そのため、パラメータ  $v_{\text{breakline}}$  と  $c_{\text{breakline}}$  は、第 3 章と同様に  $v_{\text{breakline}} = 1.0\text{m}$ ,  $c_{\text{breakline}} = 3.0\text{m}$  とする。パラメータ  $h$  は、ブレイクライン抽出機能の抽出範囲限定処理にて、点群データから処理範囲の標高を制限する値である。また、平坦部特定機能の標高分割処理にて、点群データを一定間隔の標高で分割する値である。そのため、パラメータ  $h$  は第 3 章と同様に  $h = 0.3\text{m}$  とする。パラメータ  $\beta$  は、MMS 手法と同様に断面モデルの線分の傾きから平坦部を特定する値である。そのため、パラメータ  $\beta$  は、第 3 章と同様に  $\beta = 5\%$  (2.9 度) とする。予備実験は、本実験と同様に典型的な凸型の堤防形状の LP データを用いた。なお、ブレイクライン抽出機能で用いるパラメータの値は、第 3 章を参照されたい。

### a) パラメータ $c_{\text{candidate}}$ , $v_{\text{candidate}}$

パラメータ  $c_{\text{candidate}}$  は、LP データから河川空間の平坦部を特定する処理範囲を取得する際の横断方向の値である。そのため、本実験では、河川空間を含む十分な範囲として河川法の第四節で定められている河川保全区域（河川空間を保全するため、河川管理者の指定によって一定の行為が制限される区域）の基準値である 50m の範囲を片幅の値として、 $c_{\text{candidate}} = 100\text{m}$  を設定する。予備実験では、パラメータ  $c_{\text{candidate}}$  の値を固定して、 $v_{\text{candidate}}$  の値を 10m から 30m まで、5m 間隔で変化させ、ブレイクライン候補線の生成を行った。ブレイクライン候補線の生成結果と、手作業で作成した平坦部を重ね合わせた結果を図-24 に示す。図 4.19 を確認すると、 $v_{\text{candidate}} = 10\text{m}$ ,  $v_{\text{candidate}} = 15\text{m}$  の場合、天端面や小段のブレイクライン候補線が途切れているのに対して、 $v_{\text{candidate}} = 20\text{m}$  以上の場合、天端面と小段の連続したブレイクライン候補線を生成できたことがわかる。それに対し、 $v_{\text{candidate}} = 30\text{m}$  の場合、各平坦部のブレイクライン候補線を網羅的に生成できないことがわかる。また、 $v_{\text{candidate}} = 20\text{m}$ ,  $v_{\text{candidate}} = 25\text{m}$  の天端面と小段におけるブレイクライン候補線で囲われた領域と平坦部が重なった領域の面積を比較すると、 $v_{\text{candidate}} = 20\text{m}$  が約 74%,  $v_{\text{candidate}} = 25\text{m}$  が約 68% となり、 $v_{\text{candidate}} = 20\text{m}$  の方が良い結果となった。このことから、本実験では、 $v_{\text{candidate}} = 20\text{m}$  と設定する。

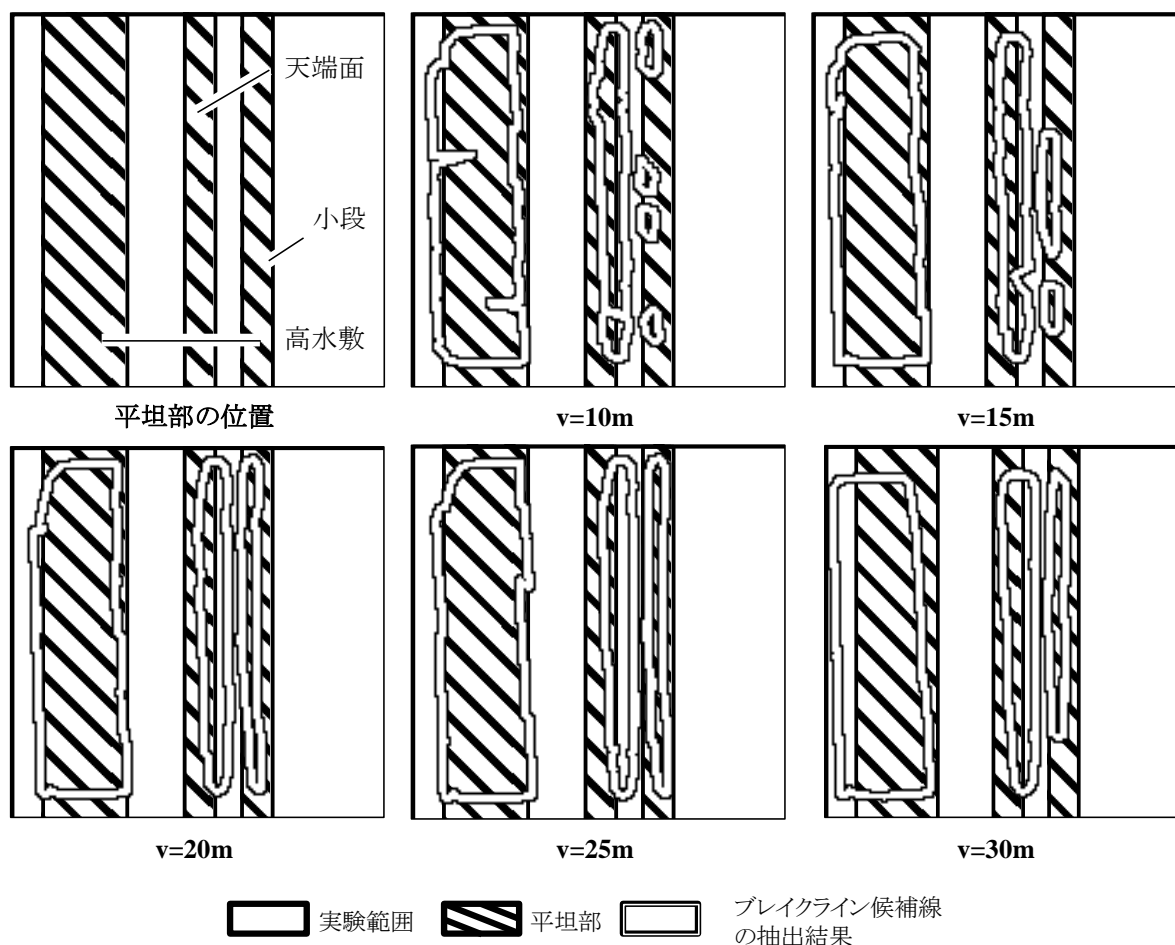


図 4.19 パラメータ  $v$  の予備実験結果

**b) パラメータ Eps**

パラメータ Eps は、本実験で利用する点群データから、各点の最近傍点までの距離の平均値を算出して利用する。そのため、各地点の点群データからそれぞれ算出した値の平均値として、Eps=1.59m を採用する。

**c) パラメータ hw**

パラメータ hw は、平坦部特定機能の平坦部特定処理にて、平坦部と判定する際の幅を設定する。小さな値を設定すると幅の狭い平坦部や傾斜の緩やかな法面からもブレイクライン候補線を生成し、ブレイクラインの誤抽出に繋がる恐れがある。一方、大きな値を設定すると、平坦部を特定できず、重要なブレイクラインを逃す可能性がある。本実験では、国土交通省の定める河川構造令の第二十三条で定められている小段幅の最小値を参照して、hw=3m とする。

### 4.5.3 実験の内容

本実験では、MMS 手法を用いて作成した 河川空間モデル（以下、MMS 手法モデル）および LP 手法を用いて作成した河川空間モデル（以下、LP 手法モデル）を用意し、その再現精度を比較・評価する。MMS 手法モデルと LP 手法モデルの再現精度は、河川横断図を用いて次の手順により評価する。

- Step1.MMS 手法モデルと LP 手法モデルから、河川横断図と同じ位置の断面形状を取得する。
- Step2.Step 1 で取得した断面形状と河川横断図を重ね合わせる
- Step3.図 4.20 に示すとおり、河川横断図上に 10cm 間隔で評価点を設定した。そして、その評価点毎に断面形状との標高差を算出する。
- Step4.Step3 で算出した標高差を天端面および小段ごとに集計する。なお、集計の評価レベルは、表 4.3 のとおり設定した。
- Step5.MMS 手法モデルと LP 手法モデルの生成に必要とした時間を機能ごとに記録する。

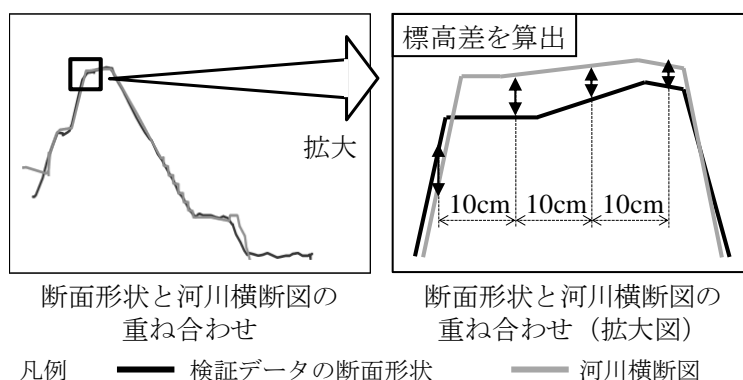


図 4.20 MMS 手法モデルと LP 手法モデルの評価方法

表 4.3 評価レベル

評価レベル	標高差の範囲
A 評価	0cm～15cm 未満
B 評価	15cm～30cm 未満
C 評価	30cm 以上

本実験にて、MMS 手法モデルと LP 手法モデルとを比較・評価することで、「ブレイクライン候補線を正しく生成できない課題」が解決できているかを確認する。また、LP 手法モデルを可視化して評価することで、「天端面や小段を区別せずにブレイクラインが誤抽出

される課題」が解決できているかを確認する。

#### 4.5.4 実験結果と考察

##### (1) 河川横断面を用いた評価

MMS 手法モデルと LP 手法モデルの評価結果を表 4.4 と表 4.5 に示す。各表の A 評価の中で、最も高精度な値を強調している。表 4.4 と表 4.5 の小段の区間を確認すると、LP 手法モデルが、MMS 手法モデルと比較してより高精度に小段を再現できていることがわかった。具体的には、LP 手法モデルは、5 つの地点で MMS 手法モデルの小段の再現精度を上回った。そのため、表 4.4 と表 4.5 が示す MMS 手法と LP 手法の再現精度の差が、統計的に有意差であるかを確認するため、天端面と小段の標高差を用いてそれぞれ t 検定を実施した。まず、MMS 手法と LP 手法の標高差の分布は天端面と小段のどちらも等分散であったため、スチューデントの方法による t 検定を実施した結果、天端面において  $t(9922) = 1.96, p > 0.05$ 、小段において  $t(10524) = 1.96, p < 0.05$  となった。このことから、小段における MMS 手法と LP 手法とは有意差があり、LP 手法の有効性が明らかとなった。

表 4.4 河川横断図と MMS 手法の横断図との標高差の集計結果

		天端面			小段			全体		
		A 評価	B 評価	C 評価	A 評価	B 評価	C 評価	A 評価	B 評価	C 評価
0.6km 地点 (左岸)	点数	<b>761</b>	0	0	384	13	0	7,006	732	860
	割合	<b>1.00</b>	0.00	0.00	0.97	0.03	0.00	0.81	0.09	0.10
2.4km 地点 (左岸)	点数	<b>727</b>	0	0	<b>310</b>	85	13	<b>5,306</b>	727	1,611
	割合	<b>1.00</b>	0.00	0.00	<b>0.76</b>	0.21	0.03	<b>0.69</b>	0.10	0.21
10.6km 地点 (左岸)	点数	<b>524</b>	0	0	<b>346</b>	0	0	<b>7,394</b>	939	107
	割合	<b>1.00</b>	0.00	0.00	<b>1.00</b>	0.00	0.00	<b>0.88</b>	0.11	0.01
10.6km 地点 (右岸)	点数	<b>319</b>	0	0	1,422	40	20	5,337	1,513	1,303
	割合	<b>1.00</b>	0.00	0.00	0.96	0.03	0.01	0.65	0.19	0.16
12.0km 地点 (左岸)	点数	<b>416</b>	0	0	<b>367</b>	0	0	<b>7,824</b>	1,891	241
	割合	<b>1.00</b>	0.00	0.00	<b>1.00</b>	0.00	0.00	<b>0.79</b>	0.19	0.02
12.0km 地点 (右岸)	点数	<b>350</b>	38	0	<b>354</b>	0	0	4,022	1,660	3,679
	割合	<b>0.90</b>	0.10	0.00	<b>1.00</b>	0.00	0.00	0.43	0.18	0.39
20.8km 地点 (左岸)	点数	<b>387</b>	28	0	158	345	0	4,662	1,213	3,282
	割合	<b>0.93</b>	0.07	0.00	0.31	0.69	0.00	0.51	0.13	0.36
20.8km 地点 (右岸)	点数	<b>455</b>	0	0	449	52	0	<b>6,518</b>	1,458	389
	割合	<b>1.00</b>	0.00	0.00	0.90	0.10	0.00	<b>0.78</b>	0.17	0.05
23.4km 地点 (左岸)	点数	<b>451</b>	15	0	271	287	0	4,361	1,399	3,213
	割合	<b>0.97</b>	0.03	0.00	0.49	0.51	0.00	0.49	0.16	0.36
30.0km 左岸 (右岸)	点数	<b>363</b>	0	0	<b>328</b>	2	0	6,599	1,450	706
	割合	<b>1.00</b>	0.00	0.00	<b>0.99</b>	0.01	0.00	0.75	0.17	0.08

表 4.5 河川横断図と LP 手法の横断図との標高差の集計結果

		天端面			小段			全体		
		A 評価	B 評価	C 評価	A 評価	B 評価	C 評価	A 評価	B 評価	C 評価
0.6km 地点 (左岸)	点数	<u>761</u>	0	0	<u>397</u>	0	0	<u>7,023</u>	727	848
	割合	<u>1.00</u>	0.00	0.00	<u>1.00</u>	0.00	0.00	<u>0.82</u>	0.08	0.10
2.4km 地点 (左岸)	点数	<u>727</u>	0	0	<u>310</u>	85	13	5,225	808	1,611
	割合	<u>1.00</u>	0.00	0.00	<u>0.76</u>	0.21	0.03	0.69	0.10	0.21
10.6km 地点 (左岸)	点数	<u>524</u>	0	0	<u>346</u>	0	0	<u>7,394</u>	939	107
	割合	<u>1.00</u>	0.00	0.00	<u>1.00</u>	0.00	0.00	<u>0.88</u>	0.11	0.01
10.6km 地点 (右岸)	点数	<u>319</u>	0	0	<u>1,465</u>	17	0	<u>5,489</u>	1,494	1,170
	割合	<u>1.00</u>	0.00	0.00	<u>0.99</u>	0.01	0.00	<u>0.67</u>	0.18	0.14
12.0km 地点 (左岸)	点数	<u>416</u>	0	0	<u>367</u>	0	0	<u>7,824</u>	1,891	241
	割合	<u>1.00</u>	0.00	0.00	<u>1.00</u>	0.00	0.00	<u>0.79</u>	0.19	0.02
12.0km 地点 (右岸)	点数	<u>350</u>	38	0	<u>354</u>	0	0	<u>4,056</u>	1,621	3,675
	割合	<u>0.90</u>	0.10	0.00	<u>1.00</u>	0.00	0.00	<u>0.43</u>	0.17	0.39
20.8km 地点 (左岸)	点数	<u>387</u>	28	0	<u>182</u>	321	0	<u>4,676</u>	1,199	3,282
	割合	<u>0.93</u>	0.07	0.00	<u>0.36</u>	0.64	0.00	<u>0.51</u>	0.13	0.36
20.8km 地点 (右岸)	点数	<u>455</u>	0	0	<u>501</u>	0	0	<u>6,518</u>	1,458	389
	割合	<u>1.00</u>	0.00	0.00	<u>1.00</u>	0.00	0.00	<u>0.78</u>	0.17	0.05
23.4km 地点 (左岸)	点数	<u>451</u>	15	0	<u>280</u>	278	0	<u>4,372</u>	1,390	3,213
	割合	<u>0.97</u>	0.03	0.00	<u>0.50</u>	0.50	0.00	<u>0.49</u>	0.15	0.36
30.0km 左岸 (右岸)	点数	<u>363</u>	0	0	<u>328</u>	2	0	<u>6,663</u>	1,386	706
	割合	<u>1.00</u>	0.00	0.00	<u>0.99</u>	0.01	0.00	<u>0.76</u>	0.16	0.08

## (2) 3次元モデルの可視化による評価

表 4.4 と表 4.5 で小段の A 評価が向上した中から、特徴的な 2 地点(0.6km 地点の左岸, 10.6km 地点の右岸) の MMS モデルおよび LP モデルを AutoCAD Civil 3D を用いて可視化した。MMS 手法モデルを図 4.21, LP 手法モデルを図 4.22 に示す。なお、各図の中で、天端面および小段のブレイクライン抽出結果のみ強調して可視化している。0.6km 地点の左岸は、ブレイクライン抽出処理の際に天端面と小段が処理範囲に入る典型的な堤防形状の地点である。10.6km 地点の左岸は、天端面と小段の位置が離れた堤防形状である。

図 4.21 と図 4.22 を比較すると、MMS 手法では天端面のブレイクライン候補線のみを再現しているのに対して、LP 手法では、天端面や小段のブレイクライン候補線をそれぞれ再現していることがわかる。また、10.6km 地点(右岸)を比較することで、LP 手法では、緩やかな曲線を描く天端面が再現できていることがわかる。このことから、LP 手法の平坦部特定機能によって、天端面や小段など複数の平坦部からブレイクラインがそれぞれ抽出できており、「ブレイクライン候補線を正しく生成できない課題」を解決できていることが明らかとなった。

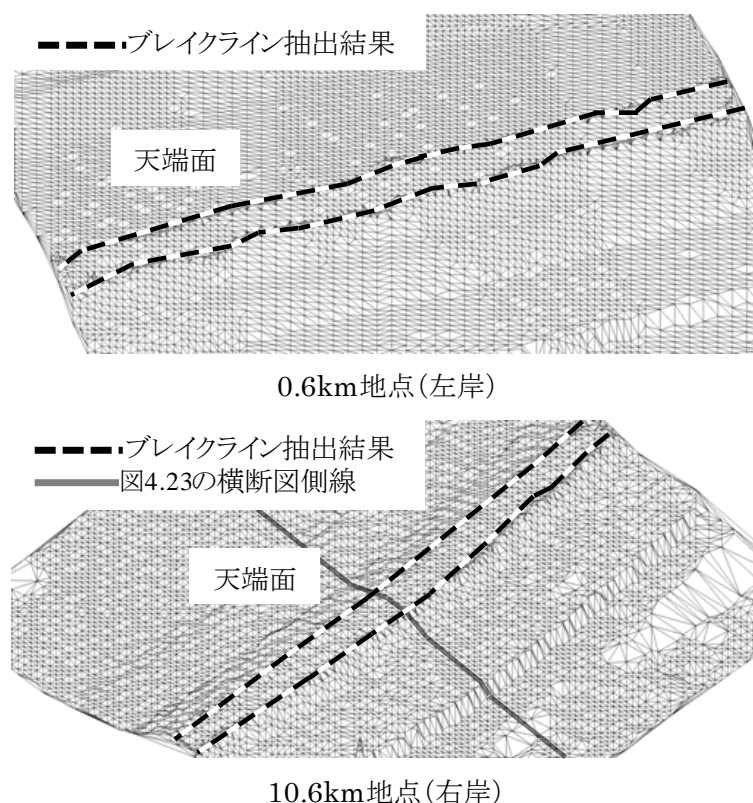


図 4.21 MMS 手法モデルの可視化結果

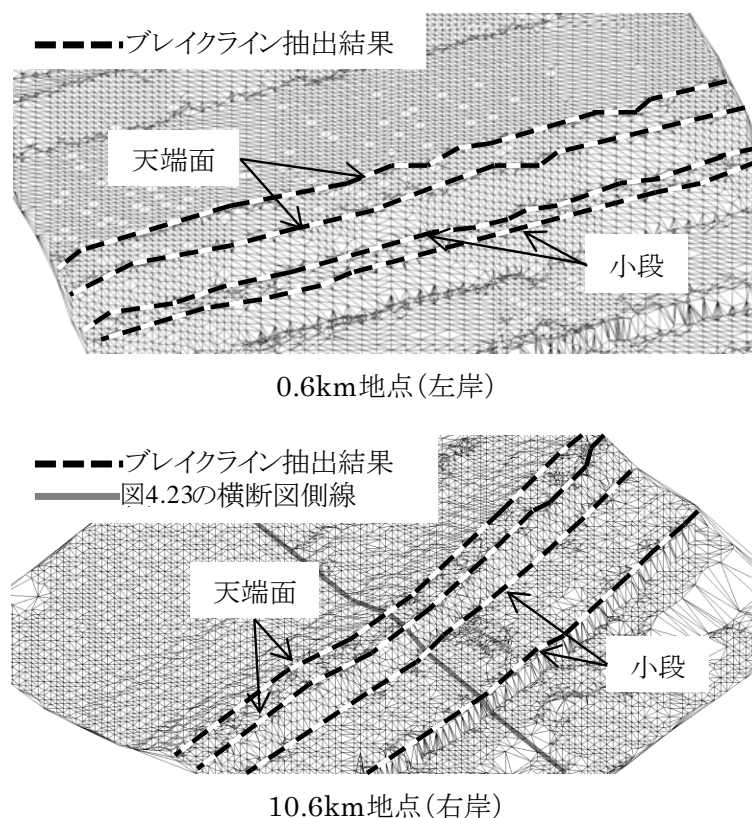


図 4.22 LP 手法モデルの可視化結果

図 4.22 を確認すると、小段のブレイクラインが天端面のブレイクラインとして誤抽出されることなく、河川堤防のブレイクラインがそれぞれ正しく抽出できていることがわかる。また、天端面の法肩・法尻および小段の法肩・法尻のブレイクラインがそれぞれ再現されており、典型的な凸型形状の河川堤防を正しく再現できていることがわかる。しかし、10.6km 地点(右岸)において図 4.21 と図 4.22 では天端面の幅が異なるが、表 4.4 と表 4.5 の集計結果では、同様の有意な差が見られない結果となった。そこで、図 4.22 の 10.6km 地点(右岸)に示す側線から、MMS 手法モデル、LP 手法モデルおよびブレイクラインを用いない 3 次元モデル(以下、グリッドモデル)の横断面を生成し、河川横断面と重ね合わせて可視化した。可視化結果を図 4.23 に示す。グリッドモデルの横断面を確認すると、天端面の評価範囲内で断面形状が変化していることがわかる。これに対して、MMS 手法モデルと LP 手法モデルの横断面を確認すると、MMS 手法モデルでは、河川横断面の断面変化点と異なる位置のブレイクラインを抽出している。LP 手法モデルの横断面は、河川横断面と同様の断面変化点を通るブレイクラインを抽出している。しかし、天端面の評価範囲では河川横断面と断面形状が一致していることがわかった。また、グリッドモデルと河川横断面図を比較すると、グリッドモデルでは、天端面左の法面上に植生などの点が存在する事が分かる。これらのことから、LP 手法のブレイクライン抽出機能によって、天端面と小段



面のブレイクラインがそれぞれ抽出できており、「天端面や小段を区別せずにブレイクラインが誤抽出される課題」を解決できていることが明らかとなった。

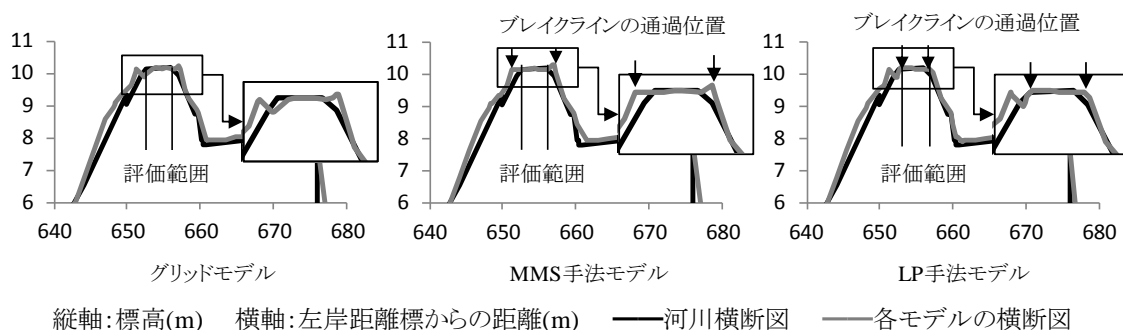


図 4.23 10.6km 地点（右岸）横断形状の可視化結果

### (3) 3次元モデル生成時間の評価

MMS 手法や LP 手法を用いた 3次元モデルの生成では、点群データの読み込み、ブレイクライン候補線の生成、ブレイクラインの抽出、点群データの整理の 4つのステップにかかるトータルの処理時間を計測した。MMS 手法モデルと LP 手法モデル生成の処理時間を表 4.6 に示す。MMS 手法モデルと LP 手法モデル生成の処理時間は、河川横断面の計測位置 10 か所の 3次元モデル生成の処理時間の平均を計測した。表 4.6 を確認すると、約 8千点の LP データから、MMS 手法モデルは平均 3.69 秒、LP 手法モデルは平均 7.61 秒で生成できる事がわかる。

表 4.6 処理時間

処理	MMS 手法 (秒)	LP 手法 (秒)
点群データの読み込み		0.22
ブレイクライン候補線の生成	1.41	4.58
ブレイクラインの抽出	0.11	0.11
点群データの整理	1.95	2.71
合計	3.69	7.61

計測範囲を  $100\text{m}^2$  から  $1000\text{m}^2$  まで河川の長手方向に  $100\text{m}^2$  ずつ延長した場合の点群データ数と処理時間の関係を図 4.24 に示す。図 4.24 を確認すると、点群データ数と 3次元モデル生成の処理時間は、線形的に増加する傾向であることがわかる。また、1分以内に処理可能な点群データの最大数は、河川の長手方向  $800\text{m}^2$  に延伸した約 7万点であることが分かる。これらの結果から、淀川水系本川の距離標区間 37.2km を対象とした場合は、約 47

分で淀川水系本川を 3 次元モデル化できると考えられる。

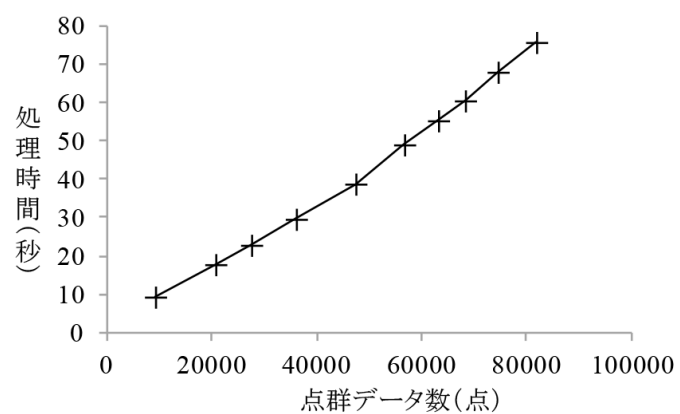


図 4.24 点群データ数と処理時間の関係

## 第5章 災害時における河川空間モデルを活用した 被害箇所の検出手法の提案

### 5.1 研究の概要

災害前後の LP データから災害時の被害箇所を検出するためには、「災害時に河川堤防の変状把握が困難な課題」を解決する必要がある。本研究では、災害前後の LP データから生成した河川空間モデルを重畳して、ブレイクラインの変化を検出することで形状的な変化を把握する手法を提案する。そして、東日本大震災で得られた LP データを用いて実証実験を行い、提案手法の有用性を評価する。

### 5.2 被災状況の調査

#### (1) 調査目的

本章では、震災前後のブレイクラインの変化を確認することが、河川堤防の被害箇所の候補地特定に活用可能であるかを検証するため、東日本大震災で甚大な被害を受けた北上川流域の被害箇所の状態を類型化する。そして、類型化した結果を分析することで、本研究の課題の解決に寄与可能であるかを評価する。震災による河川堤防の被害箇所とその特徴の調査結果を次に示す。

#### (2) 調査内容

本調査では、震災による河川堤防の被害の特性を把握するため、北上川流域の中でも、主な被害箇所である7件中の5件（うち、4件が緊急復旧工事の対象）が含まれている KP 0.0 から KP 14.0 (図 5.1) を対象に被害箇所の状況を整理・分類する。本調査の手順を次に示す。

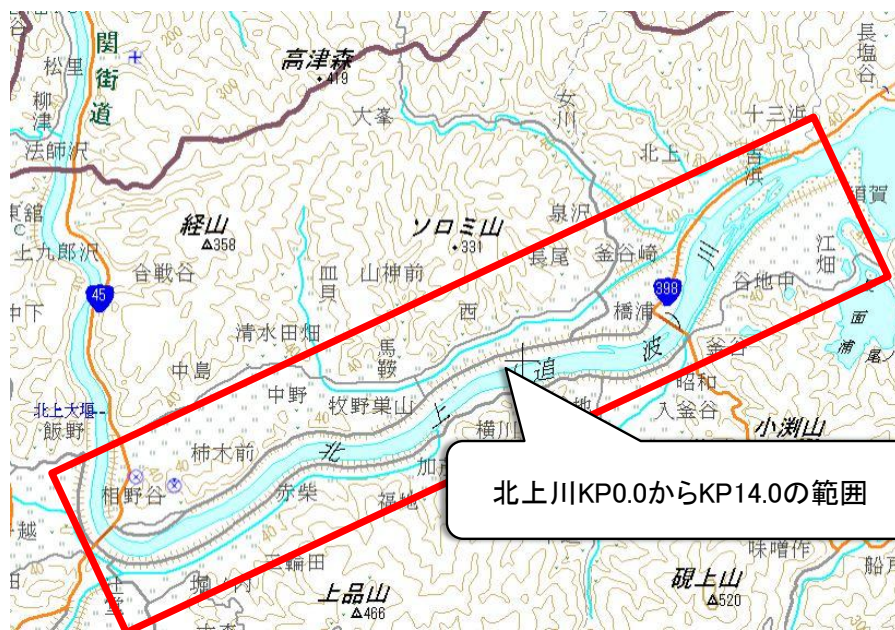


図 5.1 北上川流域の中でも主な被害箇所

【出典】国土交通省：地理院地図

1. 北上川 KP 0.0 から KP 14.0 の範囲が含まれる震災後の LP データを用いて河川空間モデルを生成
2. 北上川 KP 0.0 から KP 14.0 の範囲が含まれる震災前の LP データを国土地理院が公開する座標補正パラメータを用いて補正し，河川空間モデルを生成
3. 震災前後の河川空間モデルを重ね合わせ
4. 東北地方整備局より提供された北上川流域の河川堤防の被害箇所の位置情報を参考に，被害が確認された 40 箇所と被害が確認されなかった 5 箇所を対象として横断図を生成
5. 生成した震災前後の横断図（震災前 45 枚，震災後 45 枚）を比較し，被害の特性を類型化

本調査では，被害の特性を把握するため，堤体の形状的な変化が法面，天端面，法肩などの部分に集中的に発生しているかを類型化する。

### (3) 調査結果

生成した震災前後の横断図を重ね合わせ，震災による影響を確認したところ，主に図 5.2 に示す3種類のパターンに類型化された。類型化された震災による影響の集計結果を表 5.1 に示す。パターンAに類型化された断面は11枚あり，断面形状に大きな違いは無いが，堤防

そのものが地盤沈下により標高が下がっている状態である。パターンBに類型化された断面は9枚あり、地盤沈下の影響は少ないが、法肩が大きく削れて天端面の幅が狭まっている状態である。パターンCに類型化された断面は25枚あり、地盤沈下の影響と天端の形状変化の両方の被害が発生している状態である。これらのことから、被害が確認された箇所85% (40枚中34枚) に断面形状の変化が見られ、一方、被害が確認されなかった箇所の大半に天端面の沈下が見られることが明らかとなった。

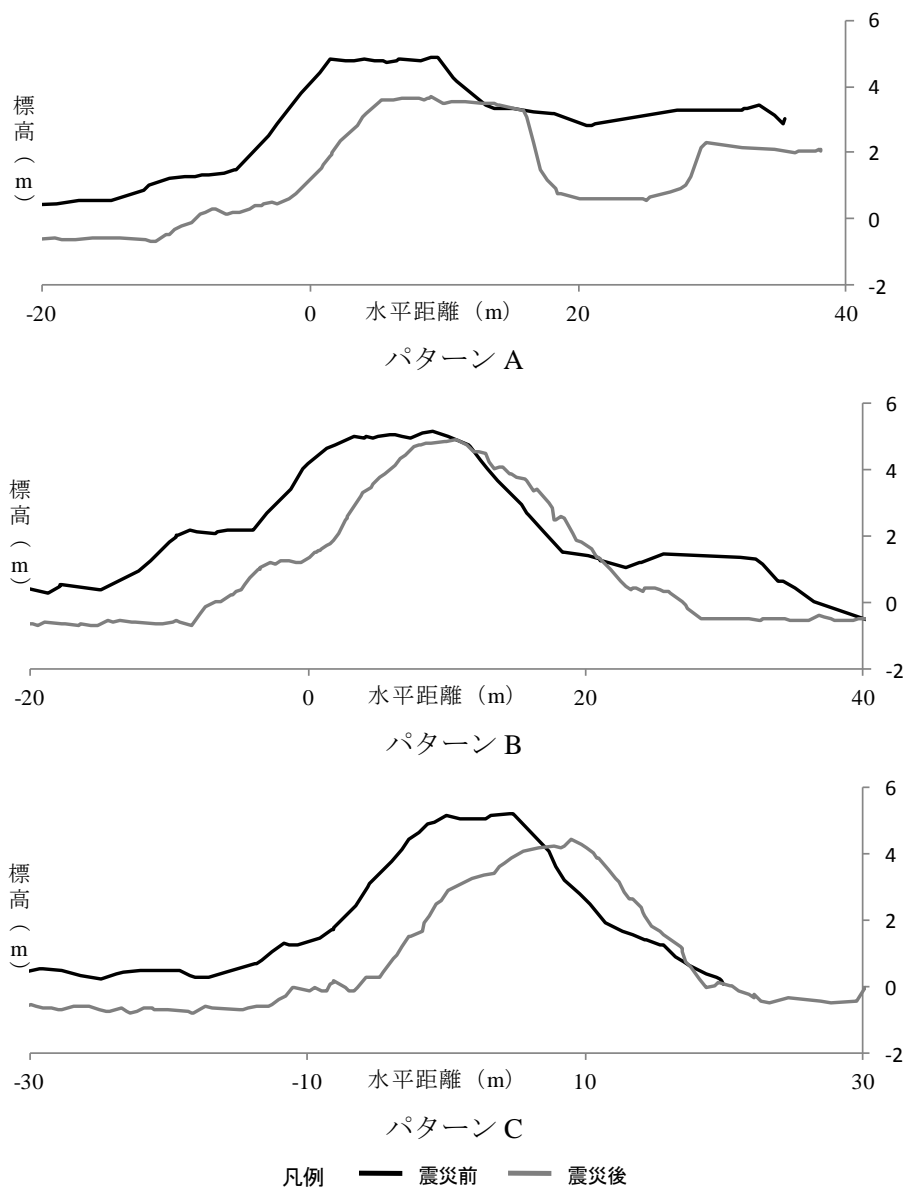


図 5.2 河川堤防横断面の類型例

表 5.1 震災による影響の集計結果

分類	類型内容	被害有	被害無
パターンA	天端面の沈下	6	5
パターンB	断面形状の変化	9	0
パターンC	天端面の沈下 + 断面形状の変化	25	0

法面、天端面、法肩のどの部分に集中的に被害が発生しているかを明らかにするため、断面形状の変化が見られた34枚の横断図を形状変化の箇所に基づき整理した結果、表 5.2 のように類型化された。なお、集計時に参考とした、法面、天端面、法肩の形状変化の判断基準は、図-3に示すとおりである。集計結果を確認すると、すべての横断図において法肩が変化していることが明らかとなった。これらの調査結果から、震災前後の河川堤防の比較において被害箇所候補を効率的に検出するためには、法肩の変化を検出することと、天端面の沈下に伴うノイズを調整可能な仕組みが必要であることが明らかとなった。

表 5.2 形状変化の整理結果

形状変化	被害有
法面のみ	0
天端のみ	0
法肩のみ	31
法面+天端面	0
法肩+天端面	3
法面+法肩	0
法面+法肩+天端面	0

#### (4) 被害箇所の検出手法の検討

本研究では、前者の法肩の変化の検出には、河川堤防の法肩をつないだ特徴稜線であるブレイクラインの震災前後での変化を把握することで対応する。また、後者のノイズに対しては、変化量に応じて被害検出の有無を調整することで対応する。このことにより、被害箇所を把握できると考えられる。

## 5.3 河川空間モデルを用いた被害箇所の検出技術の提案

### 5.3.1 処理の流れ

本研究は、震災前後のブレイクラインを比較して差分を検出することで、河川堤防の被害箇所候補を検出するシステムを開発する。本システムの処理の流れを図 5.3 に示す。

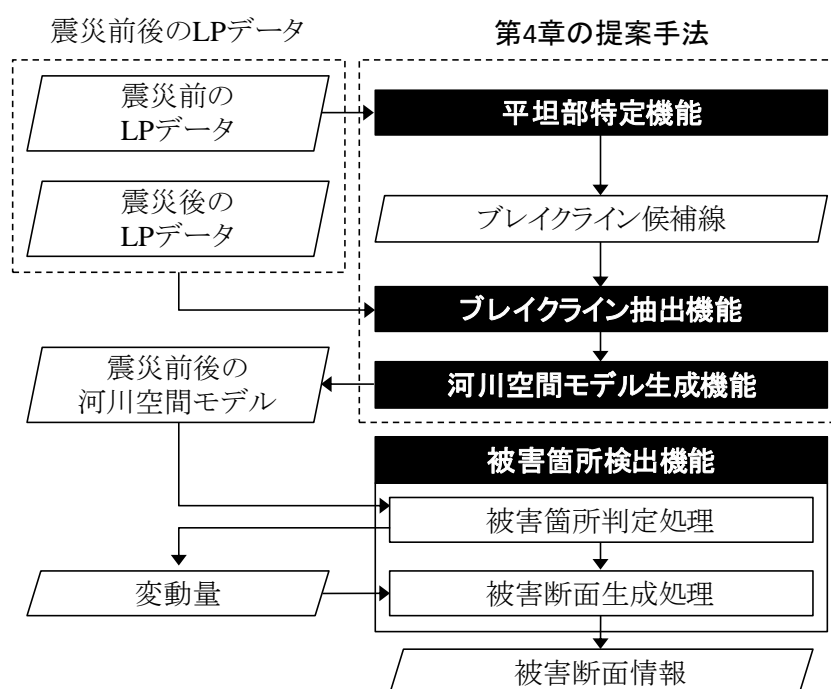


図 5.3 河川空間モデルを用いた被害箇所の検出技術の流れ

本システムは、第 4 章の河川空間モデル生成技術の 3 つの機能と被害箇所検出機能との 4 つの機能で構成される。入力データは、震災発生前に蓄積された LP データと、震災発生直後に測量された LP データとする。出力データは、震災による被害箇所とその被害箇所の震災前後の河川堤防の横断図とする。本システムの処理の流れは、まず、震災前の LP データから、平坦部特定機能を用いてブレイクライン候補線を取得する。次に、震災前のブレイクライン候補線を用いて、震災前後の LP データからブレイクラインを抽出し、河川空間モデルを生成する。そして、被害箇所検出機能を用いて震災前後のブレイクラインを比較し、変化量に基づき被害箇所を検出する。

## 5.4 被害箇所検出機能

### 5.4.1 被害箇所判定処理

本機能は、図 5.4に示すとおり、まず、震災前のブレイクラインを10cm間隔で分割した点（以下、「評価点」という。） $P=\{p_1, p_2, p_3, \dots, p_i\}$ を取得する。ここで、複数の断面点列をつないだブレイクライン $B=\{b_1, b_2, b_3, \dots, b_j\}$ の各線 $b_j$ は、xyz座標 $(x_{bj}, y_{bj}, z_{bj})$ を通り、ベクトル $(vx_{bj}, vy_{bj}, vz_{bj})$ で向きが表されている折線とし、評価点 $p_i$ のxyz座標は $(x_{pi}, y_{pi}, z_{pi})$ とする。次に、任意の評価点 $p_i$ から震災後のブレイクライン $B$ への距離 $MD(p_i, b_j)$ を次の式(1)にて算出する。

$$MD(p_i, b_j) = \sqrt{\frac{vx_{bj} \cdot (x_{pi} - x_{bj}) + vy_{bj} \cdot (y_{pi} - y_{bj}) + vz_{bj} \cdot (z_{pi} - z_{bj})}{vx_{bj}^2 + vy_{bj}^2 + vz_{bj}^2}} \quad (1)$$

そして、算出した $MD$ の最短距離をそのポイント $p_i$ の変化量として取得し、ユーザが指定したブレイクラインの変化量の閾値 $near$ 以上の値であった場合に、被害箇所として検出する。

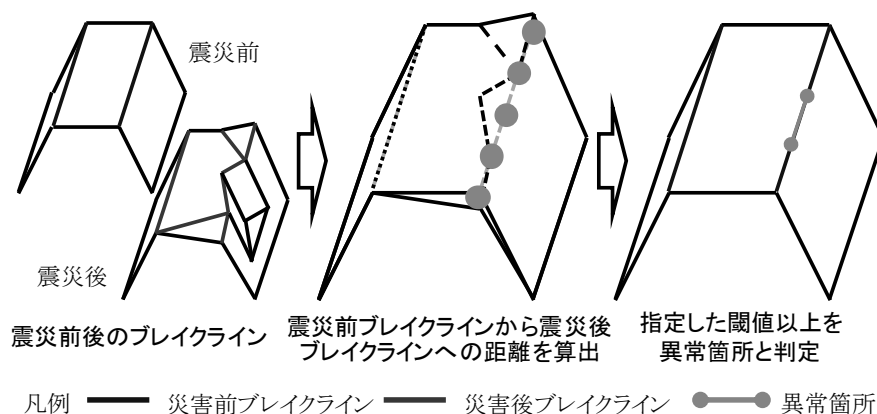


図 5.4 被害箇所検出処理の概要

### 5.4.2 被害断面生成処理

本機能は、図 5.5に示すとおり、震災前後のLPデータを用いて生成した河川空間モデルから、被害箇所候補を参考に震災前後の断面図を作成する。まず、被害箇所候補の位置を参考に被害が甚大である箇所をユーザが指定する。そして、ユーザが指定した任意の位置で震災前後のブレイクラインに直交する断面を生成した後、震災による被害箇所候補の被害断面を生成する。



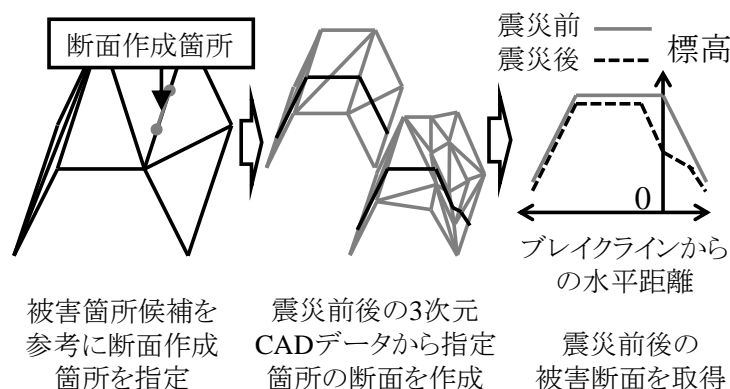


図 5.5 被災断面生成処理の概要

## 5.5 震災前後の河川空間モデルを用いた評価実験

### 5.5.1 実験目的

本実験では、災害対応の経験を持つ河川管理者の助言の下、東日本大震災で甚大な被害が発生した北上川下流域を対象に、震災前後のLPデータを用いて被災箇所の候補を検出可能であるかを評価し、本手法の有用性を検証する。なお、被災箇所候補の検出および河川空間モデルの生成には、震災前のLPデータとして治水安全度評価<sup>2)</sup>における航空レーザ測量成果、震災後のLPデータとして国土地理院から提供を受けた東日本大震災における航空レーザ測量成果を用いる。

### 5.5.2 対象エリア選定

本評価実験では、次の3つの選定条件を設定し、震災後の状況を踏まえて対象エリアを選定した。

- 北上川下流域の浸水範囲であること
- 震災状況が甚大な箇所であること
- 堤防形状が大きく変化し緊急復旧が必要な箇所であること

対象エリアは、国土地理院からの提供の浸水範囲概況図などの資料や災害対応の経験を有した河川管理者の助言を参考にするとともに、現地踏査を経て、上述の3つの条件を満たす箇所(図 5.6)を選定した。なお、図 5.6には、国土地理院から提供を受けた浸水範囲概況図も重ね合わせて示している。

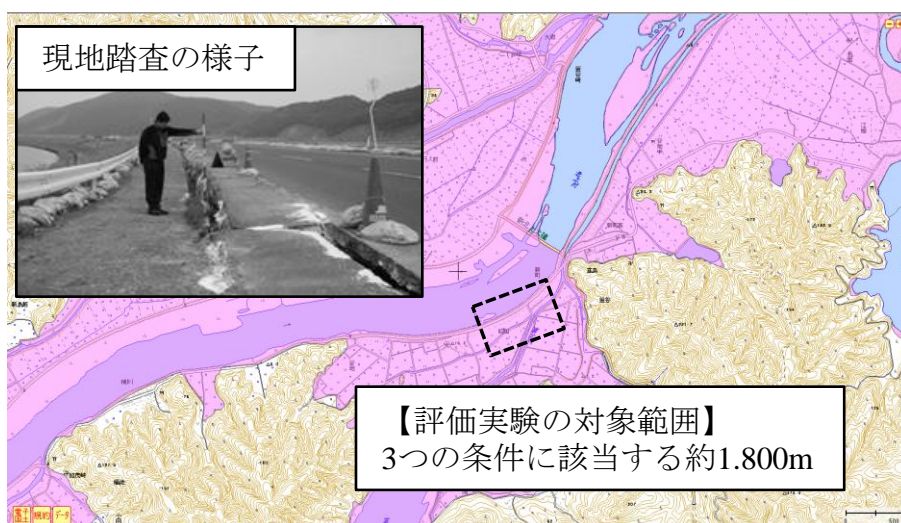


図 5.6 本実験の対象エリア  
【出典】国土交通省：地理院地図

### 5.5.3 実験条件

東日本大震災では、大規模な地殻変動が発生しており、震災前後の河川空間モデルを正確に重ね合わせるには、地盤沈下の影響を考慮して震災前の河川空間モデルの座標を補正しなければならない。そのため、本実験では、国土地理院から公開されている座標補正ツールおよび座標補正パラメータを用いて震災前のLPデータの座標を補正した。なお、座標補正パラメータが国土地理院より公開されていない場合は、距離標などの震災前の位置座標が明らかな地物を現地測量して位置座標を取得し、これらを比較して移動量を算出することで、暫定的なパラメータを算出できる。その上で、震災前後のLPデータを用いた評価実験を実施した。本実験で用いたLPデータの仕様を表5.3に示す。

表 5.3 LPデータの仕様

	震災前	震災後
水平精度	±25～30cm	
鉛直精度	±25cm	
対象範囲	約50,000m <sup>2</sup>	
対象点数	約29,000点	約29,000点

### 5.5.4 実験内容

本実験では、震災前後のLPデータから作成した河川空間モデルを用いて、次の実験を実施する。

- 大局的な変化が確認できるかを検証する。具体的には、ブレイクライン抽出機能を用いて作成した震災前後の河川空間モデルを重ね合わせて可視化し、破堤した可能性のある箇所や地形が大幅に変化した可能性のある箇所などを視覚的に確認できるかを評価する。
- 局所的な変化が確認できるかを検証する。具体的には、被害箇所検出機能を用いて堤防形状が著しく変化している箇所を自動的に特定し、その箇所の断面形状を可視化することで、堤防の損傷や地盤沈下による影響の有無を視覚的に確認できるかを評価する。
- 復旧工事に必要な土量を算出できるかを検証する。具体的には、既存のソフトウェアを利用して、河川空間モデル作成機能にて構築した震災前後の河川空間モデルを既存のソフトウェアにて解析することで、復旧工事に必要な土量を算出できるかを確認する。

## 5.5.5 実験結果と考察

### (1) 震災前後の河川空間モデルの比較

本実験では、震災前後の河川空間モデルを重ね合わせて可視化し、破堤した可能性のある箇所や地形が大幅に変化した可能性のある箇所などを視覚的に確認できるかを評価する。本実験の対象エリアのLPデータから生成した震災前後の河川空間モデルを重ね合わせた結果を図 5.7 に示す。図中 A、D の箇所では、震災の影響で堤防形状が変化している。また、堤防周辺を確認すると、図中 B の箇所では、河川敷などの堤防周辺のエリアが浸水した状態である。また、図中 C の箇所では、がれきなどが堆積し、地表面の形状が震災前後で異なっている。

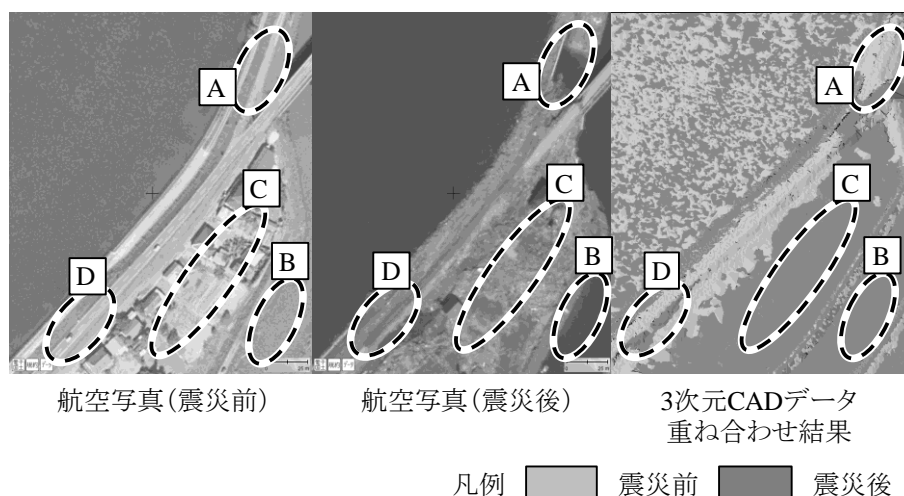


図 5.7 震災前後の河川空間モデルの重ね合わせ

【出典】国土交通省：地理院地図

以上の結果からも、震災前後の河川空間モデルを重ね合わせた結果や航空写真などを用いて確認することで、地形が大幅に変化した可能性のある箇所が容易にわかることが明らかとなった。

## (2) 震災前後の任意断面形状の比較

被害箇所候補検出機能により検出した被害箇所を図 5.8 に示す。本研究では、震災前後のブレイクラインの比較による変化量を被害の度合いと捉え、震災前後でブレイクラインが小さく変化した箇所から大きく変化した箇所まで、それぞれ検出した。なお、本実験では、対象とする河川堤防が典型的な凸型形状であり、天端面の両端に法肩が存在するため、2本のブレイクラインを用いて被害箇所候補を検出する。被害箇所の詳細を確認すると、閾値 *near* の値が 4m の場合に大きな変化を起こした被害箇所が明らかとなっていることが分かる。また、図 5.8 の四角で囲った範囲は、河川管理者が緊急復旧工事<sup>17)</sup>を実施した箇所であり、被害の大きな箇所である。このことから、本手法は、震災による被害箇所の候補地をユーザが指定した任意の変化量に応じて検出できていることがわかった。

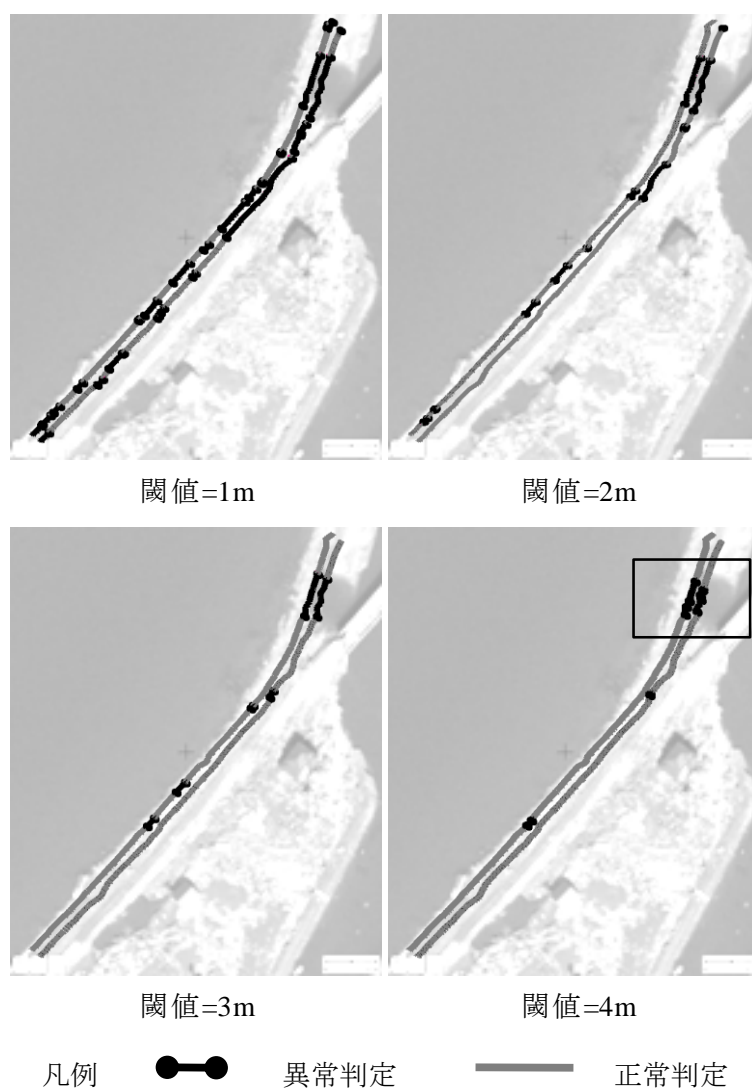


図 5.8 東日本大震災による河川堤防の被害箇所

また、本手法で正しく被害箇所を検出できているかを確認するため、図 5.9 に示す大きな被害を受けた箇所（断面 B, C, D）と被害を受けていない正常な箇所（断面 A）の各断面の生成結果を図 5.10、震災前後の各断面に対応した航空写真を図 5.11 に示す。

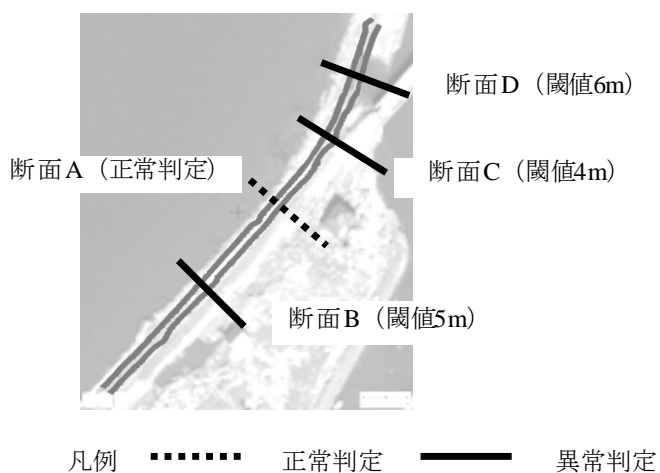


図 5.9 被害断面の生成箇所

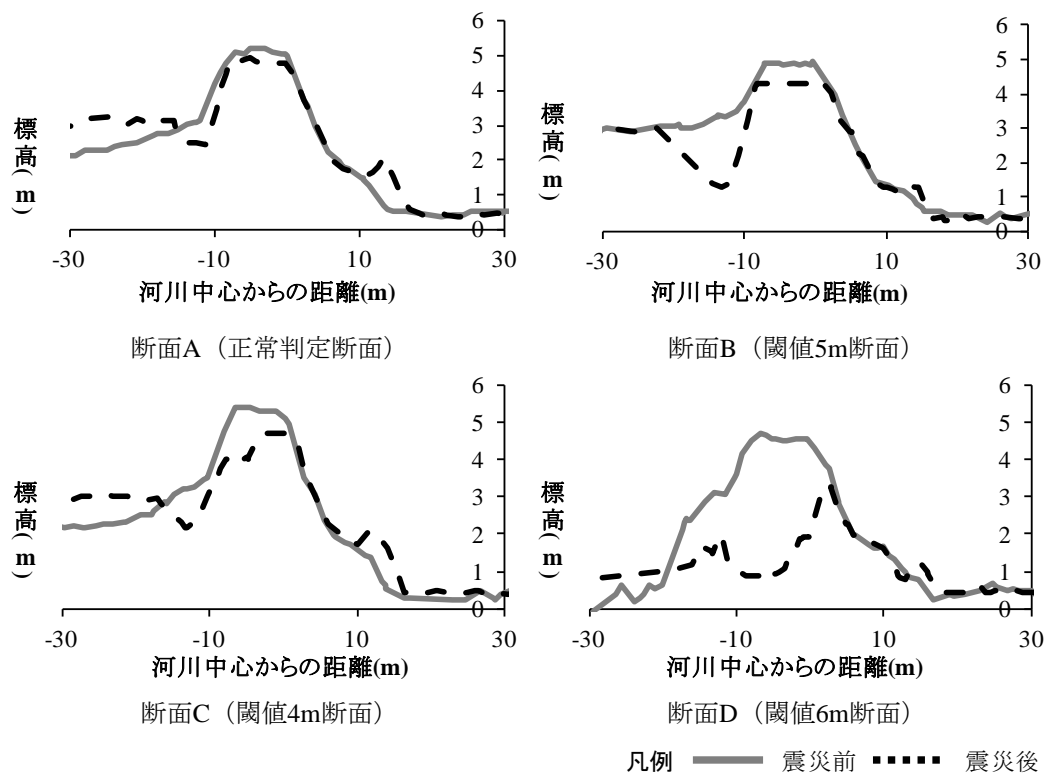
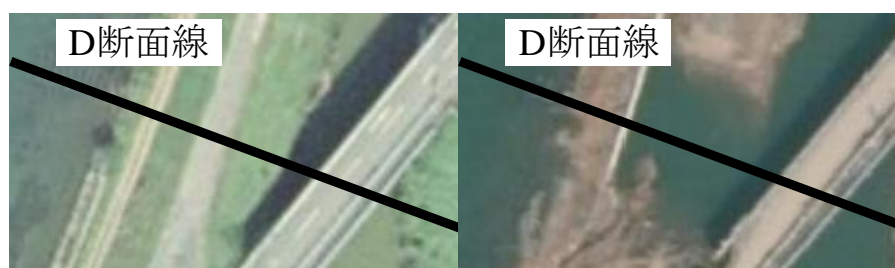


図 5.10 4箇所断面形状の比較結果



A 断面周辺の航空写真



D 断面周辺の航空写真

### 図 5.11 震災前後の航空写真

【出典】国土交通省：地理院地図

各図を確認した結果、以下の知見を得た。

- 断面 A は、震災前後で断面形状がほぼ一致しており、断面 A 周辺の堤防は、天端面の形状が保たれていることがわかる。また、図 5.10 の断面 A 周辺の航空写真を確認したところ、道路面やがれきなどの堆積が見られるものの、堤防形状が残っていることがわかる。このことから、震災の被害を受けていない、もしくは軽微な箇所を正しく検出できていることが明らかとなった。
- 断面 B および断面 C は、天端面の形状が変化しており、堤内側の法肩の変化が著しいことがわかる。このことから、本手法により局所的な損傷箇所が正しく検出できていることが明らかとなった。
- 断面 D は震災前後で断面形状が著しく変化しており、震災前後の航空写真からも堤防形状が大きく変化していることがわかる。また、図 5.11 の断面 D 周辺の航空写真を確認したところ、堤防形状が大きく変化していることがわかる。実際に、断面 D 周辺は大きな被害が特に集中して検出されており、河川管理者が緊急復旧工事<sup>17)</sup>を実施した箇所である。このことから、破堤などの堤防形状が局所的に大きく変化している箇所が正しく検出できていることがわかった。

### (3) 震災前後の堤防の土量差分

本実験では、河川空間モデル生成機能にて作成した震災前後の河川空間モデルの河川水位を基軸とした堤防の土量差分を算出し、復旧工事に必要な数量を把握できるかを検証した。土量の算出には、AutoCAD Civil 3Dの土量算出機能を用いたが、とくに支障なく対処することができた。その結果、地殻変動が伴うような大規模な災害の条件下でも、震災前と同様の堤防に復旧するために必要となる土量の概数が把握できた。したがって、復旧工事の規模の把握や積算の基礎資料として活用ができると考えられる。なお、本実験では、補正したLPデータを用いて作成した河川空間モデルから、復旧工事に必要となる土量を算出しているが、実際の復旧工事に用いられた土量との比較実験を行なっていないため、算出した土量の正確さを評価できないことから、算出結果の数値の提示は省略する。



## 第6章 異なる点群データを用いた河川空間モデル 形成の課題の考察

### 6.1 研究の概要

第3章、第4章で用いた MMS データと LP データは、第2章で明らかにしたとおり、それぞれ異なる特性の点群データである。これらの点群データは、測量技術の発達により、新しく公共測量に採用されたものである。本研究では、これらの特性の異なる点群データをどのように活用すればより高精度な河川空間モデルを生成できるかを考察する。

本章では、これらの特性の異なる点群データをどのように活用すれば高精度な河川空間モデルを形成できるかを明らかにする。そのため、「MMS 手法を用いて MMS データから生成した 3 次元モデル(以下、「MMS モデル」という。)」と「LP 手法を用いた LP データから生成した 3 次元モデル(以下、「LP モデル」という。)」とを比較し、河川空間モデルの形成における各手法の強みを明らかにする。

### 6.2 比較条件

#### 6.2.1 比較環境と対象データ

本比較で用いた実験環境を表 6.1 に示す。また、本比較で用いる点群データの計測位置は、計測の容易性、計測データを補正するための各種資料が揃っているかなどの観点から、次の選定条件を設定した。

- \* 近畿地方整備局が管理している淀川水系であること。
- \* 図 6.1 に示すような典型的な河川堤防形状であること。
- \* 図 6.1 のように、天端・堤外地・堤内地の 3 箇所に道路があり、走行可能であること。
- \* レーザプロファイラによる計測が実施されており、MMS データの計測後、キャリブレーションが実施されていること。

表 6.1 比較環境

項目			仕様
C	P	U	Intel® Core™2 Duo 3.50Ghz
メ	モ	リ	16.0GB
開発環境			Visual Studio 2010
開発言語			Visual C# .NET

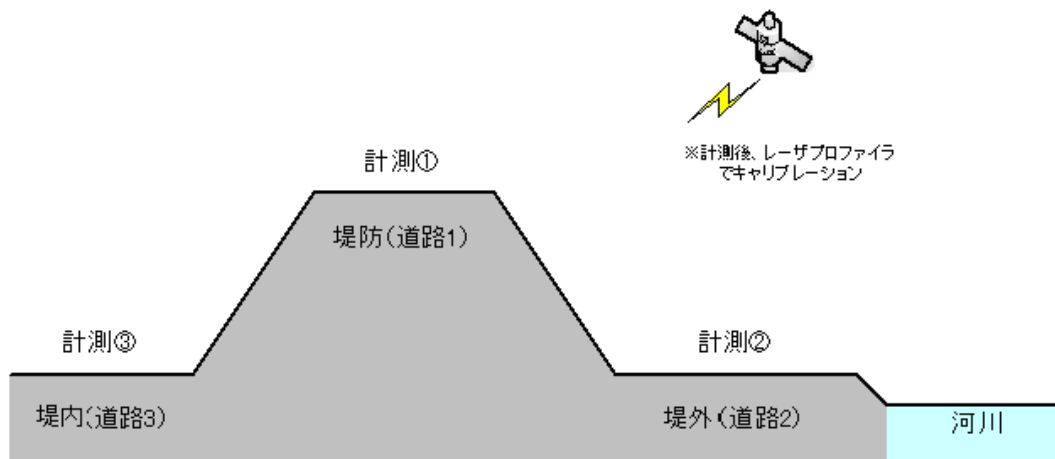


図 6.1 理想的な計測現場

以上の選定条件に従い、本比較で用いる対象データの計測位置を図 6.2、計測時期を表\*\*に示す。

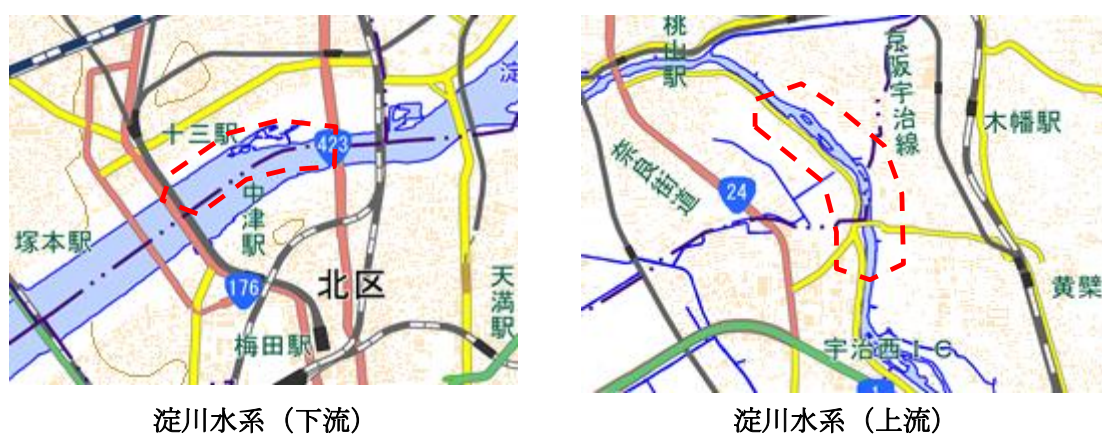


図 6.2 比較データの計測位置

【出典】国土地理院：地理院地図

表 6.2 比較データの計測時期

計測結果	計測時期
MMS データ	2009 年
LP データ	2010 年
河川定期横断図	2007 年

### 6.3 比較方法

本比較では、MMS データから MMS 手法を用いて生成した河川空間モデル(以下、MMS 河川空間モデル)および LP データから LP 手法を用いて生成した河川空間モデル(以下、LP 河川空間モデル)を用意し、その再現精度を比較・評価する。MMS 河川空間モデルと LP 河川空間モデルの再現精度は、4 章と同様に次の手順にて評価する。なお、MMS データの計測範囲は天端面の周辺に限定されるため、評価対象を天端面のみとした。

- Step1.MMS 河川空間モデルと LP 河川空間モデルから、河川横断図と同じ位置の断面形状を取得する。
- Step2.Step 1 で取得した断面形状と河川横断図を重ね合わせる
- Step3.河川横断図上に 10cm 間隔で評価点を設定し、評価点ごとに断面形状との標高差を算出する。
- Step4.Step3 で算出した標高差を天端面および小段ごとに集計する。

## 6.4 比較結果

### 6.4.1 MMS河川空間モデルとLP河川空間モデルの比較結果

MMS 河川空間モデルとLP 河川空間モデルの比較結果を表 6.3 から表 6.5 に示す. 表 6.3 は, 淀川下流の距離標 7.2km 地点から距離標 8.2km 地点かつ右岸堤防と河川定期横断図の比較結果である. 表 6.4 および表 6.5 は, 淀川上流の距離標 48.02km 地点から距離標 49.2km 地点かつ左岸堤防と河川定期横断図の比較結果(表 6.4)および右岸堤防と河川定期横断図の比較結果(表 6.5)である.

表 6.3 MMS 河川空間モデルと LP 河川空間モデルの比較結果 (下流)

計測箇所	評価区分	MMS 河川空間モデル				LP 河川空間モデル			
		天端面		全体		天端面		全体	
		点数	割合	点数	割合	点数	割合	点数	割合
7.2km 地点 (右岸)	A 評価	357	1.00	3,007	0.66	357	1.00	8,015	0.81
	B 評価	0	0.00	422	0.09	0	0.00	1,418	0.14
	C 評価	0	0.00	1,146	0.25	0	0.00	520	0.05
7.4km 地点 (右岸)	A 評価	269	1.00	2,696	0.71	269	1.00	7,927	0.82
	B 評価	0	0.00	395	0.10	0	0.00	1,415	0.15
	C 評価	0	0.00	705	0.19	0	0.00	285	0.03
7.6km 地点 (右岸)	A 評価	402	1.00	3,405	0.81	310	0.77	5,884	0.58
	B 評価	0	0.00	658	0.16	65	0.16	659	0.07
	C 評価	0	0.00	147	0.03	27	0.07	3,528	0.35
7.8km 地点 (右岸)	A 評価	482	1.00	3,367	0.83	231	0.48	4,315	0.43
	B 評価	0	0.00	549	0.13	47	0.10	2,123	0.21
	C 評価	0	0.00	153	0.04	204	0.42	3,607	0.36
8.0km 地点 (右岸)	A 評価	465	1.00	3,094	0.80	262	0.56	4,971	0.53
	B 評価	0	0.00	663	0.17	60	0.13	2,031	0.22
	C 評価	0	0.00	122	0.03	143	0.31	2,402	0.26
8.2km 地点 (右岸)	A 評価	440	1.00	3,564	0.89	243	0.55	6,118	0.61
	B 評価	0	0.00	355	0.09	58	0.13	1,631	0.16
	C 評価	0	0.00	97	0.02	139	0.32	2,262	0.23

表 6.4 MMS 河川空間モデルと LP 河川空間モデルの比較結果（上流左岸）

計測箇所	評価区分	MMS				LP			
		天端面		全体		天端面		全体	
		点数	割合	点数	割合	点数	割合	点数	割合
48.0km 地点（左岸）	A 評価	598	1.00	663	0.72	668	1.00	1069	0.44
	B 評価	0	0.00	100	0.11	0	0.00	668	0.28
	C 評価	0	0.00	154	0.17	0	0.00	668	0.28
48.2km 地点（左岸）	A 評価	935	0.97	947	0.69	998	1.00	2228	0.76
	B 評価	31	0.03	228	0.17	4	0.00	496	0.17
	C 評価	0	0.00	204	0.15	0	0.00	208	0.07
48.4km 地点（左岸）	A 評価	753	0.99	763	0.56	652	0.85	1748	0.68
	B 評価	11	0.01	66	0.05	113	0.15	468	0.18
	C 評価	0	0.00	529	0.39	0	0.00	356	0.14
48.6km 地点（左岸）	A 評価	659	1.00	807	0.46	659	1.00	3118	0.84
	B 評価	0	0.00	103	0.06	0	0.00	478	0.13
	C 評価	0	0.00	861	0.49	0	0.00	114	0.03
48.8km 地点（左岸）	A 評価	950	0.99	971	0.53	797	0.83	1718	0.53
	B 評価	9	0.01	76	0.04	26	0.03	544	0.17
	C 評価	0	0.00	768	0.42	137	0.14	963	0.30
49.0km 地点（左岸）	A 評価	1120	1.00	1234	0.56	780	0.70	1438	0.48
	B 評価	0	0.00	194	0.09	36	0.03	311	0.10
	C 評価	0	0.00	766	0.35	304	0.27	1271	0.42
49.2km 地点（左岸）	A 評価	790	0.94	868	0.57	612	0.68	2652	0.24
	B 評価	4	0.00	35	0.02	41	0.05	1324	0.12
	C 評価	42	0.05	630	0.41	244	0.27	7024	0.64

表 6.5 MMS 河川空間モデルと LP 河川空間モデルの比較結果（上流右岸）

計測箇所	評価区分	MMS 河川空間モデル				LP 河川空間モデル			
		天端面		全体		天端面		全体	
		点数	割合	点数	割合	点数	割合	点数	割合
48.0km 地点（右岸）	A 評価	45	0.34	724	0.37	131	1.00	2,992	0.42
	B 評価	86	0.66	491	0.25	0	0.00	555	0.08
	C 評価	0	0.00	752	0.38	0	0.00	3,556	0.50
48.2km 地点（右岸）	A 評価	535	1.00	1,121	0.47	519	0.97	3,386	0.43
	B 評価	0	0.00	215	0.09	16	0.03	1,604	0.20
	C 評価	0	0.00	1,033	0.44	0	0.00	2,904	0.37
48.4km 地点（右岸）	A 評価	592	0.60	662	0.40	785	0.79	3,244	0.28
	B 評価	399	0.40	441	0.27	206	0.21	1,927	0.16
	C 評価	0	0.00	542	0.33	0	0.00	6,588	0.56
48.6km 地点（右岸）	A 評価	400	1.00	490	0.29	298	0.75	2,035	0.16
	B 評価	0	0.00	65	0.04	102	0.26	806	0.06
	C 評価	0	0.00	1,132	0.67	0	0.00	10,089	0.78
48.8km 地点（右岸）	A 評価	458	1.00	503	0.31	382	0.84	1,805	0.10
	B 評価	0	0.00	52	0.03	75	0.16	1,312	0.07
	C 評価	0	0.00	1,069	0.66	0	0.00	15,538	0.83
49.0km 地点（右岸）	A 評価	509	0.86	570	0.39	444	0.75	3,722	0.19
	B 評価	13	0.02	66	0.04	70	0.12	2,409	0.12
	C 評価	73	0.12	843	0.57	81	0.14	13,869	0.69
49.2km 地点（右岸）	A 評価	485	1.00	841	0.46	380	0.78	3,759	0.34
	B 評価	0	0.00	238	0.13	105	0.22	1,008	0.09
	C 評価	0	0.00	733	0.40	0	0.00	6,215	0.57

## 6.4.2 MMS河川空間モデルとLP河川空間モデルの横断形状

MMS 河川空間モデルとLP 河川空間モデルの横断形状と河川定期横断面図を重畳して可視化した結果を図 6.3 から図 6.22 に示す。図 6.3 から図 6.8 は、淀川下流の距離標 7.2km 地点から距離標 8.2km 地点かつ右岸堤防と河川定期横断面図の横断形状である。図 6.9 から図 6.15 および図 6.16 から図 6.22 は、淀川上流の距離標 48.02km 地点から距離標 49.2km 地点かつ左岸堤防と河川定期横断面図の横断形状(図 6.9 から図 6.15) および右岸堤防と河川定期横断面図の横断形状(図 6.16 から図 6.22)である。

### (1) 距離標 7.2km 地点から距離標 8.2km 地点の横断形状

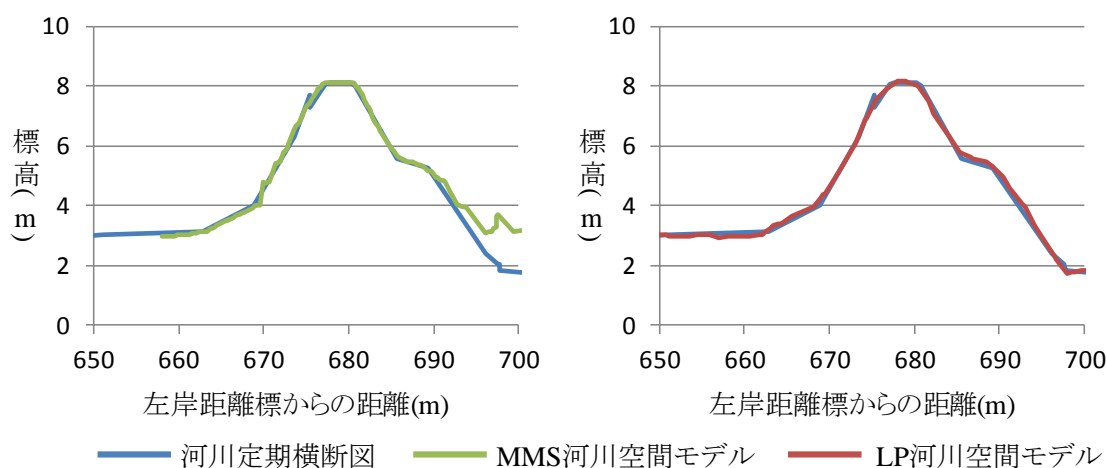


図 6.3 7.2km 地点（右岸）横断形状の可視化結果

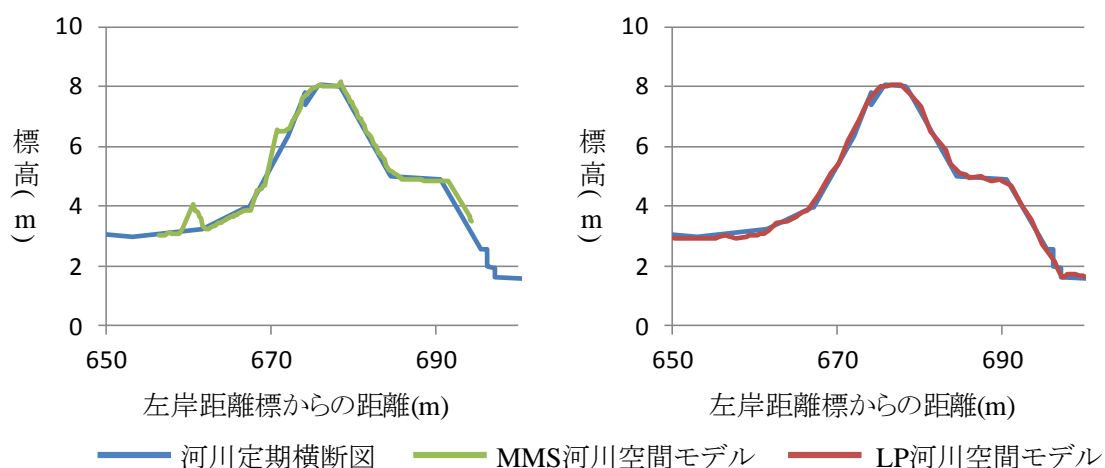


図 6.4 7.4km 地点 (右岸) 横断形状の可視化結果

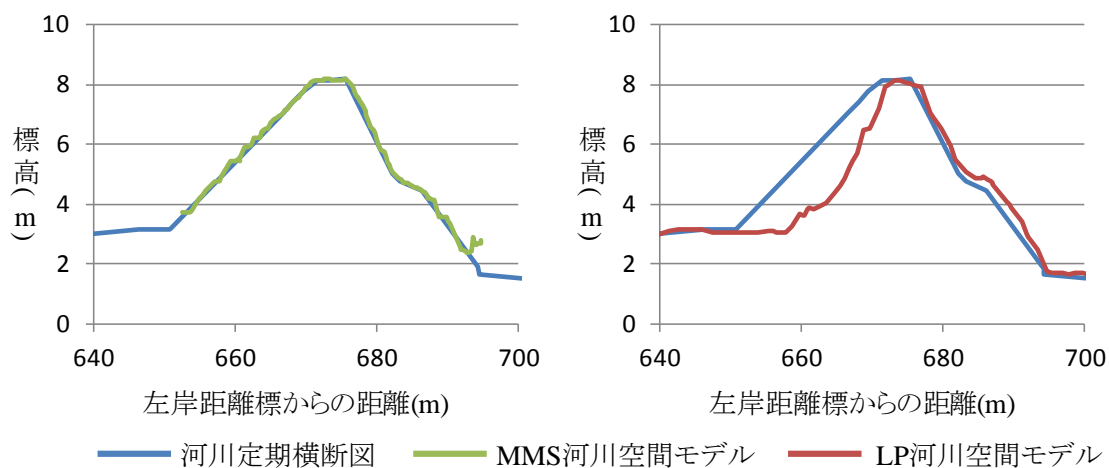


図 6.5 7.6km 地点 (右岸) 横断形状の可視化結果

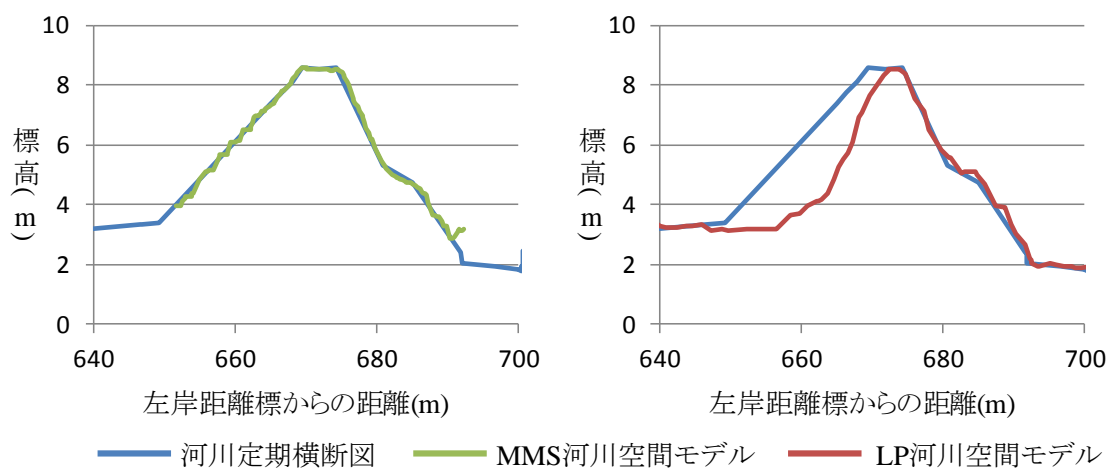


図 6.6 7.8km 地点 (右岸) 横断形状の可視化結果



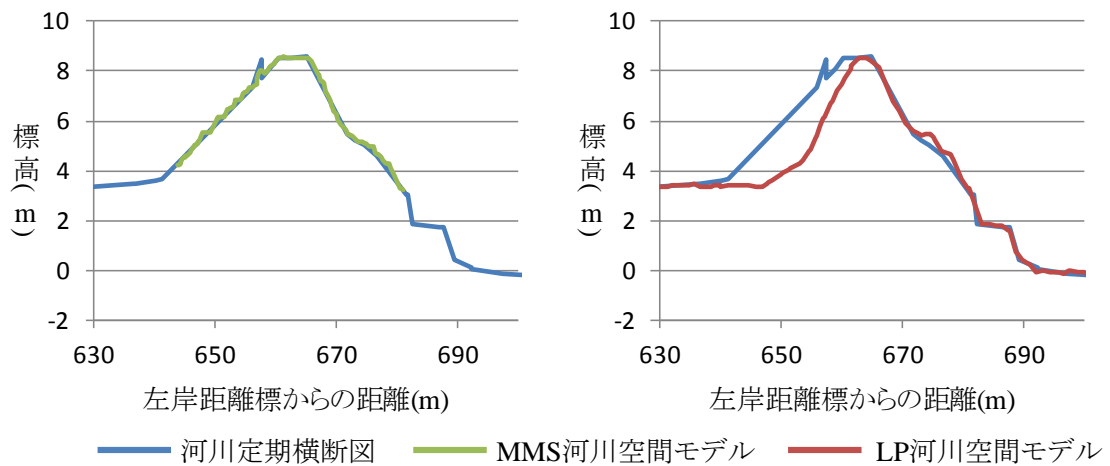


図 6.7 8.0km 地点 (右岸) 横断形状の可視化結果

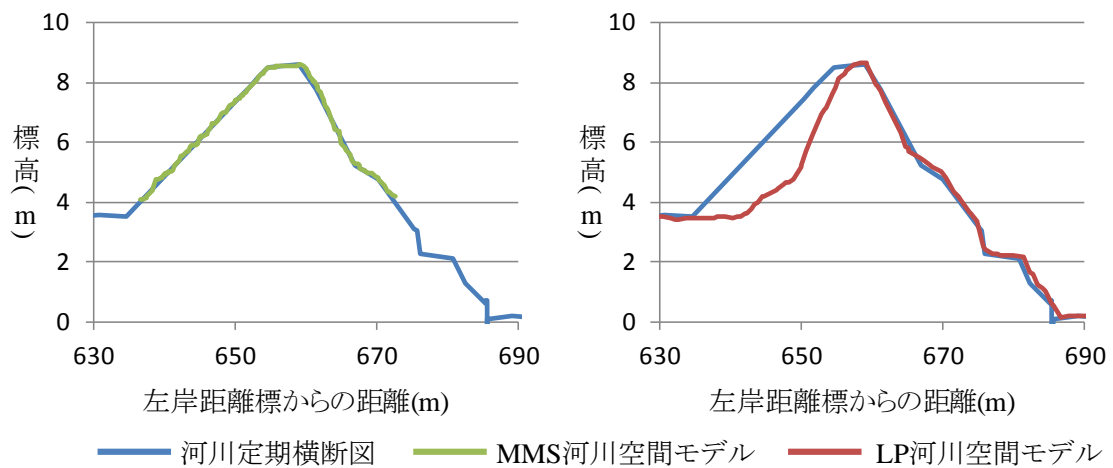


図 6.8 8.2km 地点 (右岸) 横断形状の可視化結果

(2) 距離標 48.0km 地点から距離標 49.2km 地点かつ左岸の横断形状

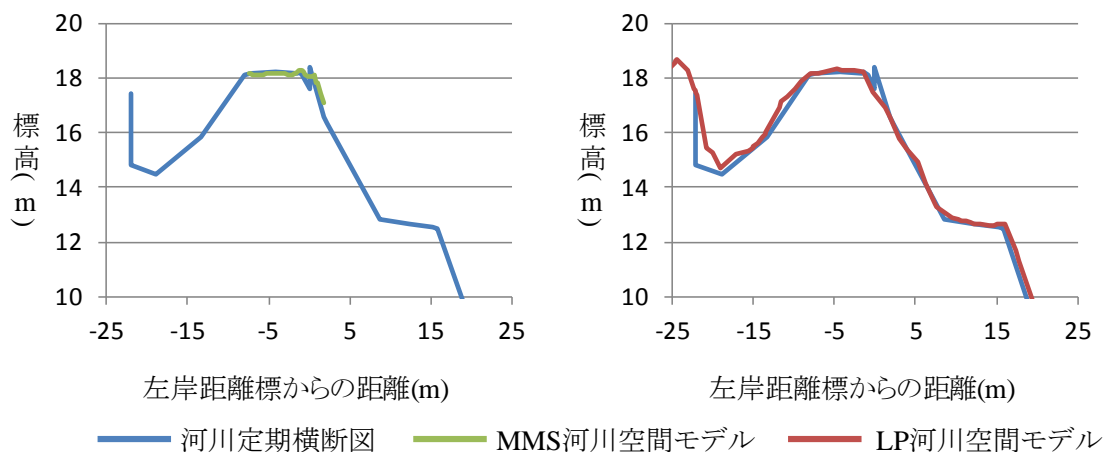


図 6.9 48.0km 地点 (左岸) 横断形状の可視化結果

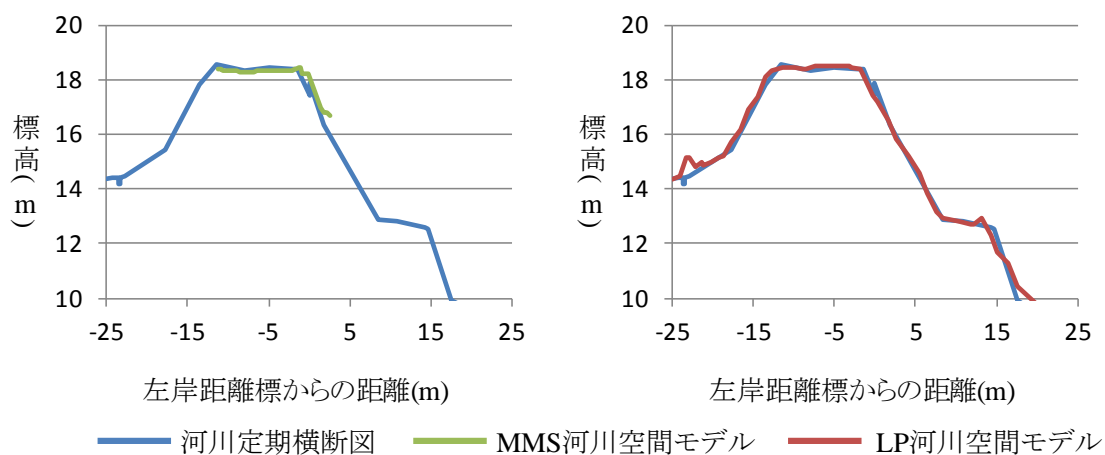


図 6.10 48.2km 地点 (左岸) 横断形状の可視化結果

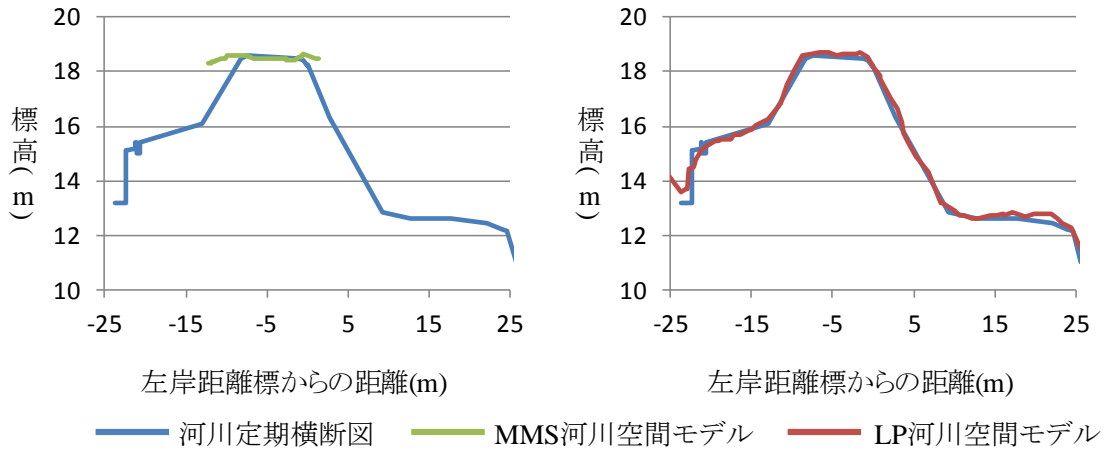


図 6.11 48.4km 地点 (左岸) 横断形状の可視化結果

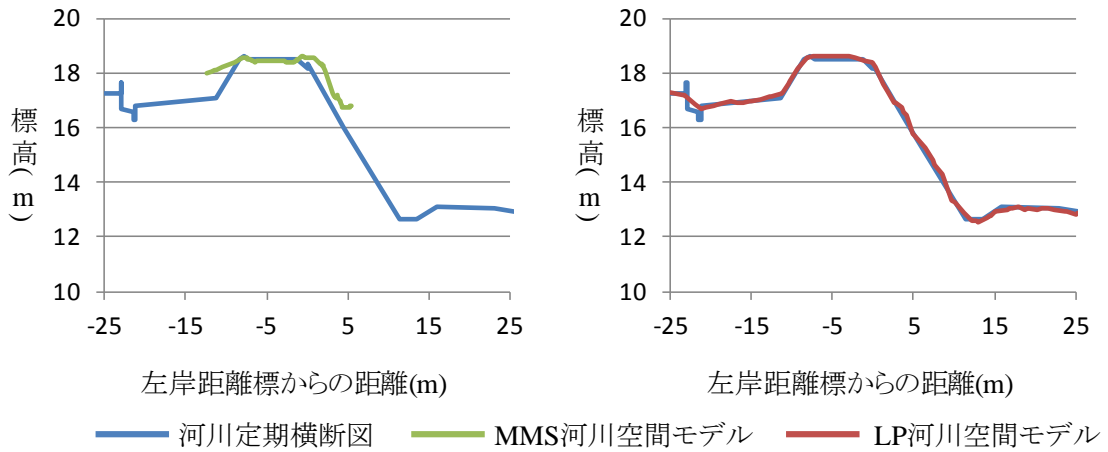


図 6.12 48.6km 地点 (左岸) 横断形状の可視化結果

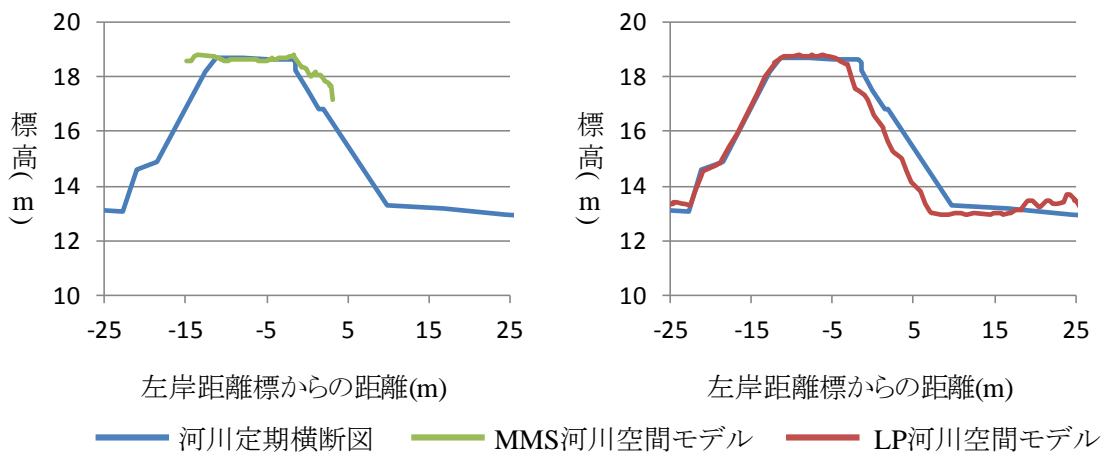


図 6.13 48.8km 地点 (左岸) 横断形状の可視化結果

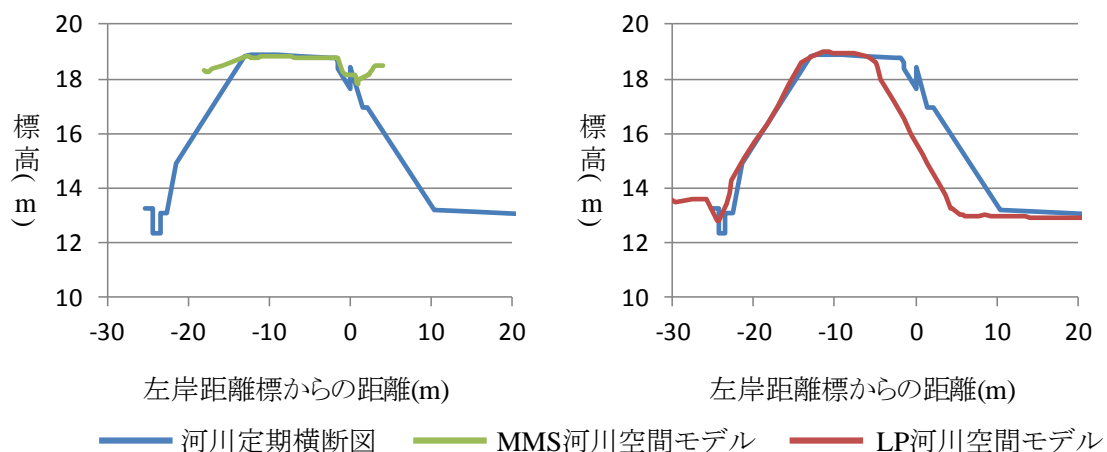


図 6.14 49.0km 地点 (左岸) 横断形状の可視化結果

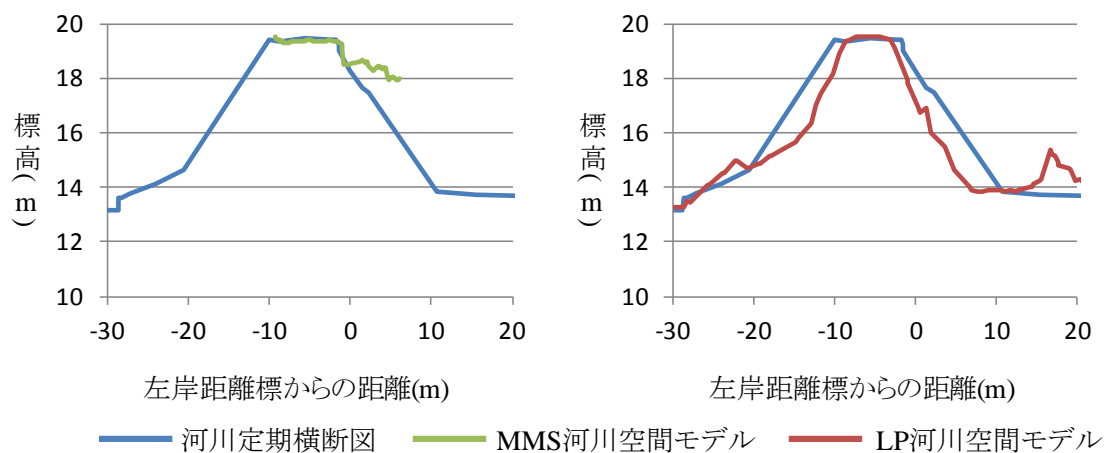


図 6.15 49.2km 地点 (左岸) 横断形状の可視化結果

(3) 距離標 48.0km 地点から距離標 49.2km 地点かつ右岸の横断形状

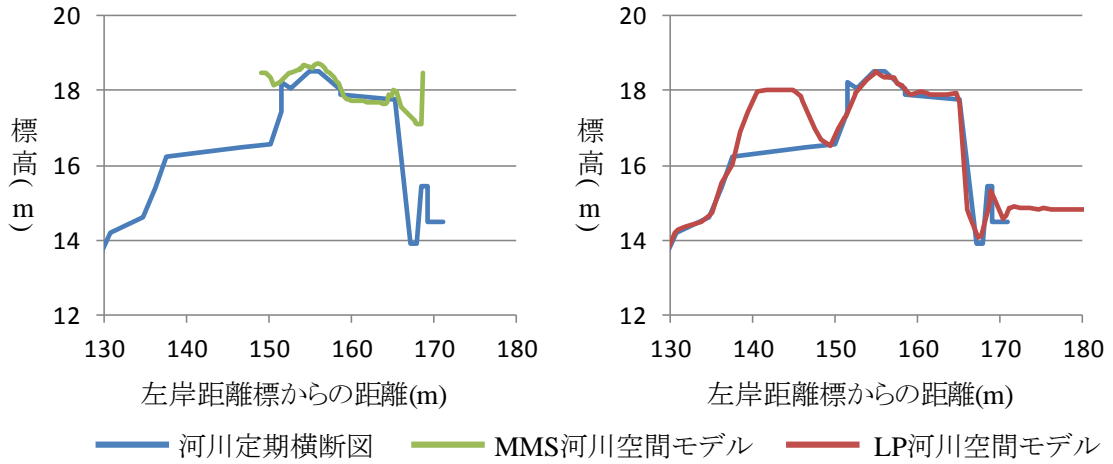


図 6.16 48.0km 地点 (右岸) 横断形状の可視化結果

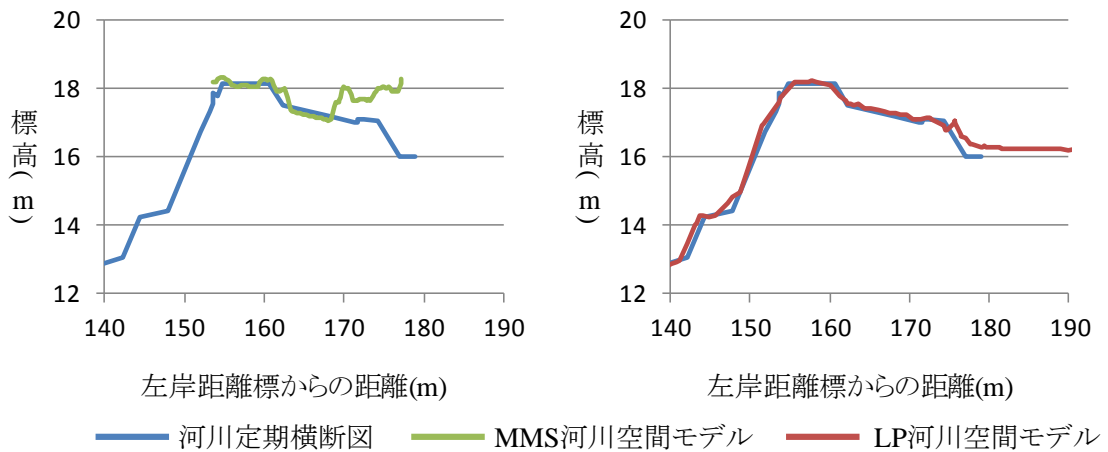


図 6.17 48.2km 地点 (右岸) 横断形状の可視化結果

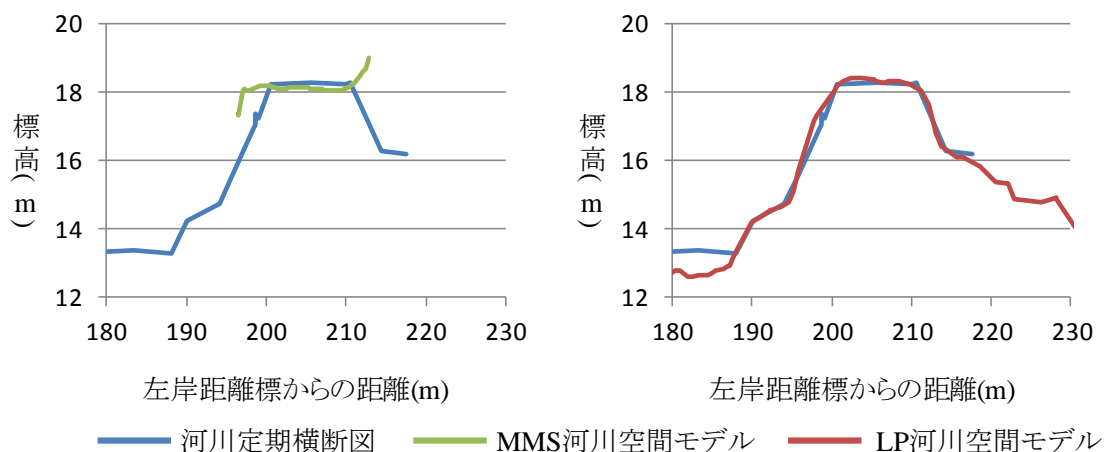


図 6.18 48.4km 地点 (右岸) 横断形状の可視化結果

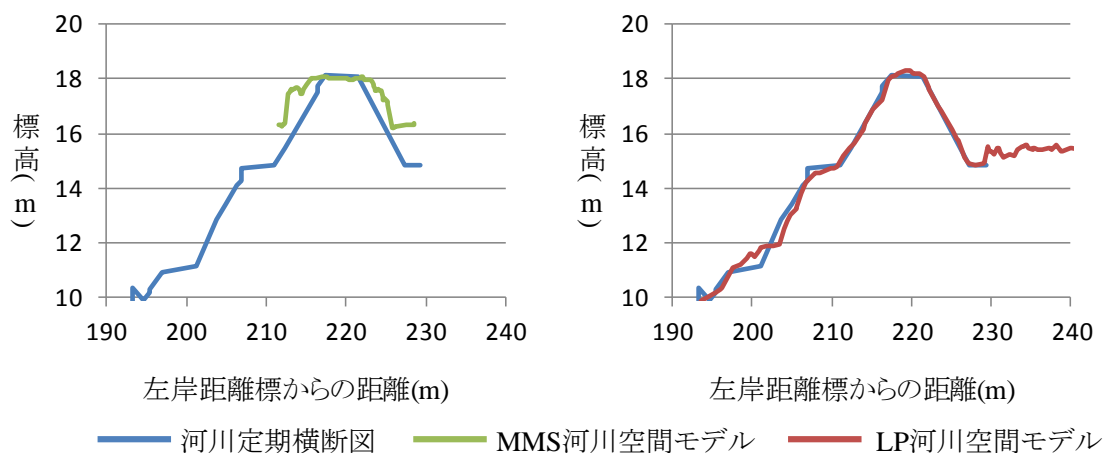


図 6.19 48.6km 地点 (右岸) 横断形状の可視化結果

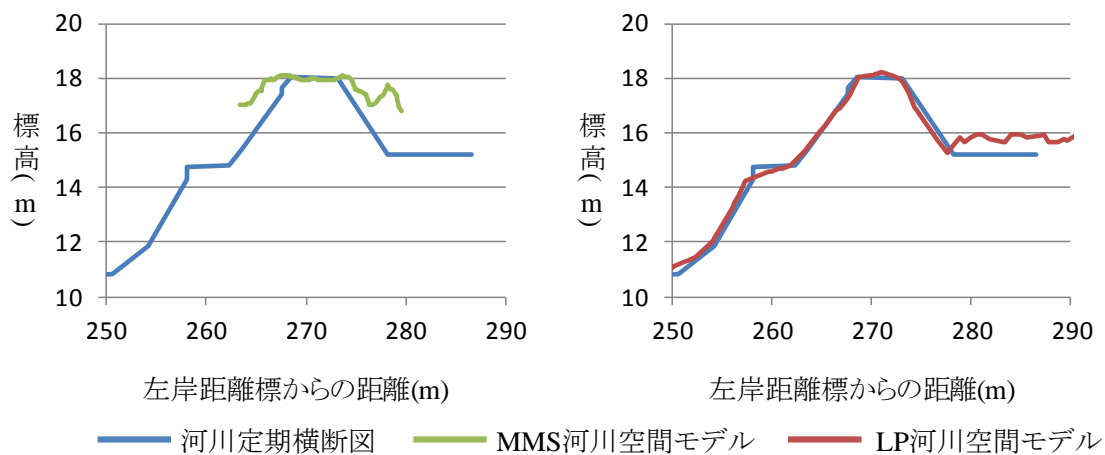


図 6.20 48.8km 地点 (右岸) 横断形状の可視化結果

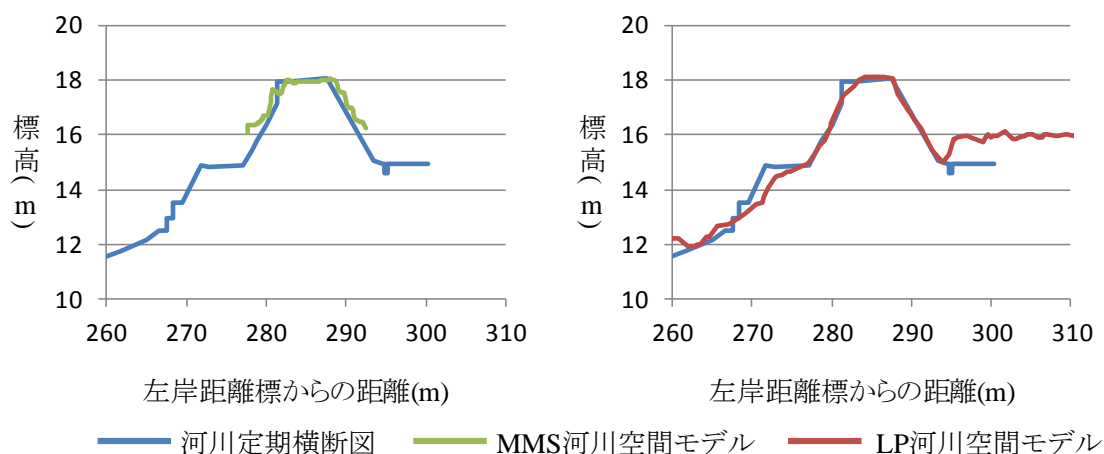


図 6.21 49.0km 地点 (右岸) 横断形状の可視化結果

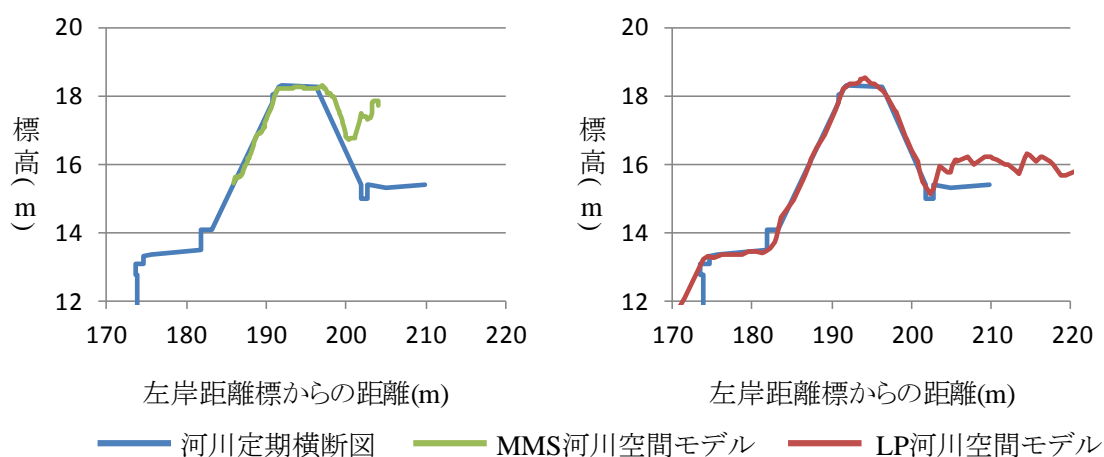


図 6.22 49.2km 地点 (右岸) 横断形状の可視化結果

## 6.5 結果と考察

### 6.5.1 横断形状の可視化による評価

本評価では、MMS 河川空間モデルと LP 河川空間モデルについて、それぞれ評価する。

まず、MMS 河川空間モデルについては、距離標 7.6km 地点から距離標 8.2km 地点の河川空間モデルは、壁状ノイズの除去手法によって天端面から法則面にかけて河川定期横断面と同様の形状を再現していることが分かる。一方、距離標 48.0km 地点から距離標 49.2km 地点の河川空間モデルは、天端面の形状は河川定期横断面と同様の形状を再現しているが、法面の形状が大きく異なることが分かる。これは、淀川下流の計測箇所では強い植生が天端面から法肩に集中してい

るのに対して、淀川上流の計測箇所では、天端面から法面、法尻まで強い植生に覆われているためである。国土交通省東北地方整備局の検証[88]では、法面の植生を10cm未満に除草することでMMSデータの約50%が地表面を捉えることができ、MMS計測による地表面の把握が可能になると結論している。そのため、距離標48.0km地点から距離標49.2km地点のMMSデータの様に強い植生を含むMMSデータを用いる場合は、LPデータにおけるグラウンドデータのように地表面以外の点群を除去することが肝要である。

次に、LP河川空間モデルについては、距離標7.2km地点から距離標8.2km地点の横断形状を確認すると、距離標7.2km地点と距離標7.4km地点では、LP河川空間モデルと河川定期横断図の横断形状がほぼ一致していることが分かる。また、距離標48.0kmから距離標49.2kmの横断形状を確認すると、距離標48.8km地点から距離標49.2km地点の左岸を除く各横断形状がほぼ一致していることが分かる。一方、距離標7.6km地点から距離標8.2km地点および距離標48.8km地点から距離標49.2km地点の左岸において、LP河川空間モデルと河川定期横断図の断面形状が異なることが分かった。該当地点について詳細に調査したところ、横断形状が大きく異なる法面において、LP河川空間モデルとLPデータに有意な差は見られなかった。このことから、LP河川空間モデルと河川定期横断図の横断形状が異なる原因として、河川定期横断図の計測時期2007年からMMSデータの計測時期2009年とLPデータの計測時期2010年の間に計測の対象となる河川堤防の形状が変化していることが考えられる。そのため、同一地点でも計測時期の違いによって現況形状が異なる場合があるため、異なる点群データを組み合わせる場合はそれぞれの現況形状に留意する必要がある。

そして、MMS河川空間モデルとLP河川空間モデルについて、これらの河川空間モデルは、それぞれ異なるパラメータを用いて平坦部を特定し、ブレイクラインを抽出して生成している。これは、それぞれ異なる点群データの特性に合わせて、事前実験によって汎用的なパラメータを経験的に設定している。しかし、MMS河川空間モデルを確認すると、計測箇所の違いによって植生の特徴に大きな差異があることが分かる。また、MMS河川空間モデルとLP河川空間モデルを確認すると、計測時期の違いによって横断形状に大きな差異があることが分かる。このことから、本研究で提案した手法では、事前実験によって設定した汎用的なパラメータだけでなく、計測箇所や計測時期に合わせたパラメータを用いることで、より高精度な河川空間モデルを生成できると考えられる。

これにより、次の3つの知見が明らかになった。

- 地表面以外の点群を除去したMMSデータ(MMSグラウンドデータ)を用意することで、地



表面をより高精度に再現した河川空間モデルを生成できる。

- 点群データの計測時期に留意することで、より現況形状に近い河川空間モデルを生成できる。
- 計測箇所や計測時期にあわせた河川空間モデル生成手法のパラメータを用いることで、より高精度に再現した河川空間モデルを生成できる。

## 6.5.2 河川横断図との標高差を用いた評価

集計結果を確認すると、7.4km 地点では、MMS 手法モデルの再現精度は、LP 手法モデルとほぼ同程度であった。この原因を究明するため、7.4km 地点の MMS データを詳細に確認すると、天端面は植生に覆われており、点群データに強いノイズが含まれていることがわかった。一方、48.4km 地点では、MMS 手法モデルでは A 評価の割合が 1.00 であるのに対して、LP 手法モデルでは 0.79 であり、天端面では、MMS 手法モデルの再現精度が高いことがわかった。詳細に分析するため、A 評価の内訳を 5cm 間隔で再集計した結果を表 6.3 に示す。再集計の結果を見ると、MMS 手法モデルと河川横断図の標高差が 10cm 以内の割合が 0.85 であった。本実験で用いた MMS データの計測誤差が ± 10cm であることを考慮すると、MMS 手法モデルの天端面は、MMS の性能限界に近い精度で再現できていると考えられる。

河川空間モデルの形成において、MMS 手法と LP 手法および MMS データと LP データのそれぞれの点群データを用いた場合の結果を次の表 6.4 に示す。

表 6.6 MMS 手法と LP 手法の詳細な比較結果

		7.4km地点(右岸)				48.4km地点(左岸)			
		MMS手法		LP手法		MMS手法		LP手法	
		点数	割合	点数	割合	点数	割合	点数	割合
天端面	～ 5cm	352	0.80	357	0.81	60	0.09	71	0.10
	5cm～10cm	48	0.11	45	0.10	538	0.76	147	0.21
	10cm～15cm	22	0.05	36	0.08	106	0.15	341	0.48
	15cm～	20	0.05	4	0.01	0	0.00	146	0.21

これにより、次の 2 つの知見が明らかになった。

- LP 手法は、LP データを用いて、河川空間全体を高精度に再現した 3 次元モデルを生成できる。

- MMS 手法は、MMS データを用いて、河川堤防の周辺を LP 手法よりも高精度に再現した 3 次元モデルを生成できる。

表 6.7 MMS 手法と LP 手法を用いた 3 次元モデルの評価

手法	点群データ	部位	評価
MMS 手法	MMS データ	天端面	○
		小段	×
MMS 手法	LP データ	天端面	×
		小段	×
LP 手法	LP データ	天端面	△
		小段	○

○：高精度に再現できる

△：再現できる

×：再現できない

これらのことから、天端面では MMS データを用いた MMS 手法、天端面以外の平坦部では LP データを用いた LP 手法をそれぞれ用い、異なる特性の点群データの特長を活かした河川空間モデルを形成することで、測量機器の性能限界に近い精度で河川空間の 3 次元モデルを生成できると考えられる。

## 6.6 異なる点群データを組み合わせた河川空間モデル形成の課題

第 6.5 節の結果と考察から、MMS データと LP データの理想的な組み合わせの一例として、植生のない MMS データと最新の LP データの組み合わせが考えられる。具体的には、最新の LP データの天端面周辺の点群を植生のない MMS データの点群と置換することで、河川空間全体を高精度に再現した 3 次元モデルが形成できると考えられる。しかし、MMS データと LP データの組み合わせを実現するには、次の 2 つの懸念がある。

- MMS データに含まれる植生の有無の懸念
- 点群データの計測時期および計測時期における工事状況の懸念

1 つ目は、MMS データに含まれる植生の有無の懸念である。MMS データは、LP データと異なりグラウンドデータが作成されていない。そのため、河川空間モデルを再現する上でノイズとなる植

生を独自に判別、除去する必要がある。MMS データからグラウンドデータと植生データを判別する既存手法として、形状や色の特徴の類似を用いて判別する手法がある。これらの手法は、地表面が滑らかな舗装された路面やアスファルトで舗装された路面を対象とするため、河川堤防はグラウンドデータを正しく取得できない場合がある。そこで、MMS データ(非グラウンドデータ)と LP データ(グラウンドデータ)を組み合わせる場合には、MMS データから河川空間のグラウンドデータを取得する手法が新たに必要である。

2 つ目は、点群データの計測時期および計測時期における工事状況の懸念である。複数の異なる点群データを組み合わせる場合、単純にそれぞれの点群データの利点のみに注目すると、例えばある工事後に計測した LP データと工事前に計測した MMS データから現況形状と異なる形状の河川空間モデルを形成する懸念がある。そこで、組み合わせる点群データが妥当な組み合わせであるかを判別する手法が新たに必要である。

これにより、異なる点群データを用いた河川空間モデルの形成を実現するために解決すべき以下の技術的な課題が明らかになった。

- MMS データから河川空間のグラウンドデータを判別する技術が必要
- 異なる点群データの組み合わせが妥当であるかを判別する技術が必要

これらの技術的な課題を解決することにより、異なる点群データの利点を活かした河川空間モデル形成の実現に寄与するものと考えられる。



## 第7章 総括

私たちの生活空間を創造・維持する上で、河川は重要な機能をもつ公共の財産である。しかし、昔から洪水や氾濫などの災害による危険性も潜んでいる。こうした危険から私たちの安心・安全で豊かな生活を守るには、河川の維持管理が必要不可欠である。河川管理者は、河川空間を平面、縦断や横断など 2 次元の図面を主として記録している。そのため、測量箇所以外の変状は、近接する図面から推測した値を参考にしている。現在の規程を策定した当時の測量技術と費用の兼ね合いによる制限のためである。現在は、測量技術の発達により、広範囲な 3 次元の点群データ容易に測量できる。しかし、点群データの利用規程がまだ策定されていない状況である。

そこで、本研究では、点群データから従来の河川管理の対象となるブレイクラインを再現した河川空間モデルを生成し、こうした背景に対する解決手法を提案した。そして、その解決手法を基に、災害時における河川空間モデルの活用手法を提案し、異なる点群データの組み合わせ技術を実現するための課題の考察に取り組んだ。

各章の内容について、それぞれ概説する。

第 1 章では、研究の背景として、河川管理の現状と、発達した測量技術の現状について述べた。そして、発達した測量技術を従来の河川管理に間接的に利用する取り組みとその実施における課題点を明確化し、それらに対する本研究の取り組みについて概説した。本研究で解決対象とする課題は、「課題 1：膨大なデータ量による利用性の課題」、「課題 2：河川堤防のブレイクライン抽出が困難な課題」、「課題 3：災害時に河川堤防の変状把握が困難な課題」と「課題 4：異なる特性の点群データの利活技術が確立していない課題」の 4 点がある。それらの課題に対して、それぞれ解決手法を提案し、本研究の枠組みを提示した。

第 2 章では、河川管理の現状として、公共測量で蓄積された MMS データと LP データの特性と、河川堤防の形状的な特徴について整理した。また、最新の測量技術を利用した取り組みについて調査し、それらを単に適用しただけでは解決が困難な課題を洗い出した上、研究の着眼点と構想について検討し、本研究で実現する範囲について明確化した。

第 3 章では、膨大な MMS データから、河川堤防のブレイクラインを考慮した河川空間モデルを生成する手法を提案した。提案手法では、MMS データから推定した天端面の外形線を用いてブレイクラインを抽出した。さらに、天端面上に存在する植生を自動的に特定し、壁状ノイズとして除去した。実証実験から、人工形状と自然形状が混在する河川空間の MMS データから、現況地形を高精度に再現した河川空間モデルを生成する技術を実現した。具体的には、次の点群データを取り扱う技術を開発した。

- MMS にて計測された点群データの密度に着目し、河川堤防の典型的な形状である凸型形状を対象として、天端面を推定する技術
- 河川堤防の形状に着目し、点群データに含まれる壁状ノイズを自動的に特定、除去する技術
- 点群データから壁状ノイズを除去した範囲の地表面を周辺の標高情報から推測して補間する技術

第4章では、LP データから、河川堤防のブレイクラインを考慮した河川空間モデルを生成する手法を提案した。提案手法では、LP データから天端面や小段、高水敷など河川空間の平坦部をそれぞれ特定して複数のブレイクラインを抽出した。さらに、取得したブレイクライン候補線の標高を考慮して、河川空間から高精度にブレイクラインを抽出した。実証実験から、LP データに適した河川空間モデルを生成する技術の開発に成功した。具体的には、点群データを取り扱う次の技術を開発した。

- 河川堤防の典型的な形状に着目し、LP データから河川空間の平坦部をそれぞれ特定する手法
- 平坦部の高さに着目し、ブレイクラインの誤抽出を抑える手法

第5章では、震災前後のLP データから生成した河川空間モデルの比較手法を考案した。また、考案した手法により、災害による被害箇所をどの程度まで把握できるかを評価実験によって明らかにした。本手法は、第3章と第4章で提案した技術を用いて生成した河川空間データを重ね合わせて比較し、形状的特徴であるブレイクラインの変化を即座に発見する。その結果、優先的に復旧対策すべき箇所や現地踏査を詳細に実施すべき箇所の選定など、効率的な災害対応を支援する。評価実験では、具体的な利用シーンを想定して、災害対応の経験を有した河川管理者の助言の下、東日本大震災で得られたLP データを用いて本手法の有用性を確認した。また、河川管理者に本研究成果を説明したところ、災害対応で有用であるとの評価を得た。

第6章では、MMS データとLP データから生成した河川空間モデルを比較し、それぞれ河川空間モデルの生成に有用な点群データであり、異なる特性の点群データを用いることの可能性を明らかにした。

今後の展望としては、河川空間モデルを形成する技術の精度向上と、実際の維持管理への河川空間モデルの適用との2つに取り組んでいく予定である。また、本研究で用いた河川横断図を用いた評価手法では、河川横断図が用意された箇所のみしか定量的な評価が行えず、任意箇所の変状については十分な検証を行うことが出来なかった。そのため、今後は河川横断図に依存し

ない評価方法についても取り組んでいく。河川空間モデルを形成する技術の精度向上では、スロープなどの河川構造物をふくむ一般的でない河川堤防へと河川空間モデルの生成技術を適用した場合に生成される 3 次元モデルの評価と生成技術の提案と、異なる特性の点群データから一つの 3 次元モデルを形成する技術の実現に向けて取り組んでいく。

河川事業で推進されている ICT を用いた高度な施工管理の一つとして、Total Station を用いた出来形管理(以下、「TS 出来形管理」という。)がある。また、この TS 出来形管理に関する支援策として、3 次元 CAD データを用いた省力化の取り組みがある。そこで、実際の維持管理への河川空間モデルの適用では、特長を活かした河川空間モデルを用いた TS 出来形管理の支援策の実現に向けて取り組んでいく。





## 参考文献

- [1] 国土交通省：なるほど！河川管理，入手先 <<http://www.qsr.mlit.go.jp/oita/naruhodokasen/index.html>> (参照 2015-7-7).
- [2] 国土交通省水管理・国土保全：統計・調査結果，入手先 <[http://www.mlit.go.jp/river/toukei\\_chousa/](http://www.mlit.go.jp/river/toukei_chousa/)> (参照 2015-7-7).
- [3] 国土交通省：作業規程の準則（昭和 26 年建設省告示第 800 号），2008 年.
- [4] 国土交通省：国土交通省公共測量作業規程解説と運用，日本測量協会，2003 年.
- [5] 国土交通省：測量成果電子納品要領(案)，2004 年.
- [6] 国土交通省：土木設計業務等の電子納品要領（案），2008 年.
- [7] 国土交通省：工事完成図書の電子納品要領（案），2008 年.
- [8] 国土交通省：CAD 製図基準(案)，2008 年.
- [9] 国土交通省：地質・土質調査成果電子納品要領（案），2008 年 12 月.
- [10] 国土交通省：河川基盤地図ガイドライン(案)，2001 年.
- [11] 国土交通省：地名辞典の整備・運用ガイドライン（案）第 1 版，2007 年 .
- [12] 国土交通省近畿地方整備局：土木工事共通仕様書(案)，2007 年.
- [13] 国土交通省近畿地方整備局：設計業務共通仕様書（案），2008 年.
- [14] 国土交通省近畿地方整備局：土木設計業務等委託必携，2009 年.
- [15] 国土交通省近畿地方整備局：近畿地方整備局における電子納品の手引き（案）【業務編】，2007 年.
- [16] 国土交通省近畿地方整備局：近畿地方整備局における電子納品の手引き(案)【土木工事 基本編】，2007 年.
- [17] 国土交通省近畿地方整備局：近畿地方整備局における電子納品の手引き(案)【情報共有システム編】，2007 年.
- [18] 建設省河川局治水課：河川定期縦横断測量業務実施要領・同解説，1999 年.
- [19] 国土交通省河川局：河川定期縦横断データ作成ガイドライン，2008 年.
- [20] 福森秀晃，佐田達典，大久保秀晃，清水哲也，村山盛行：3 次元レーザースキャナーの測定精度に関する基礎的実験，土木情報利用技術論文集，土木学会，Vol.18，pp.193-200，2009 年.

- [21] 国土交通省：航空レーザ測量による数値標高モデル（DEM）作成マニュアル，2006年。
- [22] 国土交通省国土地理院：JPGIS に準拠した DM データ作成マニュアル，2007年
- [23] 国土交通省国土地理院：航空レーザ測量，入手先<[http://www1.gsi.go.jp/geowww/Laser\\_HP/](http://www1.gsi.go.jp/geowww/Laser_HP/)>，(参照 2015-7-7)。
- [24] 国土交通省国土総合政策研究所：航空レーザ測量を活用した治水安全度評価，入手先<<http://www.nilim.go.jp/lab/rcg/newhp/seika.files/lp/>>，(参照 2015-7-7)。
- [25] 藤田光一：中小河川の治水安全度を早急に把握せよ，国総研マニュアルレポート2006，国土交通省国土技術政策総合研究所，pp.12-15，2006。
- [26] 三菱電機：三菱モバイルマッピングシステム高精度 GPS 移動計測装置，入手先<<http://www.mitsubishielectric.co.jp/pas/mms/>>，(参照 2015-7-7)。
- [27] 国土交通省国土地理院：移動計測車両による測量システムを用いる数値地形図データ作成マニュアル（案），2012年。
- [28] 岡部貴之，坂下裕明，小澤淳眞，下村博之，蒲恒太郎，宮作尚宏，川村裕，浅沼市男：ALB の河川縦横断測量への適用性の研究，河川技術論文集，土木学会，Vol.20，pp.55-60，2014年。
- [29] 国土交通省：ICT が変える、私たちの暮らし～国土交通分野イノベーション推進大綱～，2007年。
- [30] 国土交通省：「国土交通省 CALS/EC アクションプログラム 2005」の策定について，2006年。
- [31] 国土交通省：「国土交通省 CALS/EC アクションプログラム 2008」の作成について，2009年。
- [32] 国土交通省情報化施工推進会議：情報化施工推進戦略，2009年。
- [33] 金澤文彦，青山憲明，阿部寛之，今井龍一，上坂克己：道路中心線形データ交換標準（案）基本道路中心線形偏 Ver.1.0，国土技術政策総合研究所資料，第371号，2007年。
- [34] 建設情報標準化委員会：建設情報標準化推進計画～第二次建設情報標準化推進三箇年計画～，2004年。
- [35] National Institute of Standards and Technology (NIST)：Integration Definition for Function Modeling (IDEF0)，Federal Information Processing Standards Publication 183，1993。
- [36] 社会資本整備審議会河川分科会：ユビキタス情報社会における次世代の河川管理のあり方（提言），2008年。
- [37] 国土交通省：CALS/EC 電子納品に関する要領・基準，入手先<<http://www.cals-ed.go.jp/>>（参照 2015-06-01）。

- [38] 国土交通省：工事施工中における受発注者間の情報共有システム機能要件平成 20 年 12 月版 (Rev.2.0) 【要件編】，2008 年。
- [39] 国土交通省：工事施工中における受発注者間の情報共有システム機能要件平成 20 年 12 月版 (Rev.2.0) 【解説編】，2008 年。
- [40] 金澤文彦，田中洋一，神原明宏：土工におけるトータルステーションを用いた出来形管理の検討，国土技術政策総合研究所資料，第 505 号，2009 年。
- [41] 国土交通省：施工管理データを搭載したトータルステーションによる出来形管理監督・検査の手引き (案)，2009 年 3 月。
- [42] 国土交通省：施工管理データを搭載したトータルステーションによる出来形管理要領 (案)，2008 年 4 月。
- [43] 国土交通省国土技術政策総合研究所：TS による出来形管理に用いる施工管理データ交換標準 (案)，2006 年。
- [44] 国土交通省国土技術政策総合研究所：出来形管理用トータルステーション機能要求仕様書 (案)，2007 年。
- [45] 国土交通省国土技術政策総合研究所：「施工管理データを搭載したトータルステーションによる出来形管理監督・検査マニュアル (案)」(道路土工編)，2006 年。
- [46] 国土交通省国土技術政策総合研究所：「施工管理データを搭載したトータルステーションによる出来形管理監督・検査マニュアル(試行案)」(河川土工編)，2007 年。
- [47] 国土交通省国土技術政策総合研究所：TS による出来形管理に用いる施工管理データ作成帳票作成ソフトウェアの機能要求仕様書，2007 年。
- [48] 国土交通省国土技術政策総合研究所：「土木工事共通仕様書」を適用する請負工事に用いる帳票様式共通タグ (案) XML スキーマ定義 Rev.1.0，2009 年。
- [49] 国土交通省国土技術政策総合研究所：「土木工事共通仕様書」を適用する請負工事に用いる帳票データ交換規約(案)Rev.1.0，2009 年。
- [50] 国土交通省国土技術政策総合研究所：SXF 表示機能及び確認機能要件書 (案)，2009 年
- [51] 国土交通省国土技術政策総合研究所：CAD-GIS コンバータ 【道路版】 Ver.1.0 設計書，2007 年
- [52] 国土交通省国土技術政策総合研究所：歩行空間ネットワークデータ作成要領，2008 年
- [53] 国土交通省国土技術政策総合研究所：道路基盤地図情報製品仕様書 (案)，2008 年
- [54] 国土交通省国土技術政策総合研究所：道路基盤地図情報交換属性セット (案)，2008 年

- [55] 国土交通省国土技術政策総合研究所：道路工事完成図等作成要領，2006年
- [56] 椎葉祐士，田中洋一，遠藤和重，藤島崇：施工管理データを搭載した RTK-GNSS による出来形管理手法の提案，土木情報利用技術論文集，土木学会，Vol.18，pp.59-66，2009年。
- [57] 土工締固め管理情報化施工検討委員会：T S ・ G P S を用いた盛土の情報化施工締固め管理要領（案），2003年。
- [58] 大津慎一，佐田達典：三次元形状計測における大量点群データの処理手法，土木情報利用技術論文集，土木学会，Vol.16，pp.27-36，2007年。
- [59] 谷口健男，真下啓治：3次元体表面上の点群を用いた形状生成と要素分割，応用数理，応用数理学会，Vol.15，No.4，pp.310-319，2005年。
- [60] Gumhold, S., Wang, X. and MacLeod, R.: Feature Extraction from Point Clouds, Proceedings of 10th International Meshing Roundtable, Sandia National Laboratories, pp.293-305, 2001.
- [61] 古谷隆志，真鍋友和，谷口健男：point clouds からの特徴線抽出とそれを利用した3次元領域形状の生成，計算工学講演会論文集，計算工学会，Vol.9，pp.773-776，2004年。
- [62] 小林一郎，宮下征士，坂口将人，上田誠：MMS データを用いた視距改良設計，土木情報利用技術論文集，土木学会，Vol.18，pp.1-8，2009年。
- [63] 上野幹夫，小林一郎，山本一浩，安重晃，橋本淳也：レーザ計測データを用いた有限要素法による洪水氾濫解析，土木情報利用技術論文集，土木学会，Vol.14，pp.1-6，2005年。
- [64] 国土交通省東北地方整備局：平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震 鳴瀬川・北上川被害状況，< <http://www.thr.mlit.go.jp/karyuu/taiheiyouokijisinn/index.html> >。
- [65] 田中成典，今井龍一，中村健二，川野浩平：点群座標データを用いた3次元モデルの生成に関する研究，土木情報利用技術論文集，土木学会，Vol.19，pp.165-174，2010年。
- [66] 田中成典，今井龍一，中村健二，川野浩平：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，Vol.23，pp.572-590，2011年。
- [67] 川野浩平，田中成典，今井龍一，中村健二：レーザプロファイラ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，情報処理学会論文誌データベース，情報処理学会，Vol.8，No.1，pp.55-72，2015年。
- [68] 田中成典，今井龍一，中村健二，川野浩平：LP データを用いた震災前後の被害箇所自動検出結果の可視化に関する研究，土木学会論文集 F3（土木情報学），土木学会，Vol.68，No.2，pp.197-205，2012年。
- [69] 国土交通省：拡張デジタルマッピング実装規約（案），2005年。

- [70] 国土交通省：大縮尺地形図図式 拡張デジタルマッピング取得分類基準表（案），2005 年。
- [71] 国土交通省国土地理院：拡張デジタルマッピングデータファイル仕様，2005 年
- [72] 国土交通省国土技術政策総合研究所：道路設計用 DM データファイル作成仕様（素案），2007 年
- [73] 国土交通省国土地理院：空間データ製品仕様書作成マニュアル JPGIS 版 Ver1.0, 2005 年
- [74] 国土交通省国土地理院：地理情報標準プロファイル(JPGIS)Ver.2.0, 2008 年 4 月
- [75] 国土交通省国土地理院：地理情報標準プロファイル(JPGIS)に準拠した DM データ製品仕様書(案)第 1 版, 2007 年
- [76] 建設情報標準化委員会電子地図／建設情報連携小委員会：拡張 DM-SXF 変換仕様(案)第 1 版, 2006 年
- [77] 建設情報標準化委員会電子地図／建設情報連携小委員会：CAD-GIS 連携の手引書第 1 版, 2007 年
- [78] 小林一郎，宮下征士，藤田陽一：立面点群データにおける車道空間の属性分析，土木情報利用技術論文集，土木学会，Vol.19, pp.185-192, 2010.
- [79] Ester, M., Kriegel, H.-P., Sander, J., and Xu, X.: A Density-Based Algorithm for Discovering Clusters in Large Spatial Databases with Noise, in *Proc. of The 2nd Int'l Conf. on Knowledge Discovery and Data Mining*, pp.226–23, 1996.
- [80] Kass, M.; Witkin, A.; and Terzopoulos, D., “Snakes : Active Contour Models”, In. *Proc. of 1st International Conference on Computer Vision*, pp. 259-268, 1987.
- [81] 椎葉祐士，田中洋一，遠藤和重，藤島崇：施工管理データを搭載した RTK-GNSS による出来形管理手法の提案，土木情報利用技術論文集，土木学会，Vol.18, pp.59-66, 2009.
- [82] Ester, M., Kriegel, H.P., Kriegel., Sander, J. and Xu, X. : A Density-Based Algorithm for Discovering Clusters in Large Spatial Databases with Noise, *Proc. of The 2nd Int'l Conf. on Knowledge Discovery and Data Mining*, AAAI, pp.226–231, 1996.
- [83] Kass, M., Witkin, A. and Terzopoulos, D. : Snakes : Active Contour Models, *Proc. of 1st International Conference on Computer Vision*, IEEE, pp. 259-268, 1987.
- [84] Pratt, W.: *Digital Image Processing*, Wiley-Interscience, 1978.
- [85] Lu, W., Murphy, K., James J., Sheffer, A. and Fu, H.: A Hybrid Conditional Random Field for Estimating the Underlying Ground Surface from Airborne LiDAR Data, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol.47, No.8, pp.2913-2922, 2009.
- [86] Zheng, Y. and Cao, Z.: Classification Method for Aerial LiDAR Data Based on Markov Random Field, *Electronics Letters 4th*, Vol.47, No.16 , 2011.

- [87] Bretar, F. and Chehata, N.: Terrain Modeling from Lidar Range Data in Natural Landscapes; A Predictive and Bayesian Framework, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol.48, No.3, pp.1568-1578 , 2010.
- [88] 郷家康弘, 千葉孝寿, 武田貴子, 高田浩穂: 堤防管理へのモバイルマッピングシステム活用検討について, 国土交通省東北地方整備局, 入手先<<http://www.thr.mlit.go.jp/Bumon/B00097/K00360/happyoukai/H27/5-25.pdf>>, (参照 2015-7-7).

## 謝辞

本論文を取りまとめるにあたり，関西大学の教員の皆様および田中研究室の学生諸氏より，御多忙の中，終始一貫して，暖かく懇切丁寧な御指導御鞭撻，またすばらしく充実した研究環境を賜りました．中でも，研究全般に渡り，明確な方向付けまでして頂きました関西大学総合情報学部総合情報学科 田中成典教授に心より感謝の意を表しますと共に厚く御礼申し上げます．

また，東京都市大学工学部 今井龍一准教授ならびに大阪経済大学情報社会学部 中村健二准教授には，終始一貫した研究への御理解ならびに貴重な御助言を賜りました．ここに謹んで感謝の意を表します．

本論文の研究を遂行するにあたり，関西大学総合情報学部総合情報学科の諸先生方からは，終始多大なご協力とご支援を賜りました．深く感謝する次第であります．

第2章から第5章の研究を遂行するにあたり，国土交通省 近畿地方整備局の企画部長 塚田幸広氏，機械施工管理官 三上章氏，施工企画課 加藤義紀氏，久野啓嗣氏，田中斉氏，河川工事課 下野公仁氏，中村超氏には貴重なご意見・示唆を賜った．日本工営(株)山口達也氏，三菱電機(株)の各氏には点群データの計測でご協力を賜りました．ここに記して感謝の意を表します．

最後に，勉学への意欲に対して深い理解と協力を頂いた父（川野兼義），母（川野美佐子）に感謝するとともに，末永く健康であることを切に願っております．

