

博士論文

地域防災計画における「災害予防」  
「災害応急対策」の課題と解決策に関する研究

2026年3月

金藤 純子

岡山大学大学院  
環境生命自然科学研究科

## 目次

第 1 章	序論	4
第 2 章	地域防災計画の課題の解決策	13
2.1	「災害予防」における課題と解決策：河川モニタリング技術の開発	13
2.2	河川堤防モニタリング開発技術の概要	20
2.3	ハード開発技術およびソフト開発技術の概要	23
2.4	ハード技術の開発内容：位相差方式による距離計測	25
2.5	ソフト技術の開発内容：高密度点群処理技術	26
2.6	「災害応急対策」における課題と解決策：共助・自助の必要性	47
2.7	SC の一時避難場所利用の有用性	51
2.8	SC の一時避難場所利用と BCP の関係	54
第 3 章	公助における課題の解決策：3 次元データ取得法の検討	59
3.1	モニタリング技術の開発の背景	59
3.2	レーザ測量精度検証実験の概要	65
3.3	レーザ測量精度に及ぼす要因の考察	68
3.4	第 3 章のまとめ	71
第 4 章	河川モニタリング技術の現場検証実験	73
4.1	MMS を用いたモニタリング技術の課題	73
4.2	MMS の課題の解決策	78
4.3	提案手法による変状検知の有用性の検討と考察	80
4.4	第 4 章のまとめ	83
第 5 章	共助・自助における課題の解決策	87
5.1	従来の研究の整理	87
5.2	SC 所在地の被災リスクに関する検証	88
5.3	SC の一時滞在場所としての有効性検証	92
5.4	検証結果と考察	98
5.5	第 5 章のまとめ	105
第 6 章	結論	107
	【参考文献】	111

地域防災計画における「災害予防」「災害応急対策」の課題と解決策に関する研究

第1章 序論

- ・ 「災害予防」の課題 : 災害を未然に防ぐ公助の課題  
⇒ 予防保全型の点検（巡視）作業の実現に向けたモニタリング技術の不備
- ・ 「災害応急対策」の課題 : 被害の拡大を防ぐための共助・自助支援の課題  
⇒ 災害関連死を防ぐための体制の不備

第2章 「災害予防」「災害応急対策」の課題の解決策

- ・ 「災害予防」の解決策 : 点検（巡視）作業における人員不足と地球温暖化における災害の基大化への対応  
⇒ ICT機器の活用による堤防全体の3次元化によるモニタリング技術の検討
- ・ 「災害応急対策」の解決策 : 収容人数不足に加えて環境改善策としての避難所（場所）の整備  
⇒ 一時避難場所としての大型商業施設（SC）の活用の検討

第3章 公助の課題解決策：3次元データ取得法の構築

- 車両搭載型レーザー測量の検討と改善策の考察  
⇒ 高所からのレーザー照射モニタリング技術の開発

第5章 共助・自助の課題解決策：SC活用の有用性検討

- ・ 「移動性」を考慮したSCの収容率算出過程の検討
- ・ 「洪水」「津波」に対する収容率算出過程の検討
- ・ 「帰宅困難者」に対する有用性の検討
- ・ 実際のモデル地区に適用した結果の考察

第4章 開発技術の実用性の検証

- ⇒ 堤防全体の3次元化による変状の定量化の検証

第6章 結論：「災害予防」「災害応急対策」の課題の解決策の実用化の考察

## 第1章 序論

都道府県や市町村などの地方自治体は、災害対策基本法に基づき、住民の生命・財産の保護を目的として、防災活動を総合的・計画的に進めるために地域防災計画を作成している。そこでは、国や関係機関と連携し、災害予防・応急・復旧・復興の各段階で、行政が行う公助と共に、住民が主体となって実施する自助や共助あるいは事業者の事業継続の役割も含めた対策と手順を定めた「地域ごとの防災の羅針盤」とも言える防災・減災の基本政策が定められている<sup>1)</sup>。具体的には、地域防災計画において、「災害予防」「災害応急対策」「災害復旧・復興」の3段階で行うべき行動が定められている。これまでの災害時の事例を見れば、「災害復旧・復興」の段階の対策や行動では、比較的大きな災害に対しては、国と連携した予算措置や人的支援体制に依存しているという課題はあるものの、被災した自治体単独での対応が困難な場合では、自治体同士が連携する体制が整えられており、結果として被災した自治体の欠点を補う活動が円滑にできている状況が数多く見られている<sup>2)</sup>。一方、「災害予防」「災害応急対策」においては、人的および予算的措置の困難さによる対応の不備が際立って現れており、減災につながる措置が十分にできていないのが実情である。その代表的なものには、「災害予防」においては、自治体が管理するインフラ構造物の健全性を把握し、優先的に対策を実施するための箇所を抽出することが要求されるが、モニタリングした資料が欠如していることにより、効率的で有効な処置が実施できていない。これはインフラ構造物に関する専門的知識を備えた技術員の不足に加えて、対象となる構造物が膨大な数にのぼるため、点検・診断作業が追い付かない状態になっているのが原因の一つである<sup>3)</sup>。また「災害応急対策」においては、二次災害とも関連する避難所不足およびその環境の不備による災害が拡大する問題がある。平成25年に災害対策基本法が改正され、指定避難所の基準の明確化、避難所における生活環境の整備および避難所以外の場所に滞在する被災者への配慮等が規定に盛り込まれた。この法改正以降、「避難生活の良好な生活環境の確保に向けた取組指針(令和6年12月改定)」等に基づき、自治体に対して避難所における良好な生活環境が確保されることが求められている<sup>4)</sup>。しかしながら、これまでの災害事例では、避難所での生活による身体的負担から持病が悪化した事例や疲労が蓄積することで心不全や肺炎などの循環器系・呼吸器系の疾患を発症した事例、あるいは指定避難所に入れず、車中泊を強いられることによるエコノミークラス症候群を発症した事例など、災害関連死と認められた死者数の減少策が講じられていない実情がある<sup>5)</sup>。本研究はこの背景を鑑み、近年多発している豪雨による水害に着目し、「災害予防」において、人的労力を軽減しながらも効率的に危険箇所を抽出するモニタリング技術の開発と、「災害応急対策」において、災害関連を防ぐための一時避難場所としての商業施設(ショッピングセンター:SC)の利用の効果を考察した結果をまとめるものである。

前者の「災害予防」における課題と解決策は次の通りである。これは「公助」における課題と解決策に該当する。平成27年の関東・東北豪雨での鬼怒川や、平成30年豪雨災害での

岡山県内高梁川流域における堤防決壊などに見られるように、近年の地球規模の気候変化に伴う極端な総降水量の増加による外水氾濫が多発する傾向にある。今世紀末には、全国の1級水系における年最大流域平均降雨量は、現在より約1.1~1.3倍くらいに増加すると予測されており、河道や河川管理施設の維持管理の重要性が増している<sup>6)</sup>。なかでも主たる管理対象施設の一つである河川堤防（以下、堤防）は、総延長の長い構造物であり、どこかの短い区間が決壊しても、広範囲にわたる範囲が被災する。堤防は特殊な区間を除いて、河川管理施設等構造令により、盛土によって築造されるように規定されている。河道の流下能力向上や流水による侵食洗掘対策として、嵩上げや腹付けなどの改修が幾度も行われて現在の形状に至っており、盛土内部の構造や地質に関する資料が完備されていない場合が多い。その一方で、堤防の点検作業は、徒歩による目視で変状の有無を確認することによって行われており、堤防の健全性の評価は、技術者の技量や経験に頼っている実情がある。現在の気候変動に対応するためには、出水直後だけでなく、平常時から堤防の形状を詳細に監視し、変形などの異常が発見された場合は、いち早く対策を講じる必要がある。

これまでの事例では、天端の沈下、はらみ出し、寺勾配化や法崩れの他に、堤防としての機能を果たさなくなる変状として、次のような被災メカニズムとの関係があるものが指摘されている。

- ・天端や法面の亀裂は、堤防のどこかにすべり面が発生している場合がある。放置しておくと、堤体内の浸潤面が上昇した際、せん断抵抗力を失うことで亀裂が拡大し、結果としてすべり破壊が発生する。したがって微細なものであっても、亀裂幅の変化を見逃さないことが必要である。堤体すべり破壊につながる変状の例を図1-1 上段に示す。
- ・粘性土による透水性の低い土で構成される構造がある場合は、そこに裏腹付けが実施されていると、堤体内に浸透した河川水が透水性の低い箇所により押し上げられ、浸透水が上部に湧出することがある。これが長時間継続すると、パイピングの進行とともに堤体破壊に至る。また法尻付近からの漏水は、砂層で構成された透水性地盤の法尻付近に粘性土が存在することによって、この透水性の構造を遮断している場合がある。これを放置すると、大きな漏水につながり、法尻付近が不安定化して堤防が破壊する。このように漏水やそれに伴って現れる変位は、基礎地盤や堤体の土質構成を踏まえた堤防の浸透破壊現象を把握することにつながる。この他、堤体の透水性に関係した泥濘化などの堤体の浸透破壊の前兆を図1-1 中段に示す。
- ・低水護岸や低水護岸の基礎部に現れる変状は、流体力によって破壊を発生させ、やがて側方侵食へと進行する。また高水敷箇所に侵食が発生している場合は、堤体本体が侵食破壊する危険がある。このため、図1-1 下段に示すような、側方侵食につながる耐侵食性構造物の変状は、位置や大きさおよび進行具合を定量的に評価する必要がある。このような堤防に現れる変状は、リアルタイムで変化が進むものではないため、点検間隔を密にするモニタリングをする必要は無いが、変化の進行が目に見えるようなものでないため、目視では見落とすことが多く、微細な変化であっても定量化する作業が要求される。さらに、こ

れまで多くの河川において堤防法面での崩壊が発生しているが、破堤に直結しないと言われてきた雨水が直接の原因となった可能性が高いと考えられている事例も発生している。具体的には、降雨に加えて天端からの雨水が堤防表法面に浸透し、法面表層の間隙水圧が上昇した結果、土質強度が低下して崩壊が発生したのではないかと考えられている。2015年の鬼怒川での破堤を契機として、浸透対策としての天端の舗装が進められているが、天端から法面への降雨の排水が助長され、法面の浸食を助長する恐れがあり、微細な法面の侵食痕や緩み域の発生も見逃さないことが重要になる<sup>7)</sup>。

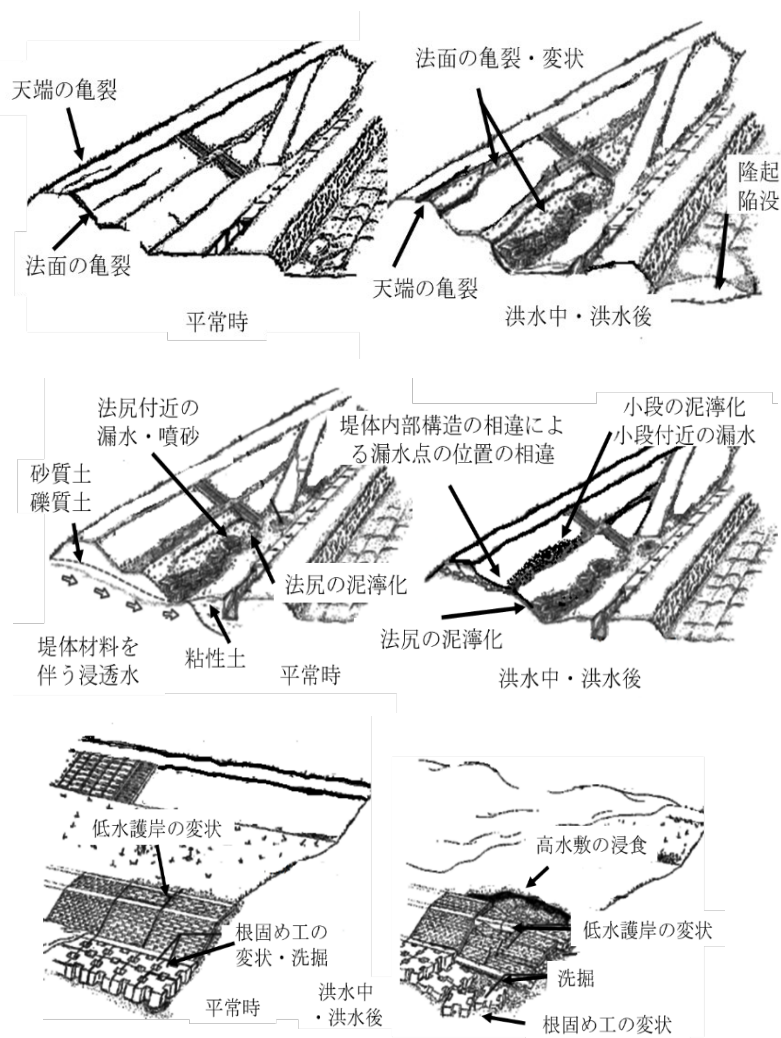


図 1-1 堤防に現れる変状の事例，上段：堤体すべり破壊につながる変状，中段：堤体の浸透性破壊につながる変状，下段：側方浸食につながる変状（国土技術センター 2005 の図に加筆）<sup>8)</sup>

覆土で形成した堤防の法面の透水係数は大きく、降雨浸透によって土質強度が低下しやすい傾向にあるが、堤体内部の土質構造は不明なために、堤体内部を調査する代わりに、堤防の縦横断の形状を把握するのが点検作業の目的である。しかしながら財政上の制約や技術者不足により、長距離にわたる河川の堤防の点検を限られた人員と予算で対応せざるを得ない。定期縦横断測量も実施されるが、200m 間隔での測量作業に基づいて行われるため、変状を見逃す危険性が大きい。これらの課題を解決するために、連続的かつ面的に変状を捉える 3 次元データによる点検作業が可能になる手法が期待されている。そこで航空機、UAV あるいは車両にレーザスキャナを搭載して 3 次元地形測量を実施し、そのデータから変状の発生個所を抽出しようとする事例が数多く報告されている。なかでも、車両で走行しながら連続的にレーザ点群を取得できるモバイルマッピングシステム (Mobile Mapping System : 以下 MMS と称する) は、連続的な測量を迅速に実施できる手法として注目されている。MMS では図 1-2 に示すように、車両にデジタルカメラとレーザスキャナを搭載して走行する<sup>9)</sup>。



図 1-2 MMS 測量システムと搭載するセンサ例

MMS は、複数の衛星からと電子基準点からの情報を統合した RTK 方式の GNSS キネマティック解析により自己測位を実施し、オドメータの値や IMU (inertial measurement unit) による加速度および角加速度から求めたレーザ照射時の姿勢情報と GNSS 時刻による関連付けを行うことで、レーザ照射点の 3 次元位置座標を取得する手法である。これまでも MMS を河川堤防の測量に適用する研究例は報告されている<sup>10)</sup>。例えば、長大な河川堤防を車両走行によって高精度で測量した際、走行中の車両の自己位置の精度と測量精度の関係を検証し、基線長が長くなると測量精度が劣化することを明らかにした結果、電子基準点の選択方法が重要になることが報告されている。さらにこの結果から、VRS (仮想基準点方式) により基線長を 5km 以下にし、調整点による高さ補正を実施することにより、高精度の堤防の測量を可能にした報告などがある。しかしながら、MMS は堤防天端を走行しながら測量を実施するので、堤防上の雑草や構造物が障害となり、レーザ照射の死角が発生する。そのため、堤防天端の沈下は高精度に測量できるが、法面を含めた堤防全体に対して、対策が必

要となる変状を抽出する手法として実用化した例はない。高水敷を走行することにより、天端から計測できない法面の 3 次元データを取得する試みも報告されているが、限られた河川しか適用できず、また機材の再配置によって人的・時間的労力の削減につながらない課題が発生する。これを解決するため、レーザ照射範囲の死角を少なくするように、地上から 3.5m の高所にスキャナを設置した MMS 測量システムの試行も報告されている。実際、この 3.5m の高所にレーザスキャナを設置した MMS は、波返工の沈下の測量に有用であることが報告されている<sup>11)</sup>。図 1-3 は、航空レーザ測量による場合と、3.5m の高所にレーザスキャナを設置した MMS のレーザ測量の分解能を比較したものである。なお、この航空レーザ測量は、公共測量規定に基づいて実施されたものである。

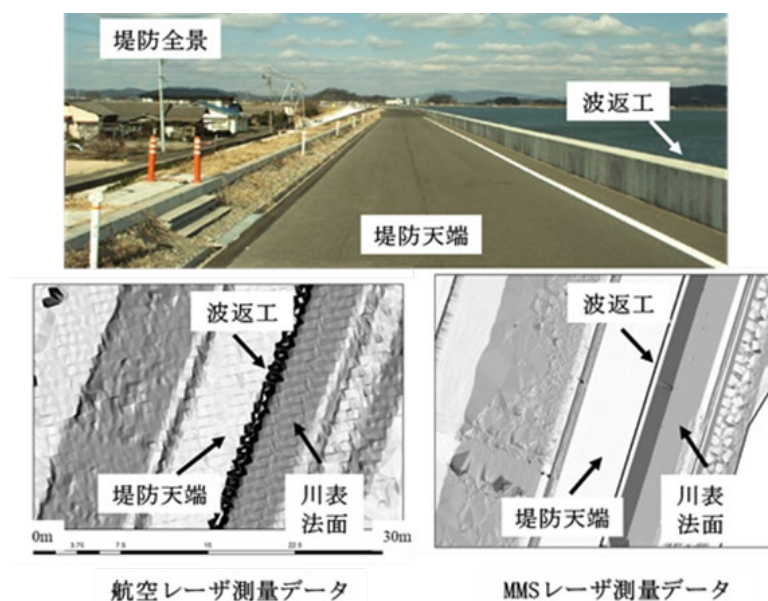


図 1-3 航空レーザと MMS レーザ測量結果の比較

一般的に活用されている航空レーザ測量では、レーザ点群間隔が 0.50m 以上になり、図に示すように幅が約 0.40m の波返工の天端が、波打ったように再現されてしまい、正確な座標値で再現できていない。それに対して、MMS による測量では、点群間隔が 0.10m 以下の高密度で再現するので、波返工の天端の形状が明瞭に表現される。このように MMS は、長距離にわたる測量が簡便であるという車両走行型レーザ測量の特徴を活かしながら、高精度の測量が実施できる利点がある。ただし、図では点群密度に応じた濃淡で堤防を表現しているが、川表の法面は均一な濃淡すなわち均一な点群密度で再現されていない。この 3.5m の高所からのレーザ照射によって取得された点群の詳細を調べたものが、図 1-4 である。図中の横断面図に示すように、波返工の天端は再現できるが、点線で囲まれた法面の個所では、レーザ点群は欠損しており、法面の全体の測量ができていないことが分かる。これは波返工がレーザ光の死角になったことによる。

このような背景を鑑み、本研究では、これまでの 3.5m の高所から照射する場合を含めて、

MMS によって実施される河川堤防の測定の課題を明らかにし、さらにその課題を解決する手法を考察する。具体的には、レーザ光の死角が存在することによる問題を明らかにし、さらなる高所からのレーザ照射により 3 次元データを取得する手法の利点を議論する。次に、その結果に基づいて、堤防の健全性の観点から着目すべき変状を抽出した事例を考察する。河川堤防は、長い治水の歴史を経て形成されてきたため、内部構造の詳細が不明であるうえに、不均一な構造となっている。また複雑な地盤上に築造されるなどの不確実性を含んだ長大な構造物である。そのため堤防内部をボーリングや探査技術により明らかにしても、堤防全体の健全性を評価することが難しい。堤防に現れる微細な変状を検出する技術は、地質情報を直接入手できなくても、堤防の健全性を評価することができるので、人員不足に対応する効率的な堤防の管理を実現するものになると考える<sup>12)</sup>。

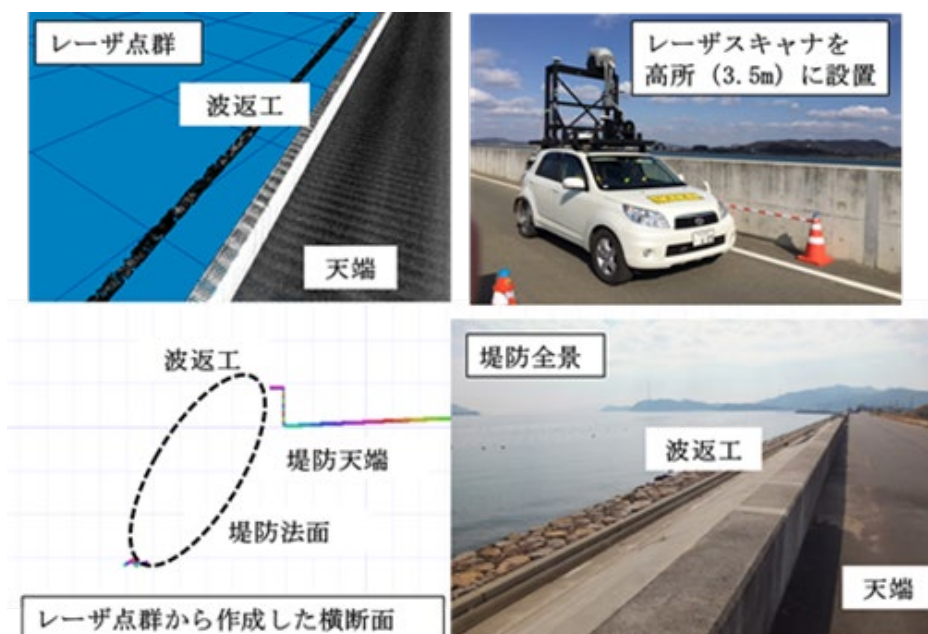


図 1-4 3.5m から照射した MMS でのレーザ点群分布

次に「災害応急対策」における課題は次の通りである。なお解決策は、災害関連死を防ぐための一時避難場所としての商業施設の利用を考察するものであり、これは「共助・自助」における課題と解決策に該当する。2011 年の東日本大震災（Great East Japan Earthquake）では、津波からの避難先として想定されていた指定避難所（Designated Evacuation Shelters）に住民が避難したところ、当避難所が被災してしまい、多くの犠牲者が発生した事例が報告された。この課題を踏まえて平成 25 年に災害対策基本法（Basic Act on Disaster Management）が改正され、避難所（Evacuation Shelters）が被災しないための基準の明確化や避難所における生活環境（living environment）の整備、あるいは避難所以外の場所に滞在する被災者に必要となる配慮の内容等が規定に盛り込まれた<sup>13)</sup>。この法改正以降、「避難生活の良好な生活環境の確保に向けた取組指針（2024 年 12 月改定）（Guidelines for Securing a Good Living

Environment during Evacuation)」(以下、取組指針 (Guidelines) と記述する) 等に基づき、自治体に対して指定避難所における良好な生活環境が確保されることを要求している<sup>14)</sup>。例えば平成28年に発生した熊本地震では、指定避難所での生活による身体的な負担から持病が悪化した事例、あるいは疲労が蓄積することによる心不全や肺炎などの循環器系 (circulatory system)・呼吸器系 (respiratory system) の疾患を発症した事例、さらには指定避難所に入れず、車中泊を強いられることによるエコノミークラス症候群 (Economy Class Syndrome) を発症した事例など、全体の死者273名のうち災害関連死 (disaster-related death) と認められた死者数が約8割を占めた。このような背景により、避難所の運営の見直しなどが検討されてきたものの、2024年に発生した能登半島地震 (Noto Peninsula Earthquake) では、2024年11月26日時点の死者462名のうち約5割が災害関連死であると認められたことを考えると、指定避難所の環境改善にはまだ多くの課題が残されていると言える<sup>15)</sup>。

また人口・世帯数5万人以上の自治体において、人口1,000人あたりの指定避難所の指定数が1.0未満となっている自治体が多く存在しており、避難する場所自体が不足しているという問題があることが指摘されている。前述の取組指針では、指定避難所が不足する場合に備えて、避難所での生活が困難な人々が一定期間滞在して生活する拠点としての2次避難所 (secondary evacuation shelters) を確保することを要求している。図1-5は、災害によって家に戻れなくなった人が、一定期間避難生活を送るための避難所が確保できているのかどうかについて、2024年に市区町村を対象に調査した結果である。調査した1,313の市区町村のうち約半数が、協定等によって避難所を確保している状況である。これは、あらかじめ用意している指定避難所だけでは予想される避難者を収容できない実態を表すものである。また指定避難所としている施設の事例を見ると、学校が多いことから、生活環境に不安を抱える施設が避難所に指定されていることを示している<sup>16)</sup>。

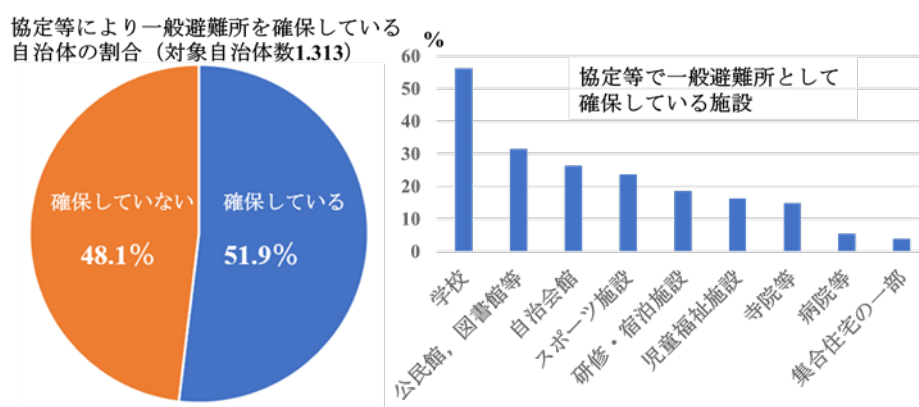
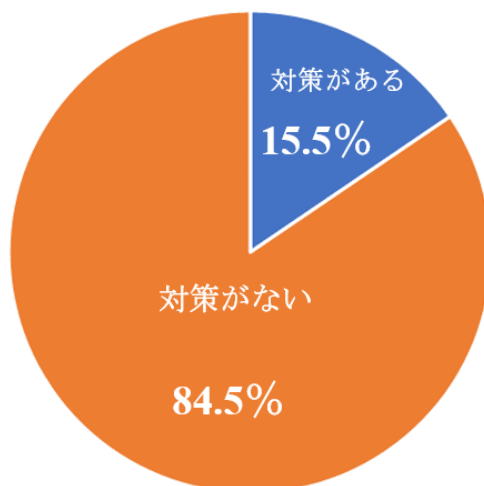


図 1-5 自治体において協定等で指定避難所を確保している実態とその施設の例

避難所での生活が長期化した場合に備え、  
衛生環境の確保について対策はあるか



寝床及びプライバシーの確保に関する  
計画・マニュアル等を策定しているか

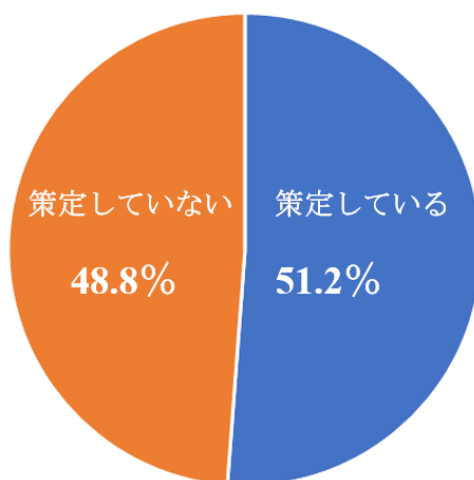


図 1-6 自治体における指定避難所の運営に関するアンケート結果

また図 1-6 は、2024 年時点の市区町村の指定避難所の運営に関する調査結果であり、同じく 1.313 の市区町村の約 85%の自治体の指定避難所において、リネンの定期的な洗濯などの衛生環境の対策がない、あるいは約半数の自治体において、寝床およびプライバシーの確保に関する計画やマニュアルを策定していないと回答している。このように、避難生活の良好な生活環境の確保のための取組は進展していないのが実情である<sup>17)</sup>。

このような背景を鑑み、地域の防災対策の向上策として、商業施設（ショッピングセンター：以下、SC と記述する）を指定避難場所の役割を担う一時避難所として利用することが

検討されている。なお災害の危険から逃れるために緊急的に避難する施設または場所を指定緊急避難場所、一定期間避難生活をするための一時的な滞在施設のことを指定避難所と称して、避難場所と避難所を区別する。ただし災害対策基本法では、指定緊急避難場所と指定避難所は相互に兼ねることができるとされている。SC は外出先で帰宅できなくなった帰宅困難者としての顧客を一時的に受け入れる避難場所としても利用でき、また各店舗における事業再開の程度によっては、被災した地域の居住者を一定期間受け入れる避難所ともなり得る。本論文では、SC を避難所の機能を兼ねた避難場所と想定して、これを意味する一時避難場所という文言を使用する。SC は、滞在するための空間、トイレあるいは空調設備に関して自治体の用意する指定避難所よりも快適な生活環境を提供できるので、災害関連死を避けることが出来る施設として運営できる可能性が高い。その一方で図 1-5 のように、避難所としての利用に関して、自治体との協定等の対象となっている事例はまだ多いとは言えない状況である。また SC の経営の観点から考えると、事業継続計画 (Business Continuity Plan : BCP) を策定する中で、SC が存在する地域に貢献する内容を盛り込むことが注目されている。BCP は災害発生時に事業を継続するための計画であるが、SC は地域住民の生活インフラとしての役割も担うことから、BCP 策定によって早期の営業の再開を確保することは、地域の復興を図る重要な事項でもある。それだけでなく、大規模な SC の空間を地域住民の避難所として開放することは、地域継続計画への貢献にもなり得るので、SC の経営の観点からも意義のあることである<sup>18)</sup>。しかしながら、SC を一時避難場所として活用することが、どの程度有用になるのかの評価は十分に検討されておらず、またその評価手法も確立されていない。これらのことから、本研究にて、SC を一時避難所として利用する有用性を定量的に解析する手法を考察し、その結果から、あらためて SC を一時避難場所として利用することの効果の評価する。具体的には、近年地球温暖化の影響などにより発生危険性が高まっている水害を想定し、一時避難場所として SC が利用できるかどうかを地理的な要因から検討する。次に具体的な場所を想定して、避難する必要のある居住者数を収容できるかどうかの観点により、SC 利用の効果を実定量的に評価する。これらを自治体などが提供するオープンデータを用い、当該データを GIS にて解析することが特徴である<sup>19)</sup>。さらに水害を対象にした場合の解析手順を、地震発生時の津波に対する災害に適用することで、帰宅困難者に対する避難場所として SC を利用する場合に適用し、その効果を議論する。なお GIS は、地理情報システムのオープンソースソフトウェアである QGIS を用い、日本測地系 2011 の座標系上で SC 等を表示する。このようなオープンデータを用いる GIS の解析は誰でも簡便に実施できるので、本研究で示す解析の手順は、地域防災計画の策定において、避難場所として SC を利用する議論を活性化することに寄与するものと考え<sup>20)</sup>。

## 第2章 地域防災計画の課題の解決策

### 2.1 「災害予防」における課題と解決策：河川モニタリング技術の開発

図2.1-1は、岡山県内の1級河川の勾配を日本及び世界の河川と比較したものである。図に示されるように、日本列島は標高1000~3000mにもなる山脈によって太平洋側と日本海側に分けられており、平野や盆地に流れ込む河川は河口までの距離が短いことから、上流から下流への勾配が急であることが特徴である<sup>1)</sup>。そのため降雨時の比流量の時間変化の事例を示した図2.1-1および2.1-2からわかるように、急に増水し短時間のうちに洪水のピークになる。

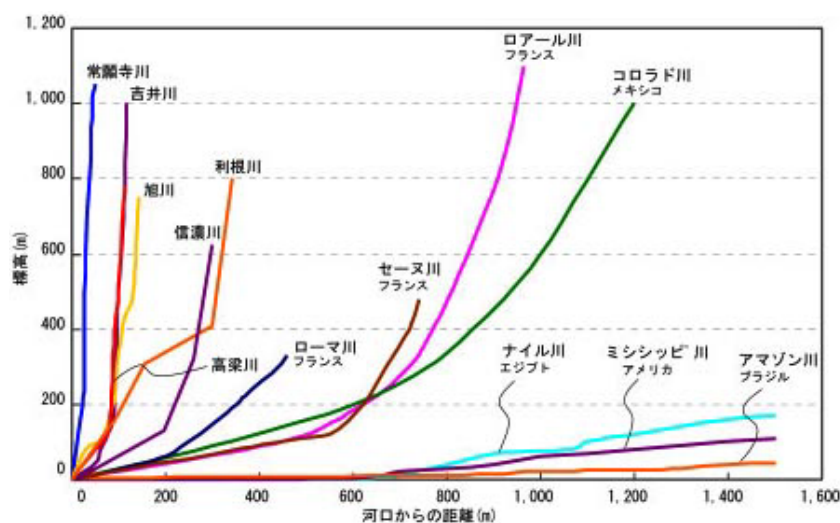


図2.1-1 世界やわが国の主要河川の勾配

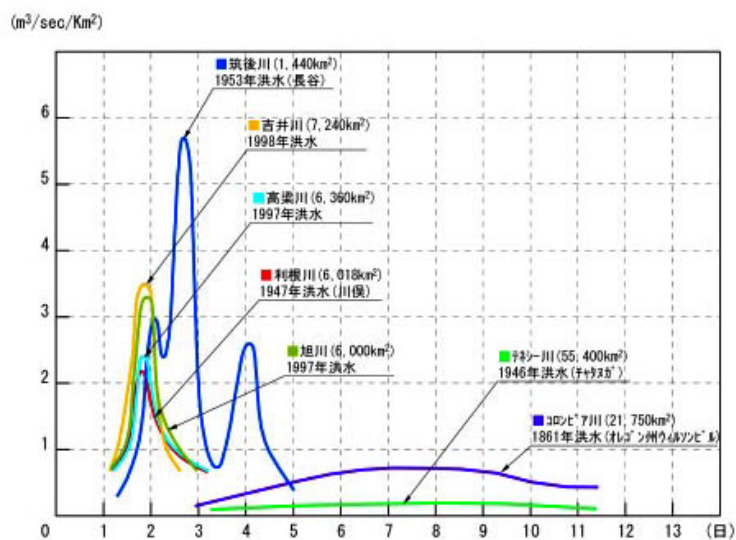
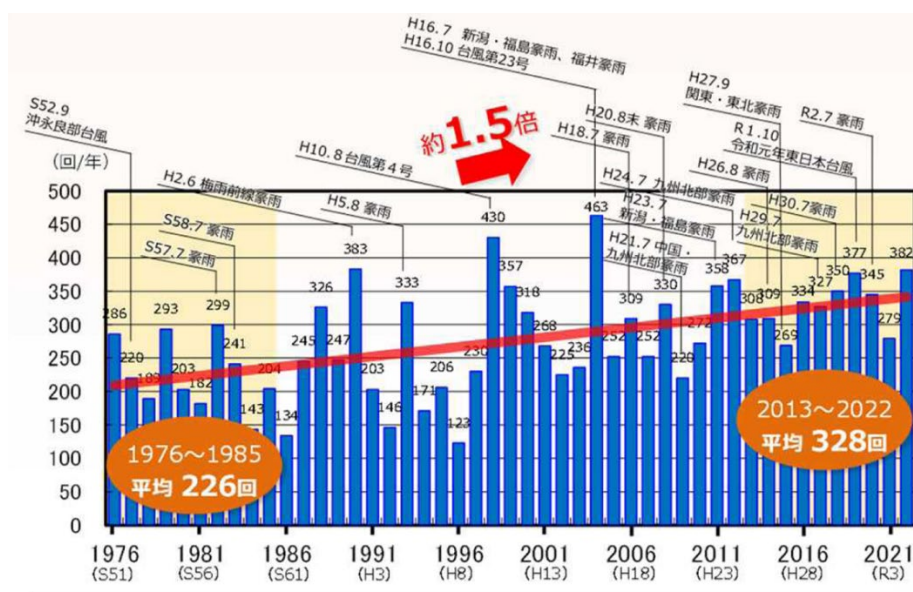


図2.1-2 世界やわが国の主要河川の洪水の特徴

その一方、地球温暖化等の気候変動により、時間雨量50mmを超える短時間強雨や総雨量が数百mmから数千mmを超えるような大雨が多発しており、全国各地で毎年のように甚大な氾濫や堤防決壊による浸水被害が発生している。時間雨量50mm以上の年間発生回数は、図2.1-3に示すように1976年から1985年の10年間の平均回数は226回であるが、2012年から2021年の10年間の平均回数は327回と1.5倍の増加傾向を示している<sup>2)</sup>。



1時間降水量50mm以上の年間発生回数（アメダス1,300地点あたりに換算した値）  
気象庁資料より作成

図2.1-3 1時間降水量50mm以上の年間発生回数（アメダス1,300地点あたり）

2018年7月、平成30年台風第7号及び梅雨前線等の影響によって、西日本を中心に、全国的に広い範囲で記録的な大雨となった。その際には、6月28日~7月8日の総降水量が四国地方で1,800mm、東海地方で1,200mm、九州北部で900mm、近畿地方で600mm、中国地方で500mmを超えるところがあるなど、7月の月降水量が平年値の4倍となる大雨となったところがあった。図2.1-4は倉敷市における堤防の結果に起因した浸水状況である。特に長時間の降水量について多くの観測地点で観測史上1位を更新し、24時間降水量は77地点、48時間降水量は125地点、72時間降水量は123地点で観測史上を更新した。これにより、国管理で2箇所、県管理で35箇所、計37箇所堤防が決壊し、甚大な被害を引き起こされた。将来の気温上昇を2°C以下に抑えることを前提とした気候変動シナリオRCP2.6では、20世紀末と比べて21世紀末には、降雨量は1.1倍、河川における流量は1.2倍、洪水発生頻度は2倍と試算されており、今後も水害のさらなる頻発・激甚化が懸念される。その他、線状降水帯のような豪雨をもたらす要因が増加する傾向を考慮すれば、膨大な延長距離にわたる堤防の健全性を綿密に点検することが、より一層重要になる<sup>3)</sup>。



図2.1-4 岡山県倉敷市真備町の浸水及び排水状況<sup>4)</sup>

日本では、日本は大河川の周辺で稲作農耕文明を築き上げてきたという歴史もあり、その延長上で、明治以降、都市化・工業化が進み、氾濫原に人口・資産が存在する。現在、河川管理施設によって多くの住民やその生活が守られているが、河川管理施設の中でも、人口の約1/2、資産の約3/4が河川堤防システムを中心とした治水システムに守られており、河川堤防システムの破綻は、日本全土に多大なる影響をもたらすこととなる。そのため、堤防や水門等の河川管理施設が所要の機能を発揮し、堤防の決壊や河川の氾濫等による水害を防止または軽減していくためには、適切に河道や河川管理施設の維持管理を行う必要がある。また、多様な生物の生息・生育・繁殖環境としての河川環境の保全・整備や、地域の活力の創出やうるおいのある生活のための公共空間としての利用等に関する要請も強く、このような観点からも適切に河川の維持管理を行う必要がある。一方、高度経済成長期に多くの河川管理施設の整備がなされ、図2.1-5示すように近年それらの施設の高齢化が進み今後更新時期を迎えることとなっている。そのため、それら施設の維持管理・更新費用の増加が想定されているが、今後の財政状況を考えるとより一層の効率的な河川管理施設の維持管理・更新が求められている。このような状況下の対応として、戦略的な河川維持管理に向けた取り組みを進めていくことが重要となる。

河川の維持管理にあたっては、河川点検、河川巡視による状態把握を長期間にわたり繰り返す、それらの一連の作業の中で得られた知見を分析・評価して、河川維持管理計画あるいは実施内容に反映していくという図2.1-6に示すPDCAサイクルを構築することを基本としている。河川点検・河川巡視とは、日本の河川維持管理業務の一つである。この二つは、明確に区別されており、河川点検は河川の状態を詳しく把握する目的で行われ、年に二回程度実施される。

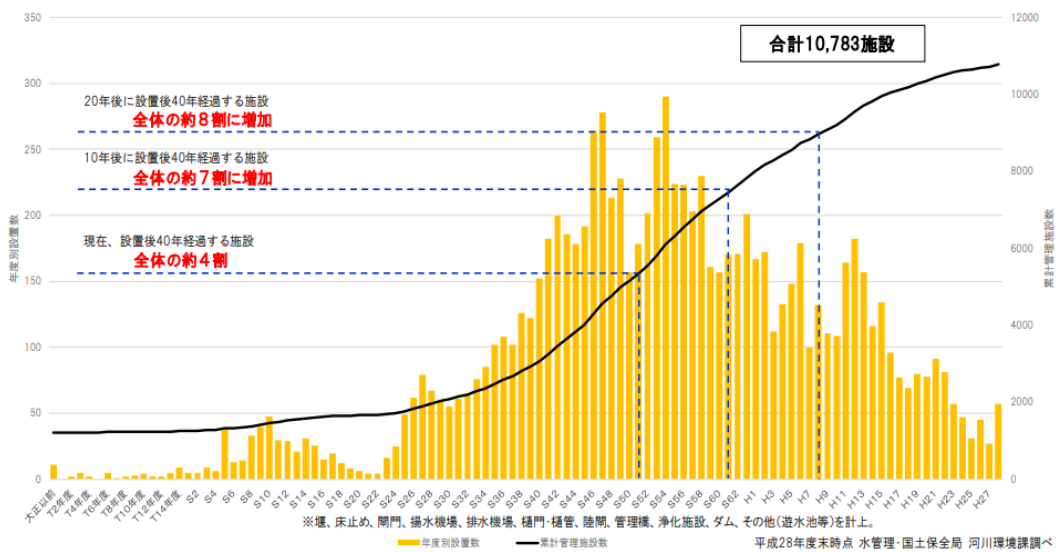


図2.1-5 国直轄河川管理施設数<sup>5)</sup>

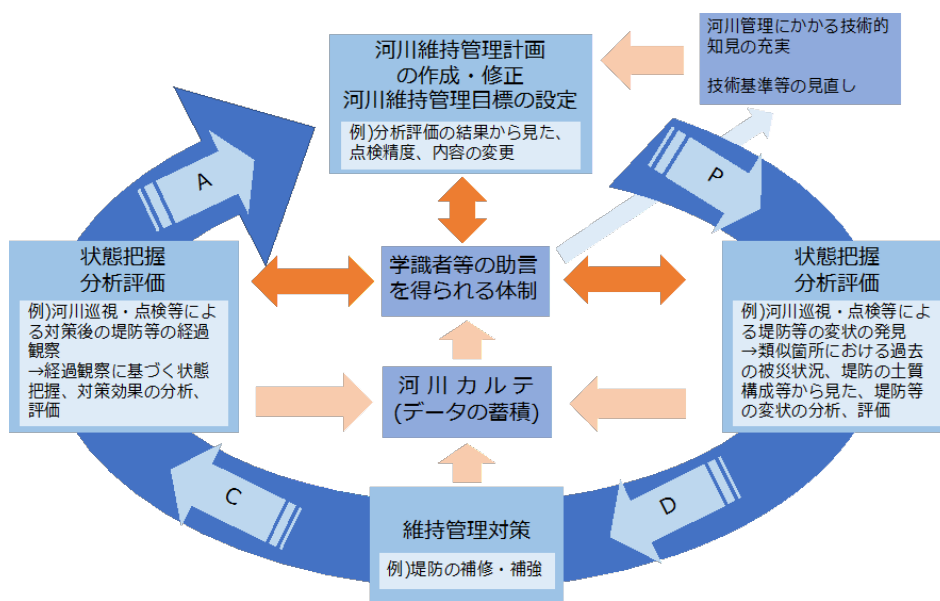


図2.1-6 サイクル型維持管理体系イメージ<sup>6)</sup>

一方、河川巡視は、平常時に河川管理の一環として定期的・計画的に河川を巡回し、その異常及び変化等を発見し、概括的に把握する目的で行われており、刻々と変化する河川の状態を把握するための重要な役割を担っている。現在の河川管理では、出水期、台風期及び出水後の徒歩による目視点検あるいは200mごとの定期縦断及び横断測量の結果により判断されているのみである。ところが、主に実施されている図2.1-7に示す目視点検では、経験に基づいた健全性の判断に頼っており、定量的なデータがないために、必要な箇所を優先的に対

策するための客観的な根拠に乏しいのが実情である。線状構造物である河川堤防は、1箇所でも破堤すると甚大な被害が発生するが、技術者と予算の不足は深刻化しており、点検作業の詳細化や回数の増加を図ることは不可能である。そこで、河川を管理する上で、効率かつ定量的にデータを取得できる計測手法が求められている<sup>7)</sup>。



図2.1-7 目視点検の状況

また近年の建設業界では、業務の高度化・効率化を目的として建設DX（デジタルトランスフォーメーション）という取り組みがなされている。DXとは、従来のデジタル化とは区別して用いられている用語で、単にデジタル技術を導入することが目的ではなく、デジタル技術の活用により次世代のシステムを確立することを目的としている。その取り組みとして、建設現場の生産工場のためにBIM/CIM（Building Information Modeling/Construction Information Modeling）、ICT（Information and Communication Technology）、IoT（Internet of Things）等のデジタル技術を導入するi-Constructionや、人工知能（AI: Artificial Intelligence）の活用、維持管理のビッグデータ管理、UAVの活用などによる業務効率化が図られている<sup>8)</sup>。

河川維持管理においてもDXの取り組みがなされており、国土交通省では、河川行政における課題を解決するため、企業等が有する優れた先端技術を活用して技術開発を推進する「革新的河川技術プロジェクト」を2016年11月に立ち上げた<sup>9)</sup>。これまでに、全天候型UAVの開発や洪水時の観測に特化した低コストの水位計（危機管理型水位計）、簡易型河川監視カメラなどの技術開発を行い、中小河川を含めた河川現場に実装している。ここでは、河川の定期縦横断測量の業務などにおいて、航空レーザ測深（ALB: Airborne Laser Bathymetry）に代表されるICT機器などによって取得される三次元点群の活用が検討されている。点群測量とは、レーザ測量機器などを用いて地表面や河床などの高密度三次元地形データを取得する測量方法のことである。従来の測量では、1点1点測量した「点」を繋ぎ合わせていた地形データが、この測量により、地形を連続的な「面」として可視化できるデータとして測量することができる。図2.1-8に示すように、これにより地形を詳細に、視覚的に把握でき、定量的なデータを取得することができるため、詳細な点検・調査が実現する。また、短時間で大量のデータを高密度にくまなく測量できることから測量の効率化を図ることも可能であ

る。この利点を含めて、ICT機器による三次元データの活用は次のような効果が得られ、河川管理の効率化・高度化につながる。

- (1)長大な河川管理延長に対して、縦横断測量の工程を短縮し、費用を低減できる。
- (2)2時期の計測データから、地形や樹木等の面的な変化を把握することができる。
- (3)危険な場所への立ち入りが不要なため、作業の安全確保、環境への負荷を低減できる。

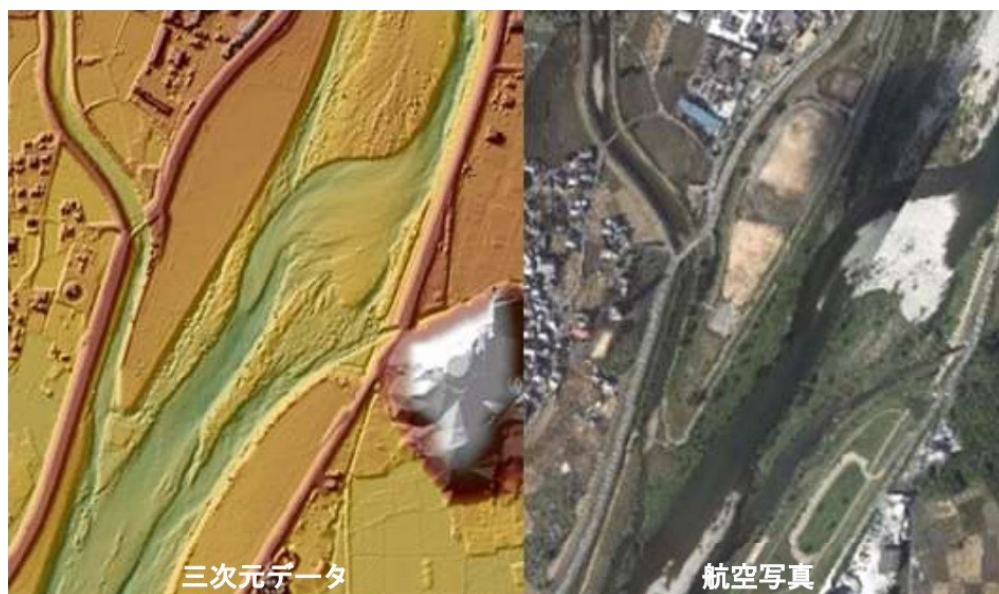


図2.1-8 河道形状の計測例（左：三次元データ，右：航空写真）

現在、国土交通省から「河川管理用三次元データマニュアル（案）」という河川管理のための適切な三次元データの必要性及び特性を取りまとめるとともに、河川定期縦横断測量業務等において、点群測量の標準的な一連の作業方法や考え方、活用する上でのポイント等をまとめたものが示されている<sup>10)</sup>。また、このマニュアルでは、河川管理に対する社会的な関心の高まりから、従来手法から三次元データの活用による河川管理の効率化・高度化に重点を置き、河川管理項目に応じた基準（精度、点密度等）、活用方法、活用する上での注意点等が示されている。特に前述のALBでは、陸部には近赤外レーザを用い、水中部には水を透過するグリーンレーザを用いることで水面下の地形が計測できるので、従来の定期縦横断の代替となる手法として期待されている。しかしながら、航空機による計測は、300m以上の対地高度からの計測となり、陸上で約16点/m<sup>2</sup>、水中部で1点/m<sup>2</sup>程度のレーザ点群密度しか得られない。しかもグリーンレーザのスポット径は1m程度になるので、標高の測量精度は0.2m程度が限界となり、詳細な地形変化を捉えることが困難である。このような背景から、点群測量には、様々な手法が用いられており、目的や場所に合わせて手法を選ぶ必要がある。表2.1-1にレーザ測量技術の点密度・精度・適用可能な河川部位、図2.1-9に3次元の面的な計測手法の点密度と測量範囲を示す。

表2.1-1 レーザ測量技術の点密度・精度・適用可能な河川部位

レーザ測量技術	点密度の目安	測量精度（標高）	適用可能な河川部位
ALB	陸部：16点/m <sup>2</sup>	縦断：約3cm 横断：約9～15cm	河道全体（陸部）
	水部：1～4点/m <sup>2</sup>	水部：約20cm	河道全体（水部）
MMS	400～1,800点/m <sup>2</sup> 程度	天端：約5cm 法面：約25cm (除草状況による)	堤防, 橋梁, 河川横断構造物等
地上レーザ	10,000点/m <sup>2</sup> 程度 設置場所の変更により 密度の調整が可能	測定範囲：800m程度 精度：約1cm (機器により異なる)	河道全体(狭小範囲)
UAV搭載レーザ	100点/m <sup>2</sup> 以上	誤差：1cm以上	河道全体(狭小範囲)

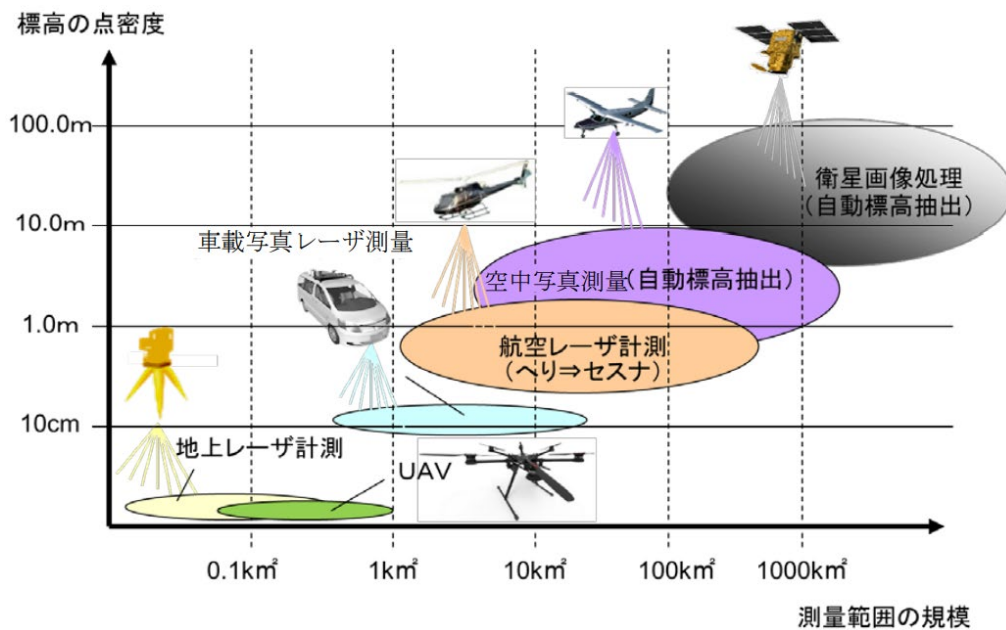


図2.1-9 3次元の面的な計測手法の点密度と測量範囲

このような背景を鑑み、本研究では、河川分野のDXを実現する手法として、迅速、簡便かつ安価に実施できるMMSによる三次元点群取得技術の利点と課題をまとめ、河川管理への適用と活用法の検討を目的とする。図2.1-10に示すように、MMSは航空レーザ測量においても使用されるGPS測量機、IMUや、走行距離を計測するオドメータを使用し自己位置情報を取得しながら、車両に搭載されているレーザスキャナとカメラにより、走行しながら3次元座標を取得することのできる計測機器である。MMSは路面性状の維持管理のための計測

手法として多くの研究がなされてきた。また、これに関わる精度検証実験も行われているが、河川堤防モニタリングへの活用に関する研究は実用化の検討が始まった段階である<sup>11)</sup>。

現在の点検では、目視点検や実測による定期縦横断測量により河川堤防の維持管理を行っているが、河川堤防での維持管理は、河川堤防というシステム自体が河川に沿った長大な構造物であることから河川堤防システムという‘線’としての観点で見た計測がふさわしいといえる。そのため、既に述べた通り、現在の200m間隔で行われる定期縦横断測量での計測は十分なデータであるとは言えない。また、近年の度重なる異常気象や河川堤防の維持管理に要する財源が厳しくなっていることから、さらなる効率化と定量的な維持管理手法が求められている。こういった背景のもと、車載型の計測機器は河川堤防の天端を走行し、必要な部分の計測をすることのできる利便性と、河川堤防システムの維持管理を可能にする高密度3次元座標の取得、そして、取得座標を用いた測量により定量的な評価ができるという利点を有しており、河川堤防の維持管理において適した計測手法であると考え<sup>12)</sup>。

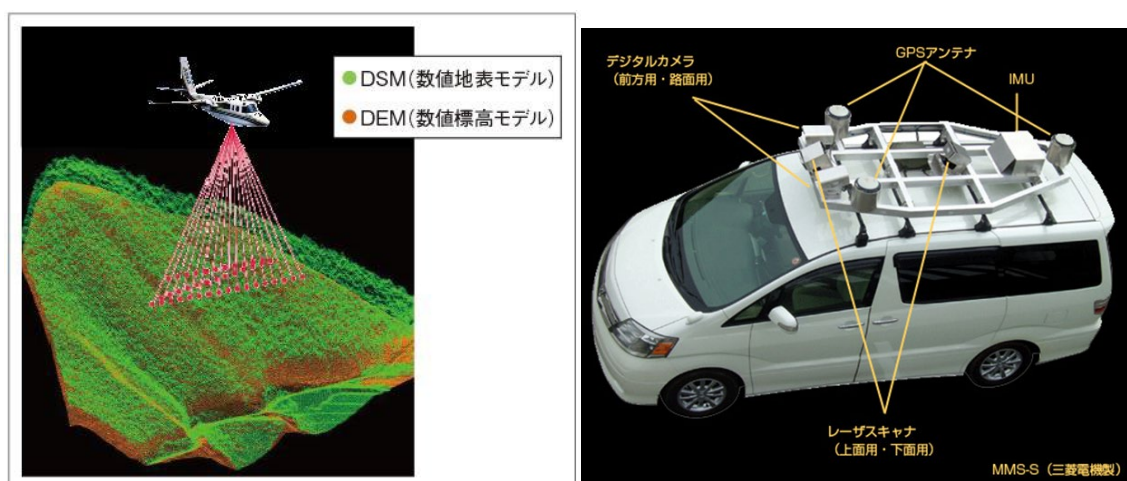


図 2.1-10 レーザを用いた計測機器例(左;航空レーザ測量 右;MMS)

## 2.2 河川堤防モニタリング開発技術の概要

河道や河川構造物の被災箇所とその程度はあらかじめ特定することが困難であり、河川維持管理はそのような制約のもとで、河道や河川構造物において把握された変状を分析・評価し、対策等を実施せざるを得ない。実際の河川管理では、河川の変状の発生とそれへの対応、出水等による災害の発生と対策や新たな整備等を繰り返し実施することにより安全を確保してきている。そのため、河川維持管理に当たっては、河川巡視、点検による状態把握、維持管理対策を長期間にわたり繰り返し、それらの一連の作業の中で得られた知見を分析・評価して、河川維持管理計画あるいは実施内容に反映していくという図 2.2-1 のような PDCA サイクルの体系を構築していくことが重要である。PDCA サイクルの導入により巡視や点検、調査結果がどのように活用されるのかを明確にすることにより、無駄がなくなり、さらには、問題が発生した後に対応する「事後保全」的管理から、問題が発生する前に予測

して対応する「予防保全的」管理が可能となり、効率的な河川維持管理の実現が期待できる。河川管理は出水時の洪水対応をはじめとして、通常時も巡視や維持工事を実施し、安全や安心の確保をしているが、日常や洪水時の活動を国民に理解いただくことが、河川管理への理解や協力につながり、より一層の河川管理活動への支援を得ることになる。このため、河川管理活動をいかに「見える化」ができるかが重要となる。

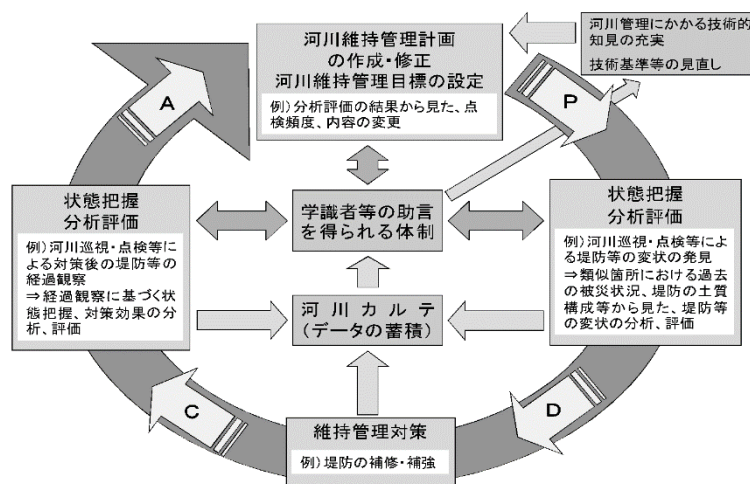


図 2.2-1 国土交通省 河川砂防技術基準 維持管理編(河川編)令和 7 年より抜粋  
サイクル型維持管理体系のイメージ<sup>13)</sup>

近年、全国各地で短時間スケールの豪雨の頻発に伴い、これまで破堤に直結しないため重要視されていなかった、図 2.2-2 のような雨水が原因と疑われる堤防法面の表層すべり被災が発生している。その一方で、浸透対策上天端舗装が推奨されていることや、鬼怒川破堤を契機とした危機管理型ハード対策を受けて、1,800 km の延長にわたり天端のアスファルト舗装を行う施策が打ち出され、今後これに基づく堤防整備が行われた場合、降雨の天端から法面への排水が助長される恐れがあることから、堤防の雨水に対する対策や管理が求められている。平成 27 年 8 月の台風 15 号の影響による筑後川での表のり崩れの他、全国の直轄堤防を対象として収集すると、水位が低いにも関わらず、堤防の法面すべりが発生した事例が多数報告されている。これらの特徴を示すと次の通りである<sup>14)</sup>。

- ・ 形状に着目すると、20 事例中 16 事例で天端舗装がなされており、天端に降った雨水は浸透せず、法面に排水されている可能性がある。
- ・ 堤防土質構造に着目すると、多くの事例での法面は覆土成形した箇所であり、切土成形よりは透水係数が高い可能性がある。
- ・ 被災時降雨量についてみると、最大時間雨量が 10mm、累加雨量 50mm 程度でも被災を生じている。

## 排水不良による堤防の変状事例が多い

○変状箇所：法面

○変状種別：堤防天端と坂路からの排水の集中による法面侵食

○点検結果評価：措置段階

・天端法肩に生じた局所的なガリ侵食、雨水の集中がないか等の原因を調査、強い降雨時に侵食が拡大する可能性あり



図 2.2-2 堤防法面の変状事例：平成 30 年国土交通省資料より<sup>15)</sup>

これまで雨水排水を原因とする堤防すべり被災については、それが直ちに破堤に結びつく現象ではないこともあり、堤防管理において重要視されてこなかった項目である。全国における堤防すべり被災の実態調査結果や、筑後川における代表被災事例をもとに、管理手法としての MMS の活用や堤防天端の雨水排水に着目した巡視が重要視されている。堤防における一部分のみの大きな変状は、目視点検においても周りとの相対的な差から把握することは可能であるが、堤防全体の変化や、一部の微細な変状となると目視点検ではこれを把握することは困難である。中でも、法面の変状は堤体の崩壊につながる変状の一つであり、この変位量を継時的にモニタリングすることができれば、河川堤防維持管理への有効な手段であるといえる。しかし、現状の MMS のような車両型計測機器では、目視点検で確認できている箇所の中にも堤防法面の傾斜角度や擁壁・特殊堤防等の構造物などの影響で死角ができることで欠測となる部分が出てしまうことがある。また、植生の影響により、レーザ光が地表まで到達せず、正確な地表の断面形状を把握することが困難になる。これにより、はらみだしのモニタリングに対して、欠測が生まれ適応性が損なわれる可能性が考えられる。そのため、法面形状を精度よくとらえることのできる計測手法が必要であり、これに関わる点密度に関しても検証を行う必要がある。

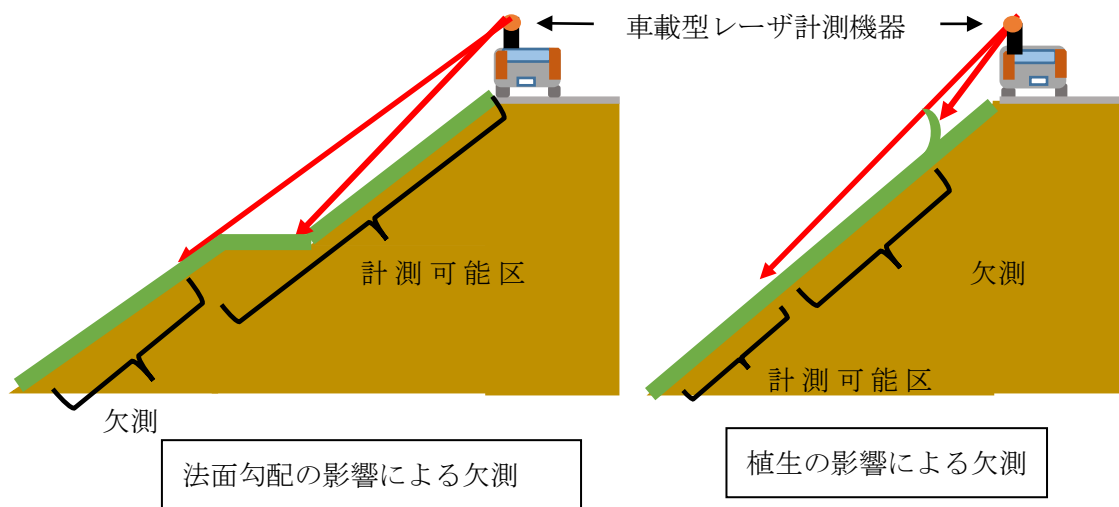


図 2.2-3 欠測の概念図

これらの背景を鑑み、本論文では欠測への対策を試みるため計測機器をリフトアップすることができる車載式リフトアップ型 3D レーザスキャナを用いた検証作業を行う。本計測機器を用いた河川堤防の天端と法面全体のモニタリング手法を確立するために、これに関わる精度検証を行なう。天端や法面の変状のモニタリングに際しては、2 時期以上の計測による差分解析が求められるが、解析に際して法面形状の変化での管理が重要であり、計測機器の相対精度、並びに絶対精度が高精度であることが求められる。そこで、本計測機器の精度検証を行うために数点の検証点に対してトータルステーション(以下 TS)と 3D レーザスキャナにて計測を行い、これらの計測データを同一座標にて比較することにより、TS の計測データに対する絶対精度を求める。また、2 時期のデータの重ね合わせによる相対精度も算出する。更に、計測されたデータの点密度についても検証を行う。次に、実際に河川堤防にて計測を行い、法面の点群のばらつきを評価することで今後、法面の変状モニタリングを行うにあたり解決が必要となる課題について示す。

### 2.3 ハード開発技術およびソフト開発技術の概要

本節では、河川堤防のモニタリング手法の研究に使用する 3D レーザスキャナについて詳述する。まず 3D レーザスキャナを使用した計測の手順について示し、次に本研究に用いる 3D レーザスキャナとこれに関わるデータ処理技術について述べる。研究において用いる 3D レーザスキャナの計測では、計測機器を原点とする 3 次元座標系上の座標値とカメラにより撮影された 360 度のオルソ画像(正射画像)が取得できる。その計測データをソフト上にて他の座標系のデータを後付けで付加させることで、数時期にまたがる計測においても計測位置にとらわれることなく、後付けした座標系上での解析が実現できることが特徴である。

この座標の後付けの作業を以後レジストレーションと呼ぶ。本研究における計測では、測量法に記載される平面直角座標系を用い座標系の統一を行う。平面直角座標系は 19 の系により構成されており、それぞれの系に座標原点が存在する。また座標軸は 19 系すべてに対して真北に向かう方向を x 軸の正、真東に向かう方向を y 軸の正と規定されている、後述する検証実験においては岡山県内での計測であるため、平面直角座標系における 5 系を使用し、ターゲット位置については GNSS 測量あるいはトータルステーションにより取得している。

本節ではまず本研究にて使用する車載型計測機器の概要と、3D レーザスキャナについて述べる。次に本研究において使用される 3D レーザスキャナの特徴である位相差方式による距離計測の原理について述べる。最後に得られた 3 次元データを処理し、点群データを作成、閲覧するためのソフトについて詳述する。前章でも述べた通り、本研究において用いる計測機器は本来の 3D スキャナのように三脚に設置し計測するものではなく、車載したポールの上に計測機器の本体となる 3D レーザスキャナを設置するため、高所からの計測を行うことができるという利点を持つ。その車載型 3D スキャナの画像を図 2.3-2 および 2.3-3 に示す。下図のように、走行時はポールをたたみ、計測時は最大で約 5.35m の高さまで伸縮させることができる。これらの機構を備えているため、計測位置が複数個所求められる計測においても、移動時はポールを縮め一般速度の車両として移動を行い、計測時には車両を停止させ計測高さまでポールを伸長させることができるため、効率的な計測を行うことができる、また図におけるポールの先端の白い箱は水平維持装置であり、伸長後の整準を自動で行う仕組みとなっている。次に、本研究にて使用する 3D レーザスキャナについて説明する。一般的な 3D レーザスキャナは主に、座標を取得することを目的としたレーザ部と、計測によって取得した点群に色付け等を施すためのカメラ部から成り立つ。レーザ部は、ミラーやエンコーダと呼ばれるセンサとレーザ照射機から構成されている。ミラーやエンコーダは、照射されるレーザ光と対象物との角度を計測することが可能で、照射位置と照射対象物との垂直角をミラーで水平角をエンコーダにて計測を行う。またレーザ照射機はレーザ光を照射することにより対象物との距離を計測することができ、レーザ光による距離計測には、計測方法の違いから 2 つの方式が存在する。

一つは対象物に放射したレーザ光の反射時間を測定することにより距離を求める TOF 方式であり、もう一つは様々な波長のレーザを照射しそれぞれの反射してきた波の位相差を計測することにより対象物からの距離を計測する位相差方式である。本研究にて使用するレーザスキャナの距離計測方法は位相差方式によるもので、これによる距離計測について



図 2.3-2 3D レーザスキャナの昇降図



図 2.3-3 車載型 3D レーザスキャナ

は次項にて詳述する.これにより得られた計測対象物への距離と垂直角・水平角より 3D レーザスキャナを中心とした座標を得ることができる<sup>15)</sup>.

#### 2.4 ハード技術の開発内容：位相差方式による距離計測

本研究における計測機器は上述した位相差方式による計測であり、この方式の利点は計測にかかる時間が短いということである。そのため効率的な計測を行うという部分において適しており、長大な構造を持つ河川堤防の計測に対しては大きな効果をもたらすと考える。位相差方式による距離計測の一般的な原理概念を図 2.4-1 に示す。図はレーザー照射機より照射されたレーザー光が計測対象物にて反射され照射機に戻ってくることを示している。レーザー照射機から計測対象物までの距離を  $D$ 、照射されたレーザーの波長を  $\lambda$ 、計測距離  $D$  までの間に照射されたレーザーの波長が  $N$  個存在すると仮定する。この時照射されたレーザーは計測対象物で反射され、位相差  $\phi$  のずれを持ち照射位置まで戻ってくるとする。この位相差を測定し、照射機内の変調器により異なる波長のレーザー光を照射することで、計測距離  $D$  を推定するというのが位相差方式による距離計測技術である<sup>16)</sup>。

計測距離  $D$  は  $\lambda$ (波長),  $\phi$ (位相差),  $N$ (計測距離内の波数),  $K$ (定数)を用いて式 2-1 で表される。

$$D = \frac{\lambda}{2} \left( N + \frac{\phi}{2\pi} \right) + K \quad \text{式 2-1}$$

式 2-1 内の  $\lambda$  は変調器によって周波数を変えることで以下の式 2-2 より導かれる。C は光速度を, f は変調周波数を表す。

$$\lambda = \frac{C}{f} \quad \text{式 2-2}$$

また式 2-1 の定数 K は計測機器によってそれぞれ独自の値を持つ。そのため, 式 2-1 に関しては,  $\lambda, \Phi, K$  が既知数であり, N と求めた D が未知数である。そこで, 初めに N=0 となる波長の長いレーザ光を使用し, 距離の概要を計測する必要がある。この時の D は以下の式 2-3 で表すことができる。

$$D = \frac{\Phi}{4\pi} \lambda + K \quad \text{式 2-3}$$

これにより求められた計測距離は波長によって最大誤差量が変化する。仮に数 km もの長い波長を使用したとすると, 位相差の測定精度が  $2\pi/1000$  程度であることから最大誤差はメートル単位で現れる。そのため, より精密な距離測定を行うためにはこれよりも短い波長を使用し, 測定距離の最大誤差を細かくしていく必要がある。一般的には, これらより得られる計測距離の信用できる数字を組み合わせることで計測距離を求める。

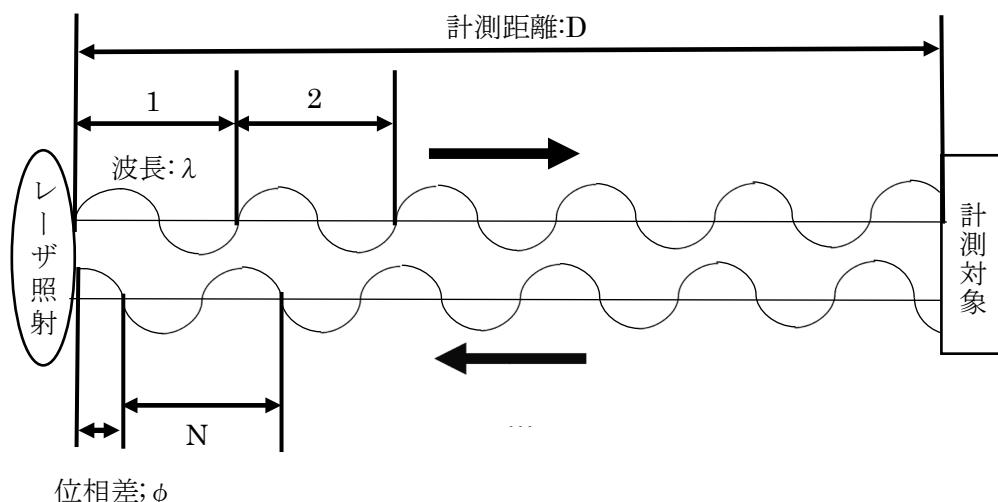


図 2.4-1 位相差方式による距離測定 の概念

## 2.5 ソフト技術の開発内容：高密度点群処理技術

本研究では, 3D レーザスキャナによって取得した計測データの処理手法も検討した。使用したソフトウェアは, Z+F 社製 LaserControl と AUTODESK 社製 ReCap を組み合わせた。既に記述した通り, 3D レーザスキャナによる計測では, レーザによる座標計測とカメラによる点群のカラー化を行うことができる。堤防等の可視化処理では, レーザ測量により取得

した 3 次元の点群と撮影した画像から作成されるオルソ画像を用い、点群上にオルソ画像を重ね合わせてカラー化を施す。これにより点群のデータは、図 2.5-1 に示すようにカラー画像化される。画像内の青色はレーザが到達せず座標が取得できなかった部分や、計測角度や位置関係により計測ができなかった欠測部分である。また右側下部の画面ではカメラにより撮影されたオルソ画像であり、本研究では、これらの 2 つの画面内の情報を用いることで、点間距離の測定や点座標取得が実施できるソフトウェアを開発した。図 2.5-2 は、堤防全体を点群により可視化した事例である。

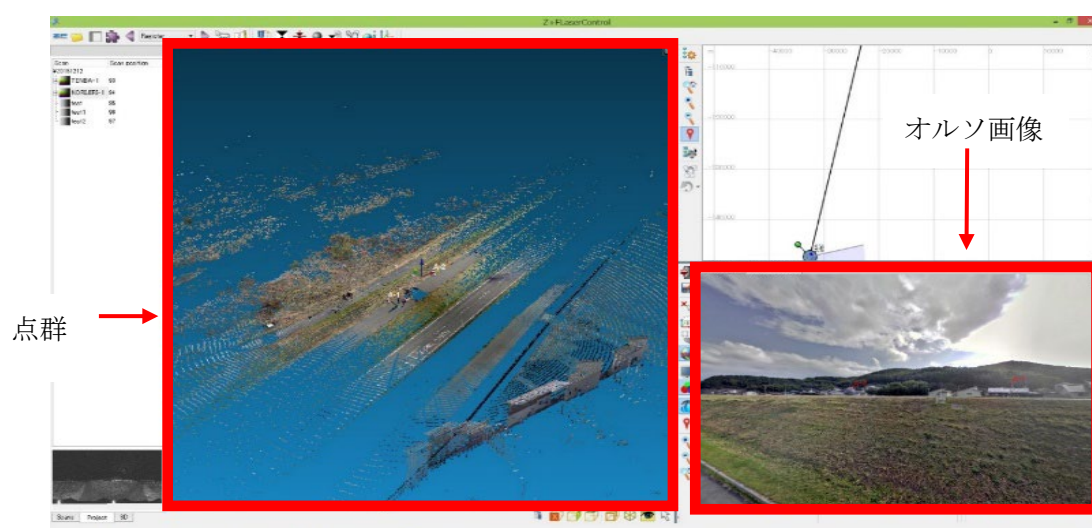


図 2.5-1 カラー化した点群データの例

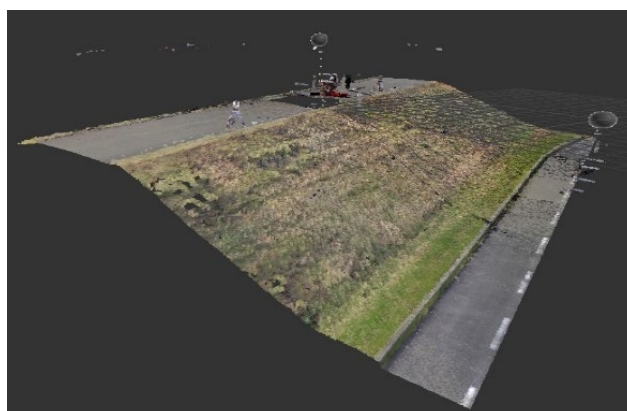


図 2.5-2 河川堤防を再現した点群データ例

次に取得された高密度データに対応できる分析処理の検討を行ない、河川堤防管理のために開発したソフト技術の成果をとりまとめる。本手法では、図 2.5-3 のように広範囲で高密度のレーザ点群データが取得される。そのデータを利用して堤防の変状のモニタリングを実施するにあたり、堤防地表面を適正に評価する必要がある。しかし堤防法面は、通常の

道路や堤防天端と異なり，土堤表面を保護する芝が育成している．出水前の除草後においても，5cm程度の幹を残した状態で存置するため，芝と地表面に照射されたレーザ点群が入り混じった状態で点群データが取得される．ここでは，レーザスキャニングによって得られた堤防の点群データをもとに，地表面もしくは，地表面に限りなく近いデータを取得し，経年変化を分析しデータとして保管する手法であり，さらに大容量のデータ処理法について検討した成果を記述する<sup>17)</sup>．

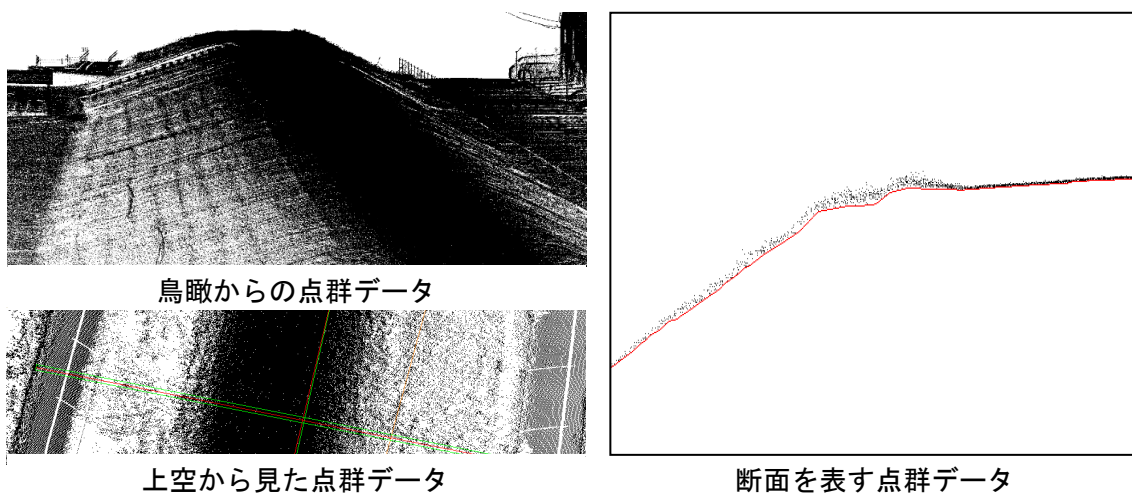


図 2.5-3 堤防に照射され取得されたレーザ点群データ

開発したソフト技術は，MMS によって取得されたレーザ点群データに対し，MMS 計測時の回転併進移動（：ロール角および高さ）すなわちレーザ照射時の姿勢の補正を行うことで，2 時期の計測データを正確に重ね合わせる技術である．計測データに関して，図 2.5-4 は計測時の補正を行う前のデータを表す．図に示すように，車両走行速度を変えた計測データごとに表す堤防形状が異なっていることが分かる．これに対して開発した技術を導入した結果が図 2.5-5 である．補正後は遠距離の位置座標も正確に重なっていることが分かる．この技術により，レーザ密度が少ない個所に対して複数回の計測を重ね合わせることで精度を向上させる，および 2 時期の計測データを重ね合わせることで変状箇所を抽出することが可能になる．

さらにレーザ点群から堤防の地表面を抽出して 3 次元形状を復元させる技術を記述する．具体的には，図 2.5-6 に示す右岸の河川距離標 R14.2km より 135m 区間の堤防を検討範囲とし，堤防法面の地表面を抽出する技術に関して記述する．なお堤防形状の計算では，期間をおいた計測により得られた 2 時期の点群データを対象とした．

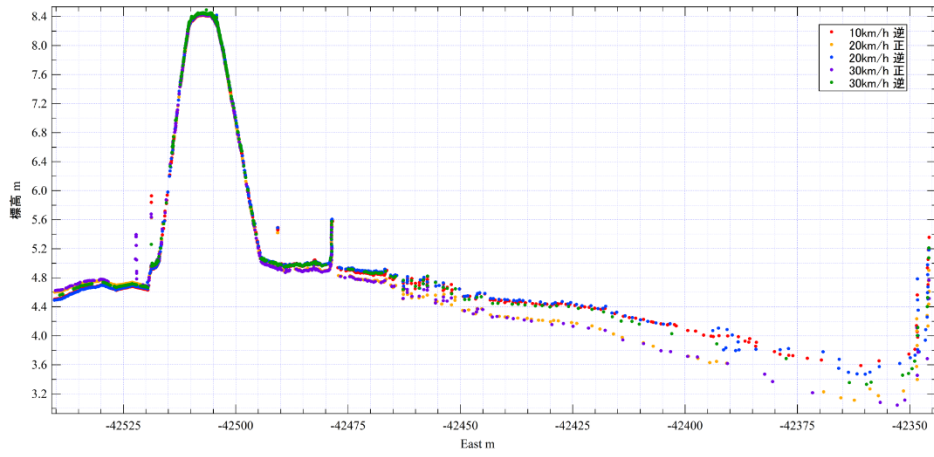


図 2.5-4 照射姿勢補正前の堤防形状

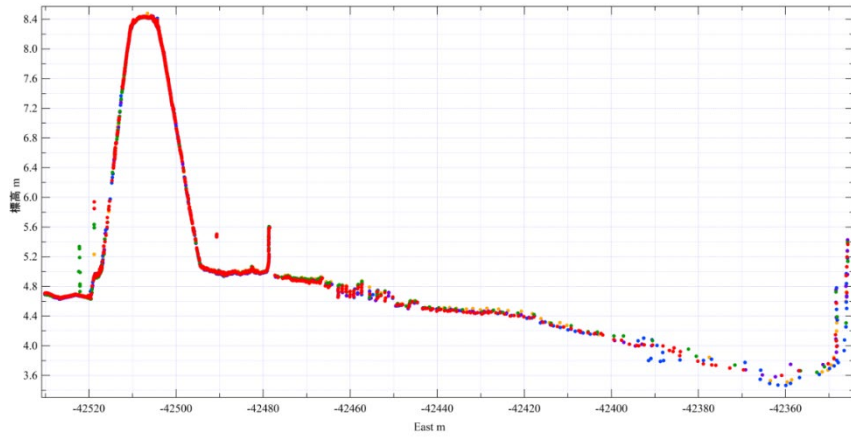


図 2.5-5 照射姿勢補正後の堤防形状

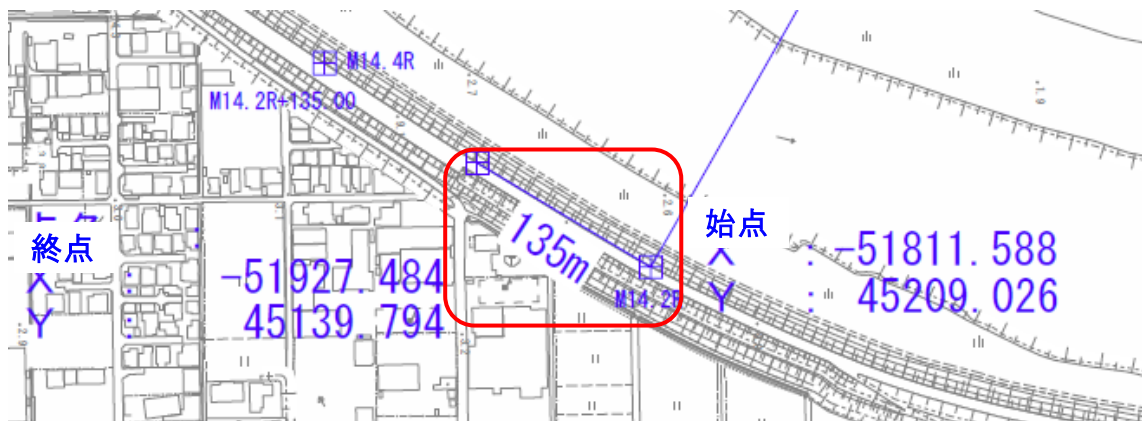


図 2.5-6 検討対象範囲

地表面の抽出には図 2.5-7 に示すように、堤防断面内に仮想中心点を設け、その点から放射状に分割された点群データの最短距離にある点を抽出する方法を導入する。

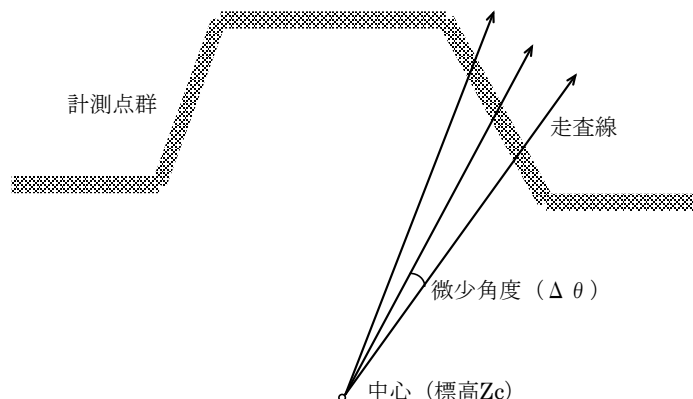


図 2.5-7 ケース 1 の点群抽出イメージ

以下、処理手順に従って本手法を説明する<sup>18)</sup>。

1) 断面の作成手法

図 2.5-8 に示すように、点群データを取得した範囲を 1.0m 間隔の横断面に区切り、当横断面から±0.5m の範囲にあるレーザ点群を使って、堤防の横断面の形状を求める。横断面の幅は、中心軸から±30.0m とした。なお中心軸の平面位置は、図に示すように始点と終点座標を直線で結んだものとする。次に図 2.5-9 に示すように、各断面内では中心線的位置（標高 Zc）を堤防の下方に定め、この中心線（断面内では中心点）から微小角度  $\Delta\theta$  ごとに走査線を出すことでレーザ点群と当走査線の交点座標を求め、この交点座標を連ねることで地表面断面の形状とする。この手法により、堤防の側面形状が垂直に近い場合でも最近点を適切に求めることができる。なお本現場では Zc は標高-30m とした。

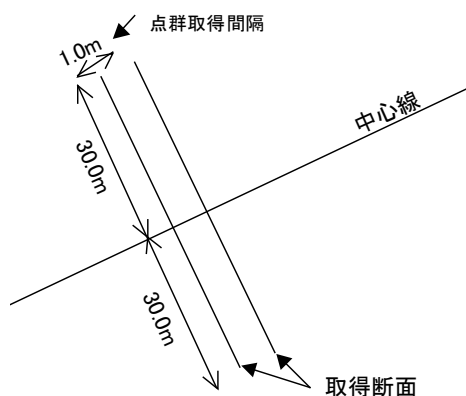


図 2.5-8 点群データの抽出範囲

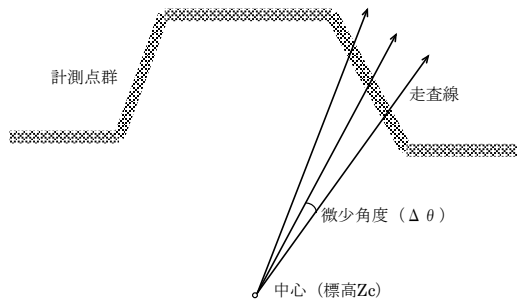


図 2.5-9 仮想中心から微小な角度ごとに走査線を出す処理の概念

## 2) フィルタリング処理

次の手順に従ったフィルタリング処理により、堤防形状を求めるための図 2.5-10 のように代表点を求める。

- ① 二つの走査線に囲まれた微小角度  $\Delta\theta$  の範囲で、中心に最も近い点を求める。
- ② この点から堤防から離れる方向での  $\Delta r$  の範囲で点群を絞り込む。
- ③ 得られた点群の座標について単純平均を求め、これを代表点の座標とする。

この処理は、①で求めた中心に最も近い点が、計測誤差のために必ずしも最近点となっていないことを考慮したものである。なお、以下の検討では  $\Delta r$  は 0.03m (走査線長さの 1/1000 程度) とし、微小角度  $\Delta\theta$  については、 $1/30\text{rad}$ 、 $1/60\text{rad}$  の 2 種類とした。

## 3) 堤防形状の作成

フィルタリングで求めた代表点のうち走査線をまたぐ二つの代表点を直線で結び、図 2.5-11 に示すように、この直線と走査線の交点を、堤防形状を表す点と見なす。図 2.5-12 に点群から堤防の横断面を 3 次元的で表した概念図、図 2.5-13 に堤防形状の推定結果を示す。

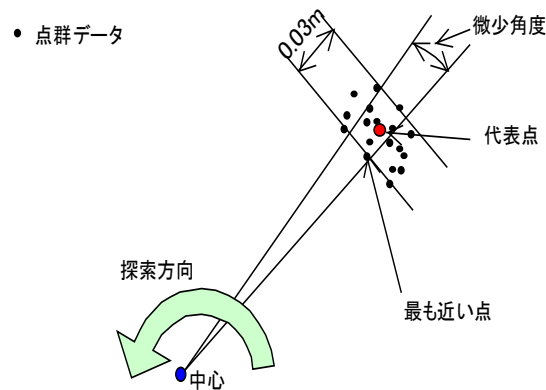


図 2.5-10 代表点の求め方

- 点群データ

- 代表点

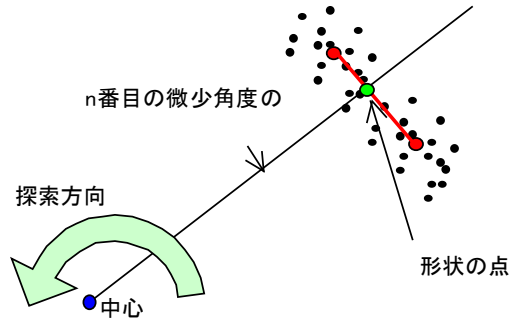


図 2.5-11 点群データの形成

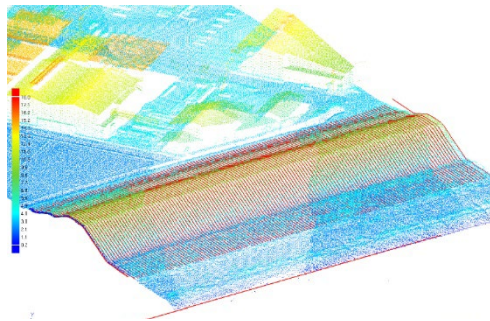
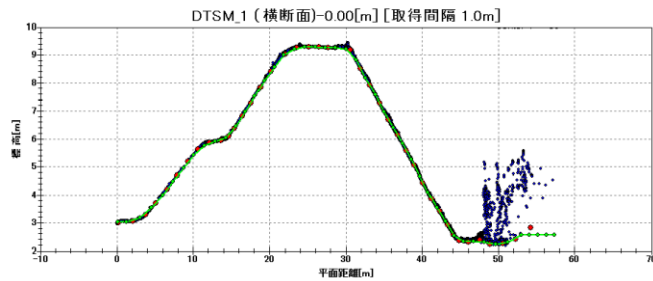
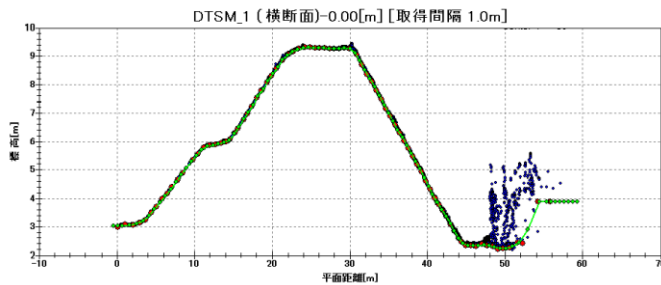


図 2.5-12 堤防の3次元形状構成図



微小角度  $\Delta\theta=1/30\text{rad}$  で推定した横断面



微小角度  $\Delta\theta=1/60\text{rad}$  で推定した横断面

図 2.5-13 堤防横断面推定図

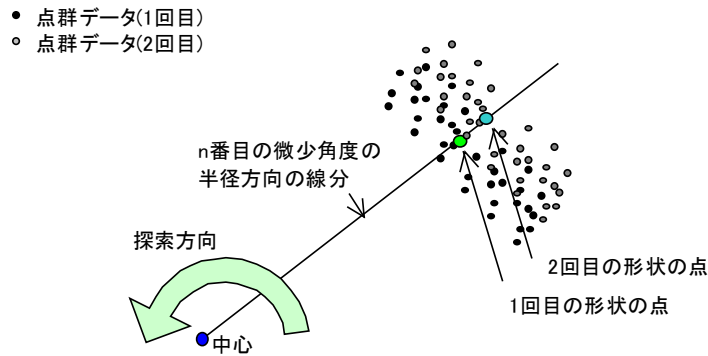


図 2.5-14 2 回の計測データの差分による変状解析の概念

MMS 計測時の姿勢の影響を取り除く補正技術により、計測時の正確なレーザ点群の 3 次元座標を求めることを可能にした。これは正確な 2 時期のレーザ点群データを重ね合わせる際に、計測手法や座標の定義が異なっても変状が抽出できる分析法である。すなわち、2 時期のレーザ点群データの計測手法や座標系が同一であると仮定した場合のほかに、計測手法や座標系が同一でない場合における差分計算手法を開発した。これは、中心の相対位置や  $\Delta\theta$  を同じに設定して行われた二つの形状算定結果に対して、2 時期の断面形状の平均移動量 ( $\Delta X$ ,  $\Delta Y$ ) を未知数として、図 2.5-14 に示す断面内の全ての形状点を対象とした誤差の二乗を最小にする計算を実施することで実現し、得られた平均移動量を二つ目の断面形状にオフセットとして加えた後に差分を求める分析法である。図において、本分析後に 2 時期の計測結果が重ね合う箇所は変状が無く、重ね合わせることが出来ない箇所は、その“ズレ”の大きさに応じた変状箇所と認識することができる。なお、これは前年度に開発したデータ処理技術によって、各計測値が正確な 3 次元座標を表すことができる成果に基づいて可能になるものである。

#### 4) 差分結果の展開図出力法

差分による結果の展開図は、図 2.5-15 のように差分を最初の形状の点の位置での値と見なして、これを水平面に投影することで表示する。なお図では断面方向を Y 軸とし、X 軸は中心線方向として描画する。2 時期の計測値の差分による変状解析結果の例を示す。図 2.5-16 は航空レーザ測量による堤防形状、図 2.5-17 は MMS 計測による堤防形状であり、図 2.5-18～図 2.5-20 は、両データの差分結果を示したものである。図 2.5-18～図 2.5-20 は、差分量を変化させて変状を抽出させたものであり、ある大きさの変状だけを抽出させるための処理である。

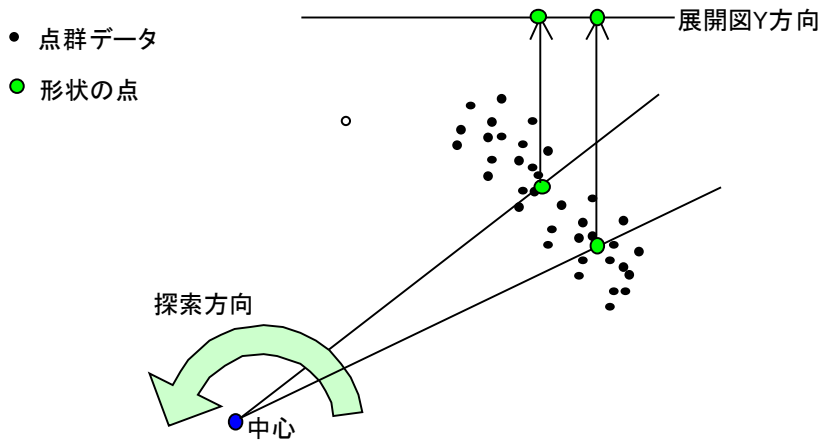


図 2.5-15 2回計測誤差の処理イメージ

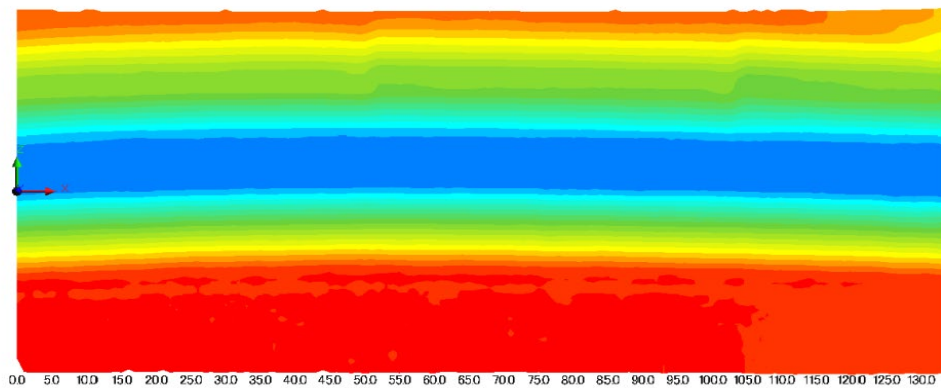


図 2.5-16 航空レーザ測量によるレーザ点群データの等高分布図

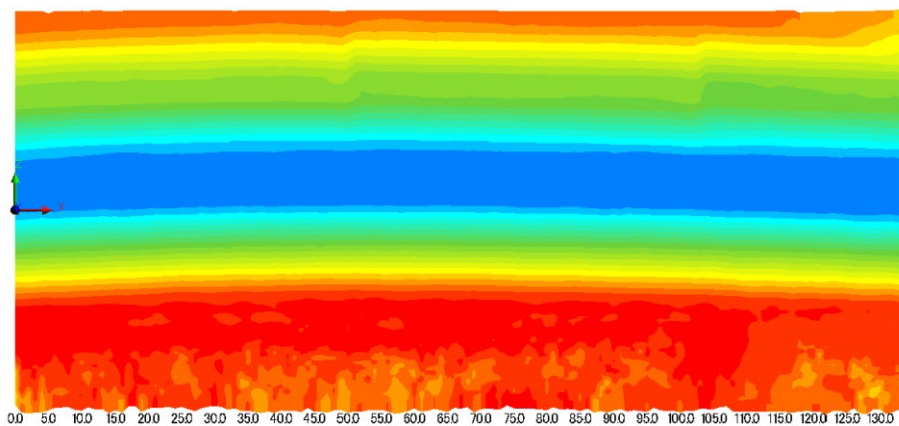


図 2.5-17 MMSにて取得した点群データ等高分布

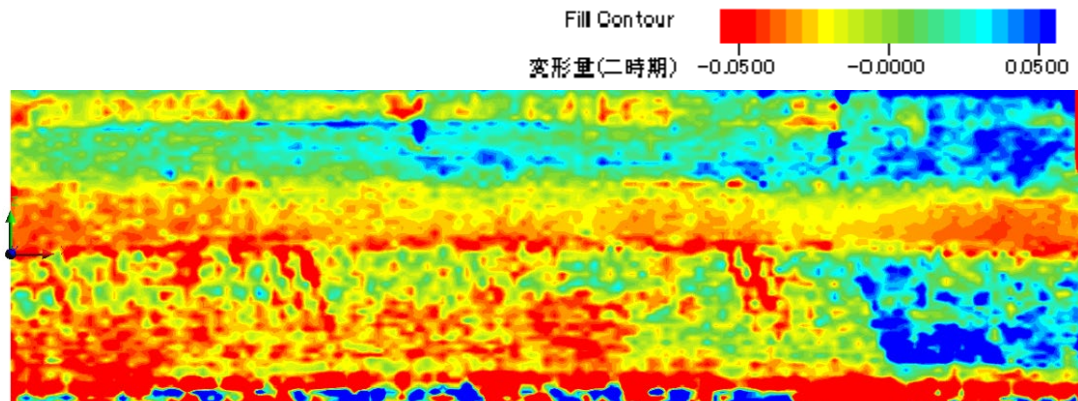


図 2.5-18 図 2.5-16 と図 2.5-17 の差分図 (レンジ -0.05m—+0.05m)

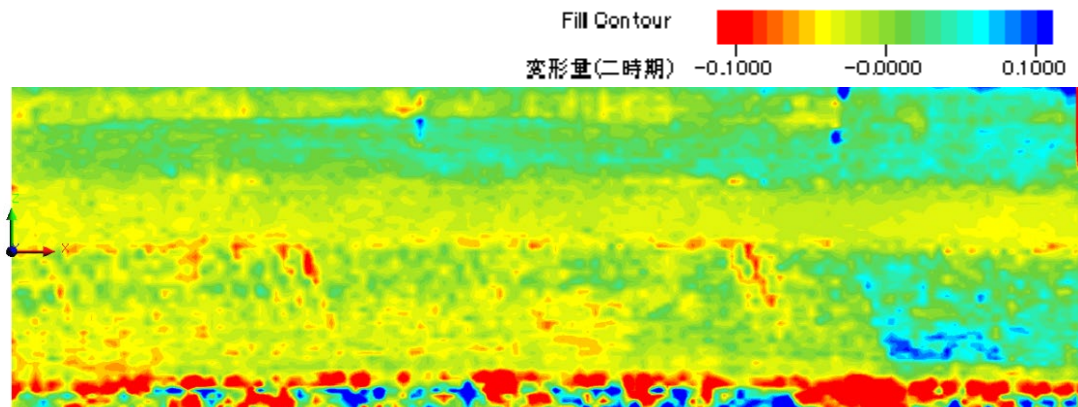


図 2.5-19 図 2.5-16 と図 2.5-17 の差分図 (レンジ -0.10m—+0.10m)

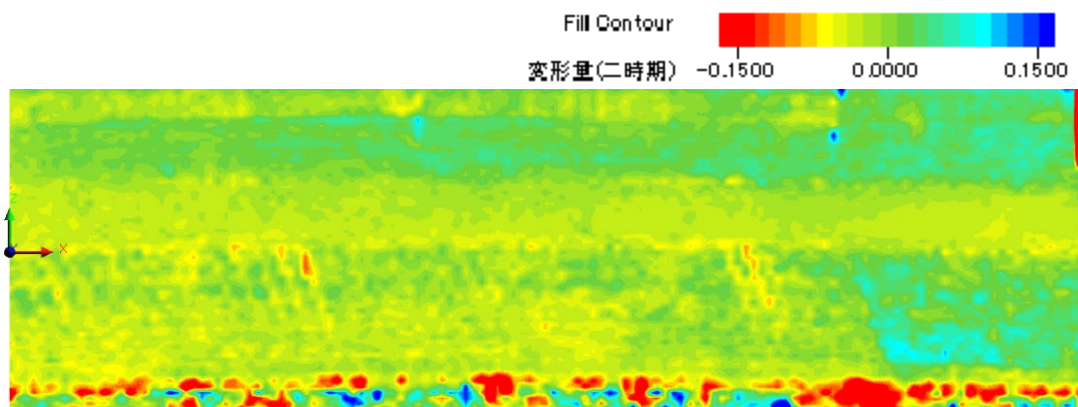


図 2.5-20 図 2.5-16 と図 2.5-17 の差分図 (レンジ -0.15m—+0.15m)

上記の手法に加えて、図 2.5-21 のように堤防仮想地表ラインより更に下層に存在する点

群を抽出する方法を導入した結果を次に示す. この処理においては図 2.5-22 に示すように, 平面上に基線となる横断線(図中の赤の線)を設け, 当横断線に対して両サイドに任意の幅(本現場では 30cm)で拡幅して, バッファ領域(図中の緑の領域)を設定し, そのバッファ領域内の点群を取得する.

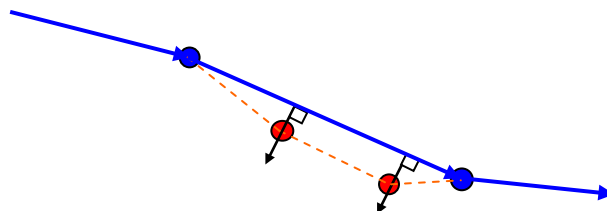


図 2.5-21 堤防仮想地表ラインより下層のレーザ点群を抽出する方法

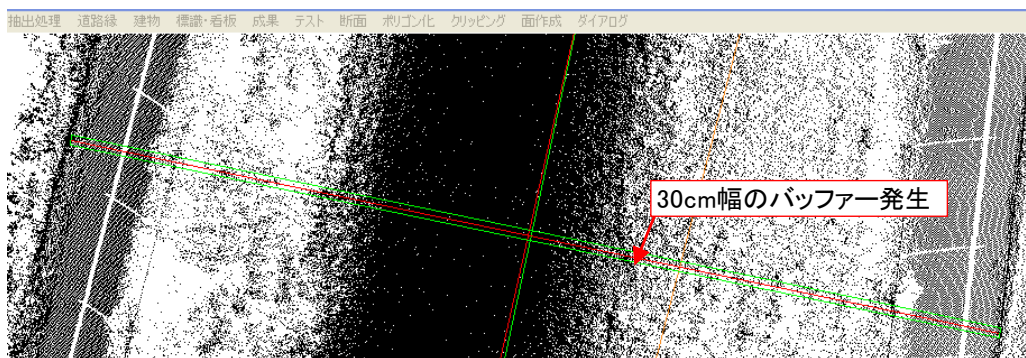


図 2.5-22 堤防仮想地表ラインより下層のレーザ点群を抽出する幅

あとは同じく最小二乗法により 2 時期のレーザ点群を重ね合わせることで変状を定量化させる. 図 2.5-23~図 2.5-25 は, 変状分布をその大きさごとに表したものである.

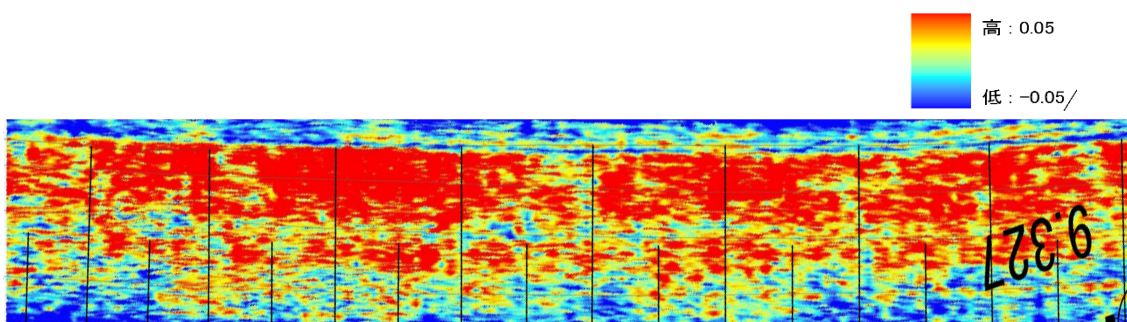


図 2.5-23 図 2.5-16 と図 2.5-17 の差分図 (レンジ -0.05m~+0.05m)

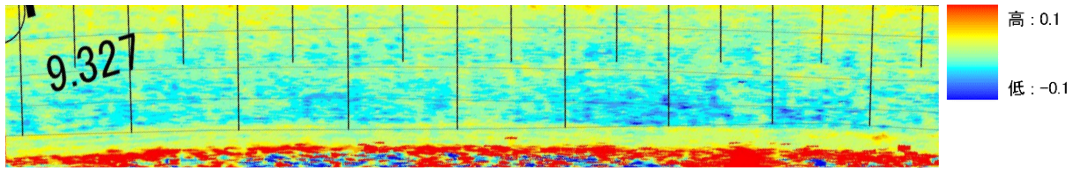


図 2.5-24 図 2.5-16 と図 2.5-17 の差分図 (レンジ -0.15m～+0.15m)

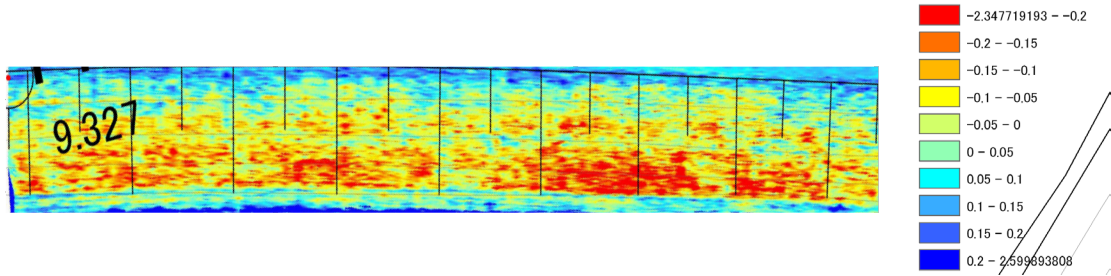


図 2.5-25 図 2.5-16 と図 2.5-17 の差分図 (レンジ -0.20m～+0.20m)

ここで、分析方法として組み込んだソフト機能の概要をまとめる<sup>19)</sup>。

#### 1) DEM データ作成技術

レーザ光は地表面ばかりでなく、植生の上で反射して戻ってくる。このためレーザ測量で直接得られるデータは植生の標高を含んだものとなるが、3次元の「点群」の集合体であるオリジナルデータから「地盤面相当」の点群データ：グラウンドデータを抽出する工程によって数値標高モデルと言われる DEM(Digital Elevation Model)が作成される。この処理は前述した手法を導入して実現させている。

#### 2) TINデータ作成技術

レーザ測量で観測したデータでは標高点がとびとびにある点群となるが、これでは対象とした領域全体を一定の間隔で覆ったデータにはならないので、このとびとびの隙間を計算によって埋める処理を行う。この処理を内挿補間と称し、本手法では図2.5-26に示すような不整三角網モデル(Triangulated Irregular Network : TIN)を用いる。またグリッドデータ作成上記のグラウンドデータは、データ量が膨大であるため、汎用パソコンでも効率的に取り扱うことができるように、グリッドデータ(メッシュデータ)を作成する工程を含むことになる。グリッドデータはグラウンドデータから各種内挿補間方法にて生成し、当初計画設計された計測諸元に基づくグリッド(格子)サイズにて作成する。本研究では差分解析することを目標におくので、より細かなグリッドサイズを作成する工程を導入する。

本手法では、まず車両搭載GNSSデータとIMUデータを結合し、車両の走行位置の座標が計算される。さらにIMU姿勢角とレーザ計測の距離データを結合してレーザ光1点ごとの水平座標値と標高値を算出し点群データが作成され、次に地表面の形状からなる高密度の3次元点群データが提供され、さらにこのモデルからDEMモデルを作成する。図2.5-27に示すよ

うにDEMには大きく分けてラスタ形式とベクター形式がある。ラスタ形式では対象領域をグリッド状に変換し、グリッド上の節点に標高値を内挿してDEMデータを作成する。ベクター形式では対象の点同士を一定の条件で結びつけTIN（不定形三角網）を形成する。ラスタ形式では格子状に点が配置されているため、メッシュが生成しやすく加工しやすい。ベクター形式はノードの座標値で管理されることから、ラスタデータに比べてデータ容量が小さく、拡大・縮小表示が行いやすいという利点を持つ。本手法では主にベクター形式でのDEMを作成する。

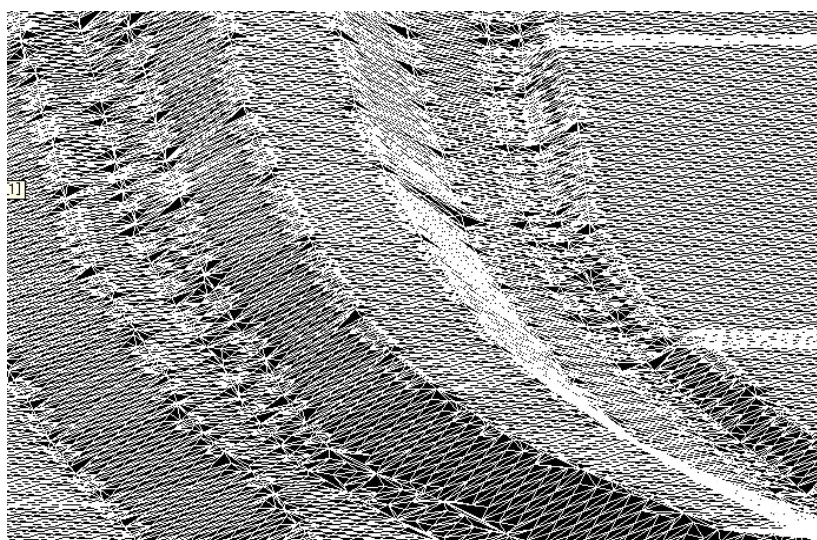


図 2.5-26 堤防の TIN モデルの事例

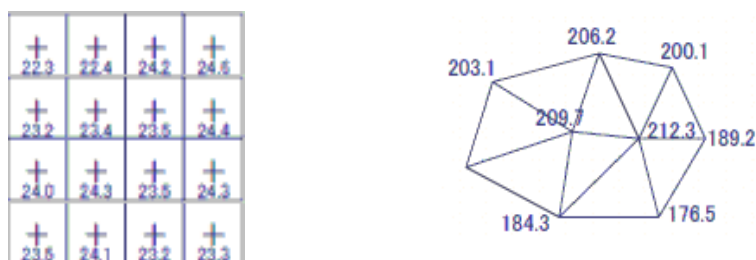


図 2.5-27 ラスタ形式(左)とベクター形式(右)の DTM

DEM 作成には地表面以外のデータを取り除くフィルタリング作業が必要になるが、それ以外のあらゆるノイズを含む計測データへの対処を可能にしておく必要がある。そこでフィルタリング手法として、クラスタリング法、ローラー法および最小値取得法を導入しており、以下その概略を記述する。どの手法を用いるかは現場計測の状況に応じて変わるため、どのような現場にも対応できるように、次に述べる手法をすべて実施できる状態にした。

・クラスタリング法

クラスタリングとは、図 2.5-28 に示すように複数のデータの中で似たもの同士をいくつかのクラスターに分類することである。クラスタリング法は、レーザ計測点同士を縦横 4 方向につないで作成される傾斜量を用いて、ある条件によりクラスタリングを行い、地表とノイズを分類する手法である。この手法では、計測対象を問わずフィルタリングが可能である。レーザ計測点に対し、まず処理単位となるメッシュ間隔を設置し、メッシュ内である程度のふるいをかけて、クラスタリング処理する点を選別する。次にメッシュの縦横 4 方向をネットワークで結び、傾斜量と構成面積などのある閾値を与えることで、ノイズの除去を行う。

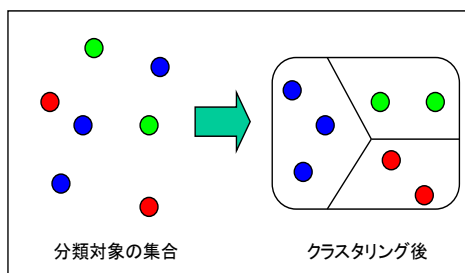


図 2.5-28 クラスタリングの概念

・ローラー法

ローラー法は、図 2.5-29 に示すように円柱状の回転物であるローラーを地表面の下に接するように転がして、ローラーの半径に対する閾値以内のレーザ計測データを地表面として分類する。ローラー進行方向に向かって 1 点目を基準点、2 点目を検査点、3 点目を対象点とし、基準点と対象点とローラーの半径  $R$  より円の中心点を求める。その後、基準点と対象点が円の直径  $2R$  以上離れている場合は検査点を地表面として採用し、検査点と円の中心点の距離が  $R + \text{閾値}$  より離れている場合はノイズとして削除する。次に、採用した検査点を新基準点、検査点は新基準点の次のレーザ計測点、対象点はその次のレーザ計測点として繰り返し判定処理を行い、最後のレーザ計測点に至るまで処理を繰り返すことでノイズ処理を行う。ローラー法は比較的アルゴリズムが単純で、また独立したシステムとして機能するため、システムに組み込むことが容易で、複数拠点における分散処理が可能である。

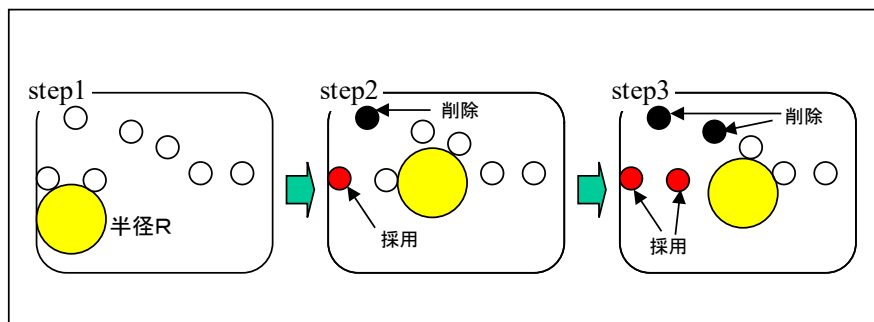


図 2.5-29 ローラー法概念図

・最小値取得法

最小値取得法におけるフィルタリングは、図 2.5-30 に示すように領域をグリッド状に分け、そのグリッド領域内における標高最小点を選び、それを領域内の地表面のデータとし、残り部分を削除する。これら手法に関して表 2.5-1 に示すように、各種フィルタリング手法の一般的な利点と欠点を示す。表 2.5-1 は各種手法の利点と欠点を示したものであるが、単に堤防の地形を表示するだけならば問題は無いと考えられるが、今後複雑な解析技術のモデルと直結させるためには、それらの欠点を克服する手法が必要となる。そこで、サーチアングル法およびサーチエリア法と称されるフィルタリング手法を導入しておく。

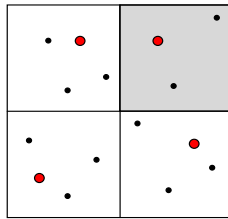


図 2.5-30 最小値取得の概念図

表 2.5-1 各フィルタリング手法の特徴

	特徴	利点	欠点
クラスタリング法	複数のデータ内で似た者を分類する	都市、山間部を問わずノイズ処理ができる	立体交差・橋梁等を地表面として認識してしまう
ローラー法	ローラーを移動させノイズの判定を行う	複数拠点における分散処理に有効	傾斜面を横切る際にローラー幅の片側にデータに偏りが生じる
最小値取得	領域における最小値以外をノイズとして除去	高速処理が可能	データに疎な部分が生じる

・サーチアングル法

サーチアングル法では、図 2.5-31 に示すように評価点すべてに対して任意の逆円錐を仮定し、円錐内に含まれる全てのデータ点を樹木あるいは建物と考え除去する。この手法を用いることで従来の手法において課題であったノイズの偏りをなくし、凹凸を精度よく表現することが可能となる。

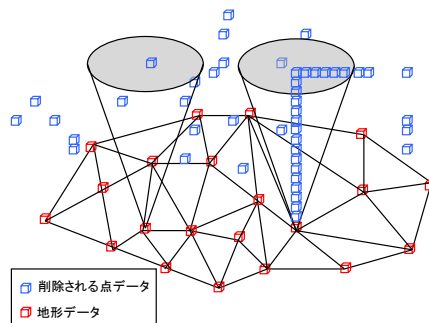


図 2.5-31 サーチアングル法概念図

- ・サーチエリア法

図 2.5-32 に示すように、全体にグリッドを作成し、グリッド上の節点の、周囲の 4 グリッドからそれぞれ最も近い値を検索し、その点の標高値に重みをつけて評価し、グリッド上の標高値として採用する。そのため、この手法ではフィルタリングと同時にグリiddingが行われ、メッシュデータとしてデータが産出される。この手法を用いることで従来の手法では、データに粗密な部分が生じていたところをなくし、等間隔に点を配置することが可能となる。

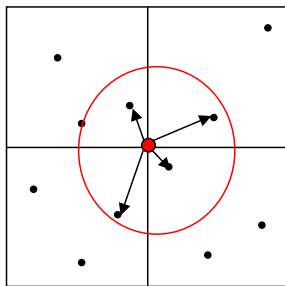


図 2.5-32 サーチエリア法概念図

これらの手法による地形表示モデルの例を次に示す。

- ・サーチアングル法

サーチアングル法におけるフィルタリング処理後の計測点を図 2.5-33 に示す。

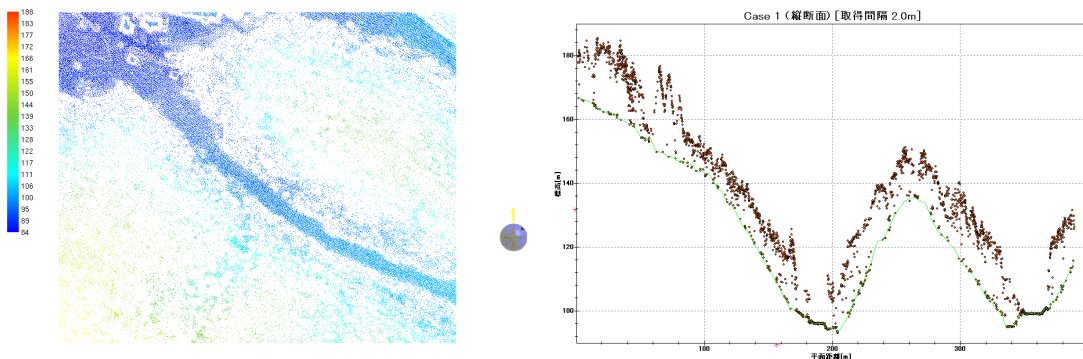


図 2.5-33 サーチアングル法によるフィルタリング処理の結果

- ・サーチエリア法

サーチエリア法におけるフィルタリング処理後の計測点を図 2.5-34 に示す。これらの結果において、いずれも地表面のモデル化が出来ており、いくつかの異なるフィルタリング技術を組み込んでおくことで、どのような現場にも対応できる本研究開発の分析技術の汎用化を図っておく。その一例として、サーチアングル法においてノイズを除去する角度を変えて地形モデルを作成した例を図 2.5-35 に示す。

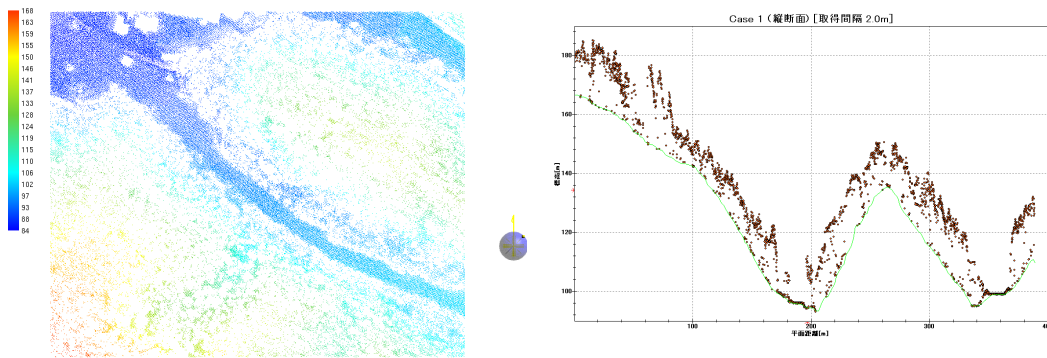


図 2.5-34 サーチエリア法によるフィルタリング処理の結果

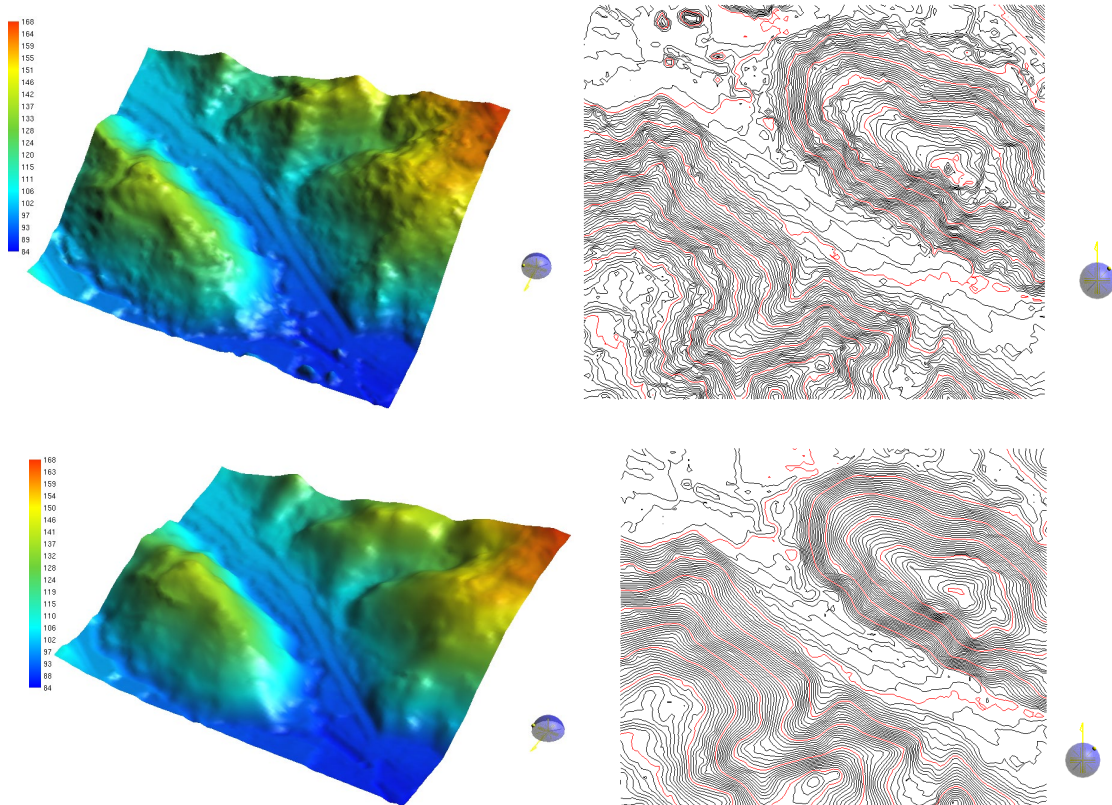


図 2.5-35 サーチアングル法によるフィルタリング処理例：上 60度，下 30度

解析結果に見られるように、取得角度 30 度では地表面の凹凸が全体的に滑らかになるが、取得角度が 60 度の場合よりノイズの除去能力が大きくなっている。本手法では河川堤防の形状の推定時に自由度を持たせることで、より多くの現場に対応した分析技術になるような機能を組み込んでおく。

次に前述のフィルタリング処理されたデータを TIN モデルにしてプラットフォームとし

て表示するための内挿補間法を記述する。TINの作成法として三角網法とトポロジー法があるが、どちらも有用な手法であり両方の手法の機能を準備する。

・三角網法

点群データにおける点を三角形要素に分割する方法である。ただし、三角形を形成する場合、作成された三角形が要素として認識できないような三角形である場合、図 2.5-36 に示すような辺のフリップが行われる。

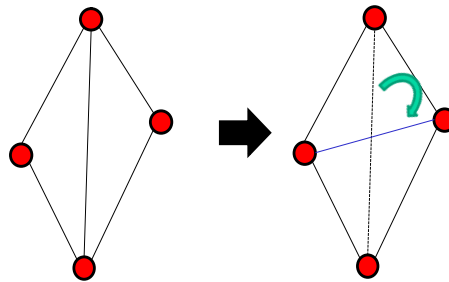
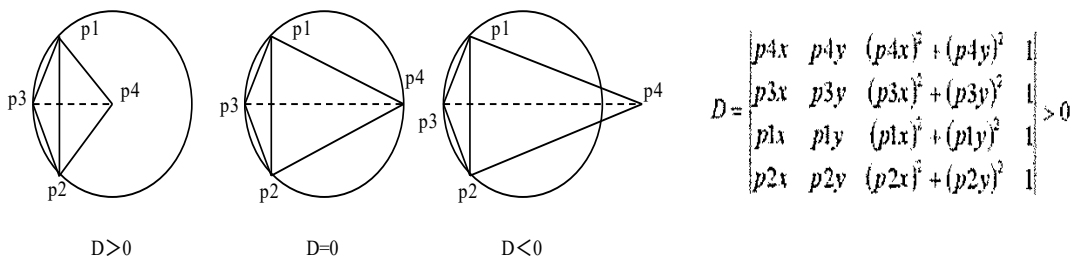


図 2.5-36 辺のフリップ

三角形において不正である辺をフリップする条件は、形成される三角形の最少角の値、もしくは2次元の円の公式によって定義する。2次元の円の公式によるフリップ判定は辺がドローネ条件を満たすかどうかで判定する。ドローネ条件とは、ある点が隣接する三角形の頂点を通る円の内部に存在するための条件であり、図 2.5-37 に示すように点  $p_4$  が  $p_1, p_2, p_3$  を通る円の内部に存在すればよいと考える条件である。

辺 $p_1p_2$ がドローネ辺であるための条件



ただし $\Delta p_{312}$  は左回りが正。

図 2.5-37 ドローネ条件図

・トポロジー法

トポロジー法では、まず初期抽出として基本となる Ground ポイントを抽出する。ここで基本となる Ground ポイントとは、正方メッシュを対象エリアに設置した際の各メッシュ内で最も低い点である。この初期 Ground ポイントを頂点とする TIN サーフェスモデルを作成する。その面に基づき、以下のパラメータを設定し、隣接周辺の Ground ポイントを探索し

抽出する。

① 反射角

作成された現在の地形モデル面とそのモデル面からサーチする次の点との角度を閾値として与え、閾値内の角度において周辺の ground ポイントを抽出する。

② 反復距離

地形モデルとサーチする次の点の面に対する垂直距離を閾値として与え、閾値内の点を取得する。

これらのパラメータを図 2.5-38 のように設定し、モデル面の隣接周辺の ground ポイントを決定する。

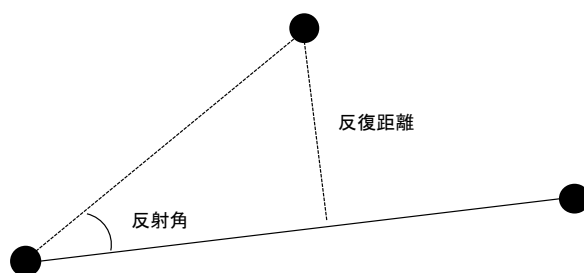


図 2.5-38 設定パラメータの概念

これらの機能を組み込み、さらに内挿補間として次の方法を準備する。

・最近隣法

最近隣法はグリッドを形成する際に、グリッド上の節点の値を節点から最も近い点から内挿する。規則的な間隔 (または、ほぼ規則的な間隔) の XYZ データファイルをグリッドファイルに変換するのに有効であり、観測データにいくつかの欠損値があるもののほぼ完全なグリッドであるとき、この手法はこの穴を埋める、あるいはデータが存在していない場合に割り当てられる空白値を使って、グリッドファイルを作成することが可能となる。

・線形補間三角網法

作成したいグリッド上の節点から生成しておいた TIN に垂線をおろし、垂線が TIN 平面と交わる点の高さをグリッド節点の高さに内挿する。処理が非常に高速で、小さなデータセットを使う場合三角形要素を形成する。

・平均法

対象範囲内の点群データの値を平均して内挿する。大きくかつノイズの多い点群データから中間スケールのデータをとる傾向にある。そのため膨大なデータにおいても処理が高

速で、規則的で大きなデータからグリッドを作成するのに適する。

- ・双曲線線形補間法

データが存在する空間に対し、与えられた分割数のグリッドメッシュを重ね、元々の離散データが対応するセルを求める。例えばあるグリッド上の節点0に対して、1/4領域を考える。その4つの各領域の中で、グリッドの節点から最も近接するデータを検索する。最初のステップでは、 $x=0$ ,  $y=0$ のラインと公差する $\Delta$ の値が計算される。 $Z_{f1}$ を $Z_{di+1}$ ,  $Z_{di}$ からその距離に重みを付けて求める。得られたデータは求めたい節点において $x=0$ と $y=0$ の各対角の方向の値、すなわち $f_{i+1}$ と $f_i$ から求める。グリッド化された値と最も近いデータポイントの距離が離れている場合、その頂点に対して次の計算が行われ、面の平滑化を行う。

$$Z_{xy} = \frac{1}{n} \times \sum^n (Z_n \times 1/Rn^3)$$

- ・逆距離加重法

逆距離加重法は平均法に似ている。ある対象領域内の点に重みを付けて評価し、グリッド上の節点に内挿する。

$$\omega = \frac{\sum \frac{1}{r^n} h_i}{\sum \frac{1}{r^n}}$$

- ・最小曲率法

3次元空間の中で仮想的な薄い弾性板を考え、それが与えられた点群の全てを通る様にしたときに出来る曲面をグリッドデータとする手法である。滑らかな表面を生成し、大多数のデータセットに対して処理が高速だが、データがない領域に実在しない地形を形成することがある。

これらの分析法において、各種法の利点と欠点を表 2.5-2 に示す。

表 2.5-2 各種分析法の利点と欠点

手法	処理方法	利点	欠点
三角網法	レーザ照射点からの不 整三角網より標高を求 める	グラウンドデータを 反映したモデルとな る	<ul style="list-style-type: none"> <li>計測点密度が疎な場 合、形成される三角形が 平面になる。</li> <li>高速描画でのデータ処 理が複雑</li> </ul>
トポロジー法	計測点の反復抽出から 不正三角網を作成する	<ul style="list-style-type: none"> <li>グラウンドデータ を反映する</li> <li>データが疎でも三 角網法より三角形が 平面になりにくい</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>三角網法よりデータ処 理に時間がかかる</li> </ul>
最近隣法	補完する点に最も近い レーザ計測点標高を採 用する。	<ul style="list-style-type: none"> <li>処理が高速</li> <li>ある程度規則的な 間隔のレーザ点に対 して有効</li> </ul>	補間点の近傍にデータが 存在しない場合、信頼性 に欠ける
逆距離加重法	補間する点の周囲の点 を重みを付けて評価す る	処理が高速	牛の目玉状の等高線を形 成する傾向がある
平均法	周囲の点の平均値を補 間する	処理が高速	<ul style="list-style-type: none"> <li>レーザ計測点の密度が 疎の場合、3次元モデル の精度が落ちる</li> <li>地表面の凹凸が表現で きない</li> </ul>
線形補間三角網法	TIN に延ばした垂線と の交点の座標を内挿す る	斜面の形状をうまく 表すことができる	処理に時間がかかる
双線形法	4方向の点が結ぶ線分 がグリッド上と交わる 点を重みを付けて評価 する	階段状の地表面が少 ない	等高線の偏りが点在する

## 2.6 「災害応急対策」における課題と解決策：共助・自助の必要性

我が国は、地理的要因から、地震、洪水、土砂災害などの自然災害が発生しやすい特徴を有している。近年では、集中豪雨や巨大台風に伴う大規模水害が激甚化しており、西日本で多くの被害をもたらした。平成30年7月豪雨、令和元年10月の東日本台風、令和2年豪雨など、ここ数年高頻度で大規模水害が発生している。令和5年度においても、活動が活発な梅雨前線による大雨や大型台風による被害が報告されている。平成30年7月豪雨では、国管理河川高梁川水系の小田川の2カ所が決壊するほか、都道府県管理河川25河川35カ所で堤防決壊が生じた。1府13県で死者224名、行方不明者8名の甚大な被害が発生した。

図2.6-1に倉敷市真備町での被害の様子を示す。東日本台風では、東日本を中心に17地点で500mmを超える総雨量を記録した。特に、静岡県や、新潟県、関東甲信地方、東北地方の多くの地点で3,6,12,24時間降水量の観測史上1位を更新するなど記録的な大雨であった。図2.6-2は、郡山市の浸水被害の様子である。令和2年7月豪雨では、日本付近に停滞した前線の影響により、温暖湿潤な空気が継続的に流れ込むことで、全国各地で大雨となった。同年7月3日から31日までの総雨量は、長野県や高知県の一部地域で2000mmを記録した。また、国管理の7水系8河川、県管理の58水系194河川で、氾濫が発生し、特に九州地方では、球磨川、筑後川、大分川、遼賀川の4河川が氾濫し、図2.6-3に示すように甚大な浸水被害が生じた。令和2年8月25日時点で、死者82名、行方不明者4名、住家全壊4,558棟、住家浸水13,934棟にもおよぶ甚大な被害が日本の広範囲で発生した<sup>19)</sup>。



図 2.6-1 平成30年7月豪雨での小田川堤防決壊時の倉敷市真備町

出典：国土交通省 中国地方整備局<sup>20)</sup>



図 2.6-2 東日本台風による郡山市の浸水被害  
出典：内閣府 令和2年版防災白書<sup>21)</sup>



図 2.6-3 令和2年7月豪雨による人吉市の浸水被害  
出典：八代河川国道事務所の資料より<sup>22)</sup>

水害が増加している要因として、地球温暖化による気候の変化、日本特有の地形と都市化が挙げられる。近年、日本の平均気温は100年あたり1.24°Cの割合で上昇しており、世界平均の0.68°Cと比較すると高い水準で上昇している。また、地球温暖化により、世界規模で雨の降り方が、局地化・集中化・激甚化している。降雨をもたらす低気圧や台風の発生位置、移動経路、強さ、滞在期間が変化することで、線状降水帯や集中豪雨を発生させる。また、海面水温が上昇することで、熱帯低気圧に水蒸気が活発に供給され、台風が大きな勢力を保ったまま日本に接近・上陸することで大きな被害が生じている例もある。既に述べた通り、

時間雨量 50 mmを超える短時間強雨や総雨量が数百から 1,000 mmを超えるような大雨によって、全国各地で毎年のように大規模水害が発生している。産業革命以前と比べて気温が 2°C 上昇すると降雨量は全国平均的に約 1.1 倍となり、4°C 上昇すると 1.3 倍と予測されており、降雨量が増加した場合の流量と洪水発生頻度は、図 2.6-4 の通り試算されている。

<参考> 降雨量変化倍率をもとに算出した、流量変化倍率と洪水発生頻度の変化の一級水系における全国平均値

気候変動シナリオ	降雨量	流量	洪水発生頻度
2°C 上昇時	約1.1倍	約1.2倍	約2倍
4°C 上昇時	約1.3倍	約1.4倍	約4倍

図 2.6-4 降雨量変化倍率をもとに算出した、流量変化倍率と洪水発生頻度の変化の一級水系における全国平均値：国土交通省 水害レポート 2024 より

また図 2.6-5 のように、我が国の三大都市圏では、1930 年代以降、川や海の埋め立てや地下水のくみ上げが原因で地盤沈下を起こした「ゼロメートル地帯」が多く存在している。ゼロメートル地帯とは、新月および満月の日から前 2 日、後 4 日以内に観測される各月の最高潮位を平均した潮位である朔望平均満潮位以下の地帯のことである。洪水時の水位が、居住地の地盤高より数 m 高くなり、堤防と背後地の比高差が 10m 以上となる地区もあり、堤防決壊における壊滅的な被害が危惧されている。また、一部のゼロメートル地帯では、2m から 5m 程度浸水した場合、自然排水が困難となり、浸水継続時間が 2 週間以上となることも予想されている<sup>23)</sup>。

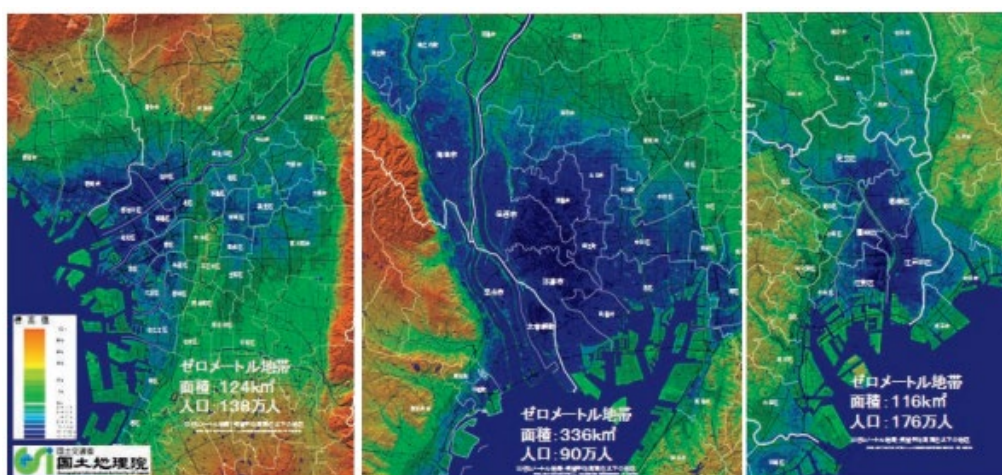


図 2.6-5 三大都市圏のゼロメートル地帯  
出典：内閣府 令和 6 年版防災白書

過去の大規模水害において、指定避難所の利用に困難が生じ、住民の避難行動に大きな影響を及ぼした事例がある。平成 30 年 7 月豪雨では、指定避難所が浸水等により使えずに代

わりの施設の開設に時間を要したため、住民の避難が遅れてしまう事態が発生した。また、堤防決壊により、避難経路を絶たれ、指定避難所に行けず医療施設、コンビニエンスストアなどに避難する住民も発生した。降雨のピークが深夜であったことから、多くの住民が逃げ遅れ、孤立していた地区もある。令和元年東日本台風では、多くの市町村において避難指示および避難勧告が発令され、ピーク時で23万7000人を超える人が避難を余儀なくされたと報告されている。その上、一度避難した後に避難所周辺の浸水リスクや土砂崩れの懸念から別の施設への再避難が必要になった避難者もいた。千葉県茂原市では、令和元年10月25日の豪雨の際、指定避難所に指定されていたにもかかわらず、茂原市中央公民館が浸水したことで、図2.6-6に示すように避難していた住民16人がゴムボートや木に乗って、市役所に再避難せざるを得ない事態が発生した。また、令和2年の台風第10号では、地方公共団体が開設した避難所5132カ所の内、383カ所で収容人数を超える避難者が集まっていたと報告されている。これらのことから、指定避難所の立地や収容力により、避難に時間がかかる場合や、避難困難を生じる事態が多く発生していると分かる。以上より避難所の立地や避難経路の見直しは、防災計画において重要であるといえる<sup>24)</sup>。

被害の拡大があらかじめ予測できる水害では、適切な避難所への早急な避難が実行できれば人的被害を最小限に抑えることが可能である。そのためには、避難情報提供や適切な避難場所の指定、また「自助・公助・共助」各観点で災害対策力を高めることが重要である。自助は、自分や家族の命、財産を守るために自分自身で減災に取り組むことである。日常的な備えや、避難経路の確認、家族間での災害時行動の共有などが挙げられる。共助は、自分自身の安全は確保したうえで、近所の人や地域で助け合うことである。公助は、市役所や、消防、自衛隊などによる公的な支援のことである。大規模な災害が発生した際には、道路や交通手段などに被害を受ける可能性が高く、公的な支援には時間を要する場合がある。1995年の阪神・淡路大震災では、自助・共助によって多くの人命が救助され、公助にあたる救助隊による救出は数%に過ぎなかったと報告されている。公助の機能には、限界があるため、それを補うためには官民連携することによって、地域の防災力を高めることが重要である。



図 2.6-6 茂原市中央公民館の様子

出典：ANNnewsCH 避難所浸水で住民ら再避難(2019年10月27日放送)<sup>25)</sup>

## 2.7 SCの一時避難場所利用の有用性

一方で、突発的に生じる地震災害では、発災後の混乱を防ぐため、避難行動計画や避難場所の確保などの事前対策が重要である。令和6年1月1日に発生した、令和6年能登半島地震では、多数の家屋倒壊が発生し、令和6年10月1日時点で人的被害として、死者401名負傷者1336名にのぼった。住家被害が著しく、図2.7-1に示すように、全壊が8,459棟、半壊・一部破損が115,324棟であり、浸水なども含めると、12万棟を超える住家被害が発生した。また、図2.7-2に示すように、輪島市では、7階建ての鉄筋コンクリート造のビルの倒壊も発生した。さらには、帰宅困難となった観光客などが金沢駅付近に滞在し、地域の避難所へ流入し避難所を圧迫したことや、避難所運営の職員が不足し、十分な避難所が用意できていなかったことを受け、金沢市では、帰宅困難者対応マニュアルを作成し、公共事業者などとの連携を強化する方針を示している。平成23年3月11日に発生した東日本大震災では、首都圏において公共交通機関の多くが運行不可能となり、図2.7-3に示すように、首都圏全体で約515万人の「3月11日の内に帰宅ができなかったもの」と定義した帰宅困難者が発生した。それを受け、東京都では、平成25年4月に「東京都帰宅困難者対策条例」が施行され帰宅困難者への対策を強化している<sup>26)</sup>。帰宅困難者が発生することで、一斉帰宅による、群衆雪崩、緊急車両の妨げ、余震による負傷などの二次被害が懸念されている。そのため、混乱が収まるまでは、安全な屋内で過ごすことが求められる。しかし、多くの帰宅困難者が発生することが予想されるため、指定避難場所だけでは限界があり、民間施設の協力が必要不可欠である。2030年には、予測帰宅困難者の90%を収容できる59万人分の一時滞在場所の確保を目標としている。一時滞在場所に対する協定締結にあたり、災害時拠点強靱化促進事業として防災備蓄倉庫や非常用発電機など災害用設備の整備に要する費用の補助が行われるなど、国土強靱化対策として一時滞在施設の確保は重要視されている。



図 2.7-1 能登町の被害の様子

出典：石川県<sup>27)</sup>



図 2.7-2 石川県輪島市にて鉄筋コンクリート造のビルが倒壊した様子  
出典：北國新聞 DIGITAL<sup>28)</sup>



図 2.7-3 平成 23 年 3 月 11 日の新宿駅の様子  
出典：朝日新聞 DIGITAL (2011 年 3 月 11 日)<sup>29)</sup>

避難に係る、現状の課題として、災害関連死が挙げられる。災害の直接的な被害ではなく、図 2.7-4 のような避難所での生活を続ける中で、身体的負担により、持病が悪化することや地震による疲労が蓄積することで心不全や肺炎などの循環器系・呼吸器系の疾患を発症する場合や避難所に入れず、車中泊を強いられることによってエコノミークラス症候群を発症するなど、主に避難所の生活環境による被害である。平成 28 年 4 月 14 日に発生した熊本地震では、全体の死者 273 名のうち、災害関連死と認められた死者数が 223 名であり、約

8割を占める。令和6年1月1日に発生した能登半島地震では、令和6年11月26日時点で、全体の死者462名のうち235名が災害関連死と認められた。阪神・淡路大震災から災害関連死は課題となっているが、昨今その割合が増加しており、早急な対応が求められる<sup>30)</sup>。



図 2.7-4 能登半島地震における避難所の様子

出典：日本経済新聞（2024年1月6日）<sup>31)</sup>

災害対策の一例として、内閣府は日本銀行や、日本放送協会、各旅客鉄道株式会社などの公益事業を営む機関のうち、防災行政上重要な役割を有する機関を災害対策基本法に基づいて「指定公共機関」とする制度を設けており、令和5年6月23日時点で計106機関が指定されている。その中には、株式会社イトヨーカ堂、イオン株式会社やユニー株式会社などの大手小売企業も指定されている。このように近年では、商業施設などが地方自治体と協力し、一時滞在場所の提供、災害時の速やかな支援の実施、平常時においても物資や資材の備蓄を担うことによって災害応急対策へ貢献する災害時の官民連携の動きがみられる。その中で、民間企業に求められることは、主に3つある。事故や火災などの二次災害を防止することや従業員・顧客の安全確保といった基本的な防災対策、事業継続計画（BCP）の策定、一時滞在施設の供給による帰宅困難者の支援などにより企業の社会的責任を果たすことである。図 2.7-5 に示す BCP の策定では、業務の優先度を設定することや、代替方法の準備、復旧時間の目標を定めることで、災害時においても、円滑な業務継続を実現できる。BCP の策定の中で、業務の優先順位を改めて確認することで、重要業務の把握につながり、平常時においても企業競争力の強化や事業拡大が可能になる。BCP の策定や地域防災に取り組むことで、災害時の対応力強化や企業価値を向上させることができるなど企業側の利点もある<sup>32)</sup>。

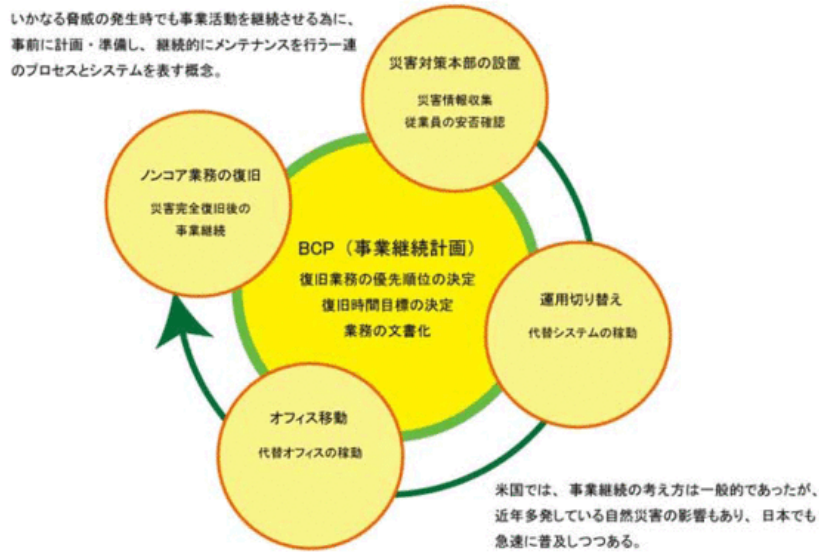


図 2.7-5 BCP の考え方

出典：東京都防災ホームページ<sup>26)</sup>

このような背景から、本研究では、ショッピングセンター（以下、SC）を一時滞在施設として利用した場合の避難場所収容力に対する効果を可視化し、一時滞在施設としての在り方の確立を目的とする。研究内容の詳細としては、現在指定されている避難場所の充足率を評価し、帰宅困難者受け入れに対する問題点を明らかにする。その結果により、民間企業の意識向上を促し、一時滞在施設提供の協力を試みる。SCの協力が得られれば、帰宅困難者の受け入れ拡大が実現し、避難所運営や防災計画において重要な役割を果たす。避難所の過密化を改善することで、健康的で快適な避難環境を確保できると考え、今後の避難所運営や防災対策の改善を目指す。本研究を通じて、企業と自治体が協力することで、より効果的な災害対応を構築することが期待される<sup>33)</sup>。

## 2.8 SCの一時避難場所利用とBCPの関係

国の防災基本計画において、企業は防災活動に取り組むべきであるということが記載されている。そして企業が防災活動に取り組むにあたっては、「防災計画」や「事業継続計画」を策定することが重要となる。ここでは、次のように「防災計画」の内容が、BCPの内容と比較して示されている。企業は、災害時に企業の果たす役割（生命の安全確保、二次災害の防止、事業の継続、地域貢献・地域との共生）を十分に認識し、自らの自然災害リスクを把握するとともに、リスクに応じた、リスクコントロールとリスクファイナンスの組み合わせによるリスクマネジメントの実施に努めるものとする。具体的には、各企業において災害時に重要業務を継続するための事業継続計画(BCP)を策定するよう努めるとともに、防災体制の整備、防災訓練の実施、事業所の耐震化・耐浪化、損害保険等への加入や融資枠の確保等

による資金の確保、予想被害からの復旧計画策定、各計画の点検・見直し、燃料・電力等の重要なライフラインの供給不足への対応、取引先とのサプライチェーンの確保等の事業継続上の取組を継続的に実施するなど事業継続マネジメント(BCM)の取組を通じて、防災活動の推進に努めるものとする。特に、食料、飲料水、生活必需品を提供する事業者や医療機関など災害応急対策等に係る業務に従事する企業等は、国及び地方公共団体が実施する企業等との協定の締結や防災訓練の実施等の防災施策の実施に協力するよう努めるものとする。

日本の国土の位置や地形、気候などの自然的な条件から、地震・津波や台風、豪雨などの自然災害が発生しやすい状況であることは、前述のとおりである。これまでに発生した災害によってどれくらいの範囲で被害があったのか、またその被害の大きさはどれくらいであったのかを知ることができれば、効果的な防災計画を立てることが可能となる。その際に利用するのが、ハザードマップである。「地区防災計画ガイドライン」(平成26年3月内閣府(防災担当))によれば、ハザードマップは災害による被害を予測し、その被害範囲を地図化したものとされている<sup>34)</sup>。具体的には、予測される災害の発生地点、被害の拡大範囲およびその規模、避難経路、指定緊急避難場所、指定避難所等の情報を地図上に図示したものである。ハザードマップは市町村等が作成し、その形や様式は自治体によって異なる。一般的には、ハザードマップの使い方やその地域で想定される災害の解説、また災害発生時の避難場所など発災時に役立つ情報が記載されている。すなわちハザードマップは、ある災害を想定し、それがどのような被害をもたらすかを示す。しかし、そこに示された被害はあくまで当該想定に基づくものであり、最大のものであるとは限らない。また実際には、想定していない災害が発生してハザードマップの被害を超える事態が起こる可能性もあり得る。想定する災害に大きさによって、対策に要する費用も異なってくる。どこまでの災害規模を想定すれば良いのかが問題になるが、各事業所や拠点において自治体が策定している「地域防災計画」において、どのような災害が想定されるのかが示されており、企業としては、その考え方に従って防災計画を策定しておくことが、最低限の目標と言える。

企業において防災計画を作成する主な目的は、「身体・生命の安全確保」と「物的被害の軽減」である。その目的は、BCPにおける目的の前提ともなっている。つまりBCPでは、防災計画の目的に加えて、優先的に継続・復旧すべき重要業務を継続する、または早期復旧することを目指すもので、両方の計画には共通する部分もあり密接な関係がある。ただ、その基本となる考え方や取り組み方に異なる。まず防災計画は、基本的に事業所などの拠点ごとに作成されるもので、災害から命を守るため、および被害を軽減するための対策を講じるためのものである。一方、BCPは、地震などの大規模災害が発生すると、ヒト・モノ・カネ・情報といった経営資源が限られることから、優先すべき業務を絞り込み、さらにどの業務をいつまでにどの水準まで回復させるかを決めておき、それを実現するために主に次の内容を策定するものである。

- 優先業務の特定
- 優先業務の復旧時間の設定

●代替手段の業務継続方法（業務の文書化）

また「防災計画」は、災害による被害を未然に防ぐ、または被害の拡大を防止するために、災害発災前の事前に準備しておくもの、「BCP」は発災後に取り組むものという違いがあるとも言える。ただし、本来継続すべき重要業務を、災害後も継続または早期復旧することを目指しているBCPは、防災計画がなされていることが大前提となる。

「防災計画」は、内閣府が公表している災害対策基本法で「国土並びに国民の生命、身体及び財産を保護する」と定められている通り、その建物や利用者の安全を確保することも防災に含まれている。また「防災計画」においては、企業全体の取り組みに加えて、一人ひとりの取り組みも重要になる。図 2.8-1 は両者の相違をまとめたものである。図 2.8-2 のように、防災計画では、「自らの命は自らが守る」という意識を持ち、会社や自宅における安全対策を行う必要がある。さらに防災計画には消防計画や避難確保計画、設備の浸水対策等が含まれる。このように、防災計画はBCPの一部であり、内閣府の資料では、BCPでは防災計画に加えて策定するものであるとしている。そこで、企業が災害対策に取り組むにあたっては、「防災計画」と「事業継続計画」の両方の観点から進めていくことが重要となる。図 2.7-2 は、この「防災計画」と「BCP」の関係を示しており、事業を正常化するための目的を達成するためには、「防災計画」が完備された状態で災害発生に備え、いざ災害が発生した際に、その被災状況に応じてBCPを発動するという一連の流れを構築していくことになる。その意味で、BCPには「防災計画」と「BCP」が含まれ、事業再開のために実施する内容を「狭義のBCP」と考えられる。

防災計画		BCP（狭義）
身体・生命の安全確保 物的被害の軽減	主な目的	優先的に継続・復旧すべき重要業務の継続・早期復旧
拠点が在る箇所で発生する災害等が対象	対象とする事象	拠点が在る箇所で発生しなくても、事業に影響する災害等が対象
拠点ごとに実施	活動・対策の 検討範囲	拠点全体を事業中断の観点から横断的に検討する。 委託先・調達先・供給先など事業継続に関して依存関係にある企業・組織も検討する
身体・生命の安全確保、物的被害の軽減を主管する 部門（総務部門etc.）	取組の単位・主体	経営者＋重要業務の復旧に関わる部門が横断的に参加
各拠点での被害を抑制する対策 ：耐震化、消火活動、負傷者の救出、 救援、防災備蓄etc.	検討すべき戦略 ・対策の種類	不足する経営資源を補う代替戦略 ：代替拠点の活用、他社への委託etc.

図 2.8-1 防災計画とBCPの相違

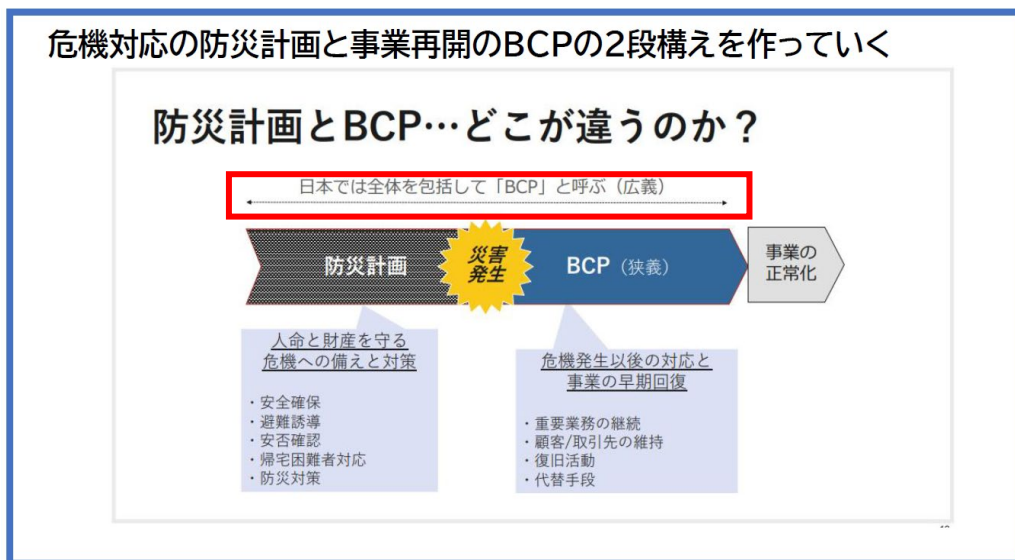


図 2.8-2 防災計画と BCP の関係

令和 2 年「防災基本計画」では、地域防災計画において重点を置くべき事項として次の項目を挙げている<sup>35)</sup>。

1. 大規模広域災害への即応力の強化に関する事項

大規模広域災害にも対応し得る即応体制を充実・強化するため、発災時における積極的な情報の収集・伝達・共有体制の強化や、国と地方公共団体間及び地方公共団体間の相互支援体制を構築すること。また、国及び地方公共団体と企業等との間で協定を締結するなど、各主体が連携した応急体制の整備に努めること。また、相互支援体制や連携体制の整備に当たっては、実効性の確保に留意すること。

2. 被災地への物資の円滑な供給に関する事項

被災地への物資の円滑な供給のため、被災地のニーズを可能な限り把握するとともに、ニーズの把握や被災地側からの要請が困難な場合には、要請を待たずに必要な物資を送り込むなど、被災地に救援物資を確実に供給する仕組みを構築すること。

3. 住民等の円滑かつ安全な避難に関する事項

住民等の円滑かつ安全な避難を確保するため、ハザードマップの作成、避難勧告等の判断基準等の明確化、緊急時の避難場所の指定及び周知徹底、立退き指示等に加えての必要に応じた「屋内安全確保」の指示、避難行動要支援者名簿の作成及び活用を図ること。

4. 被災者の避難生活や生活再建に対するきめ細やかな支援に関する事項

被災者に対して避難生活から生活再建に至るまで必要な支援を適切に提供するため、被災者が一定期間滞在する指定避難所の指定、周知徹底及び生活環境の確保、被災者に対する円滑な支援に必要な罹災証明書の発行体制の整備、積極的な被災者台帳の作成及び活用を図ること。

5. 事業者や住民等との連携に関する事項、

関係機関が一体となった防災対策を推進するため、市町村地域防災計画への地区防災計画の位置付けなどによる市町村と地区居住者等との連携強化、災害応急対策に係る事業者等との連携強化を図ること。

#### 6. 大規模災害からの円滑かつ迅速な復興に関する事項

大規模災害からの円滑かつ迅速な復興のため、地方公共団体は、復興計画の作成等により、住民の意向を尊重しつつ、計画的な復興を図ること。

SCを一時避難場所として利用することは、この地域防災計画において重点を置くべき事項すべてに適用できるものであり、防災計画を包含するBCPの観点からも有用であると考ええる。

### 第3章 公助における課題の解決策：3次元データ取得法の検討

本章では、河川堤防のモニタリング技術が必要となっている背景をあらためて技術者不足の観点から取りまとめ、この課題解決策としての点検作業のICT化を議論する。次に本研究で検討するMMS技術の概要と、MMSによって取得されるレーザ光を使った測量技術の基本特性を検証した実験結果を述べる。本章では、3.1節にてMMSの開発の必要性を議論し、3.2節以降にてMMSによって取得されるレーザ点群の特性を評価した結果を示し、それらの結果に基づいて、3.4節にて公助における課題と解決策の考察と総括を行う。

#### 3.1 モニタリング技術の開発の背景

建設業界では深刻な高齢化と若手不足により、2030年に最大94万人の技能者不足が予想される危機的状況にある。具体的には、図3.1-1に示すように、2022年の就業者数は20年前と比較し20%以上減少し、55歳以上が約36%を占める一方で、29歳以下の若手は約12%と高齢化が顕著になっており、2045年には技能者数が2020年の半分に減少する可能性があると言われており、特に地方の建設業界は、若者の都市部流出の影響により、土木技術職員が0人の自治体が町で36%、村で76%に達し、また有効求人倍率8倍超と技術者不足の問題は深刻化している。

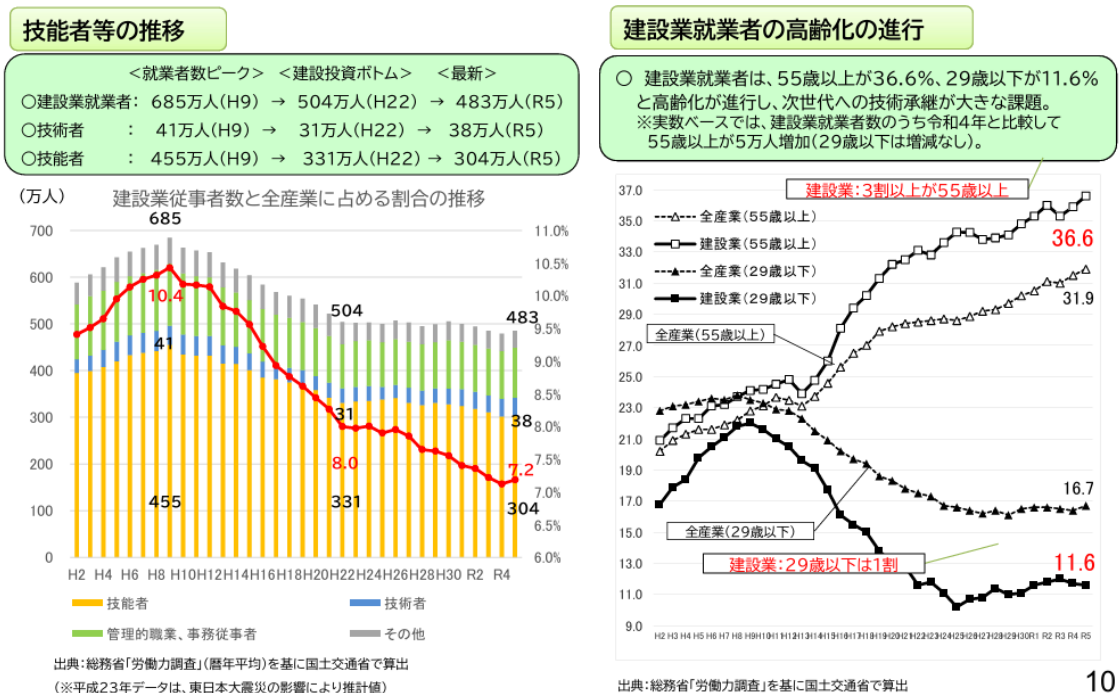


図 3.1-1 建設業就業者の実態：2025 河川技術シンポジウム\_OS2 話題提供

「河道管理の現状と課題」の資料より<sup>1)</sup>

図 3.1-2 は河川管理に関する実態を調査した際に、国および自治体の職員が課題を抽

出した結果である。図より分かるように、現在の点検作業では不備が多く存在することを認識しながらも、技術者不足により課題を解消できない実情であることが示されている<sup>2)</sup>。

## 2)河川の管理における課題例 ～河川維持管理技術の蓄積と継承①～

### ◆河川維持管理の課題に関する現場の声の例

#### 《直轄の現場より》

- 全ての堤防を職員が徒歩により点検しようとしているが、人員が少なく対応が厳しい状況にある。
- 日常の業務に追われ、職員間で技術的なOJTが十分にできない。
- 河川構造物の補修や更新の診断や評価に当たっての一定した手法や基準がなく判断が難しい。
- 地域の方々や市民団体との共同作業を進めているが、必要経費の支出が難しく良好な関係を継続しにくい。
- 危険な利用、河川のゴミ対策、不法係留等には、河川管理者の対応には限界がある。
- 大型の機械設備の点検整備を委託する信頼できる業者の確保が難しい。

#### 《都道府県等の現場より》

- 職員数削減と共に、直営で行っていた月点検が委託化されたため、職員の技術力継承及び習熟の機会が失われ、技術力維持が困難である。
- 職員の数も減り、予算も削減していく中で、マニュアルに基づく適正な点検を実施していくことが困難になっている。
- 小規模な施設については、地元住民に点検も含めて管理委託しており、専門的な知識を必要とする修繕の判断等が難しい。
- 機械設備の点検を土木職職員が行っているが、点検に必要な専門能力が十分でない。
- 河川施設の管理台帳等がないため、正確な施設数に把握できていない。点検、修繕等の過去のデータが不明である施設が多い。
- 河川の状態把握のために測量等が必要だが、予算制約により目視判断しかできていない。

図 3.1-2 現状の河川管理における課題に関する調査結果

そこで将来的を含めた建設分野の技術者不足に対応するために、2016年度から建設現場の生産性向上を目指し、調査・測量から設計、施工、検査、維持管理・更新までのあらゆる建設生産プロセスでICTを活用することで建設現場の生産性を2割向上することを目標として掲げるプロジェクトが国を中心に進められてきた。その結果測量分野においては、従来は測量機器側だけでなく測点側にもターゲットを持った作業員が必要であり、かつ測量したいポイントが障害物などで測れない場合もあった。ICT機器を活用した測量では、短時間で広範囲に、かつ災害現場などの危険な場所や、急峻な山間地など地形的にも人が容易に立ち入れない場所においても測量が可能となり、データの処理などを考慮しても、従来手法の約4割の人工で測量することが可能となっている。このように、ICT技術の進展により建設現場の生産性向上は一定の効果は広く認知されている。デジタル技術の積極的な導入により、人手不足を解消しようとする取り組みはDX（デジタルトランスフォーメーション）とも言われて注目されているが、推進人材の不足や現場のデジタルスキル不足がボトルネックとなり、実際に実務に取り入れられているのは1割程度に留まっているとも言われている<sup>3)</sup>。前述のとおり、地方の建設・土木技術職の人員不足は非常に深刻な状況にあり、2023年4月時点で約25%の市町村で土木系職員が1人もいない状態にある中で、洪水リスクの増加、施設・堤防の老朽化が進んでいる。さらには日本の1級・2級河川は非常に長く、長大

な管理延長に対する効率的な維持管理手法の確立が課題となっていることを考慮すると、ICT化による効率的な河川管理はますます重要になっている。

具体的な ICT 技術の活用として、図 3.1-3 のようにレーザの活用が挙げられている。このレーザの活用による河川堤防の維持管理にあたっては、これまでの「事後的管理」から「予防保全的管理」に転換する「計画的型管理」を実現する戦略的な維持管理を推進することが提言され（社会資本整備審議会河川分科会安全・安心が持続可能な河川管理のあり方検討委員会）、その戦略の中で計測手法は図 3.1-4 の河川の維持管理作業の中の「状態把握」を行うものである。さらに「戦略的な維持管理」においては、河川砂防技術基準維持管理編〔河川編〕（平成 23 年）に基づいて河川維持管理計画を作成し、それに基づき効果的・効率的な河川維持管理を推進していくことが求められる<sup>4)</sup>。これを背景にして、図 3.1-3 に示される効率的な「河道・堤防点検技術の開発」としての「レーザプロファイラ」が開発対象の技術に挙げられているという背景がある。より詳細には、サイクル型維持管理として「河川（維持）管理計画⇒現地の把握・分析・評価⇒対策⇒改善・改良後の把握⇒管理計画の更新」を推進することを目標に、従来の巡視点検を効率的に実施するための“レーザプロファイラ”による空間情報データを用いた河川管理手法を担う計測手法の構築が求められている。



図 3.1-3 河川管理に向けた施策の具体的事例<sup>5)</sup>

レーザの活用が推進されるのは、取得される 3 次元データに次のような利点があるからである<sup>6)</sup>。

- ・計測範囲全体を網羅し、対象区間・区域の概査が均一に評価できる。
- ・画像や数値解析による工学的分析・評価が可能となる。
- ・注力ポイントが判読でき、重点点検区間・箇所を検出が可能となる。

- ・ 出水時・地震時の迅速な対応が可能となる。
- ・ データの蓄積によりモニタリング分析が随時実施でき、評価精度の向上が期待できる



図 3.1-4 河川の維持管理作業の具体的フロー<sup>5)</sup>

レーザによる 3 次元データの取得を効率化させる手法としては、レーザスキャナを航空機あるいは車両に搭載する手法が一般的に用いられる。図 3.1-5 は人的労力による GNSS 測量を参照にした航空レーザ測量と車両走行を利用したレーザ測量の利点と課題である<sup>7)</sup>。

	利点	課題
GNSS 測量	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 1m の間隔 (線的) で計測できる。</li> <li>・ 従来手法と同等の精度で縦断測量では 50% のコスト低減を実現。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 堤防肩あるいは堤防中央を線的に計測する。</li> <li>・ 航空レーザより安価であり、計測は容易に計画できるが人的労力を必要とする。</li> </ul>
航空レーザ測量	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 堤防を中心に 100m の範囲を 35cm の間隔 (面的) で計測できる。</li> <li>・ GPS 手法と同等の精度の確保が困難。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 高精度化が困難。</li> <li>・ 計測計画の立案などに手間を要し迅速な計測が困難。</li> </ul>
車両走行を利用したレーザ測量	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ &lt;航空レーザと GPS の利点を保持&gt;</li> <li>・ 地盤沈下に加え、嵩上げ、腹付け盛土、堤体強化等による堤防沈下を 1 年間隔で捉えるために必要な 20mm の計測精度が確保できる。</li> <li>・ 堤防を中心に連続的かつ面的な計測が可能。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ レーザ照射距離や密度と計測精度の関係が未知である。</li> <li>・ 適した走行速度の設定などの計測技術が未確立。</li> <li>・ 植生の影響などを考慮する必要がある。</li> </ul>

図 3.1-5 3 次元データ取得法の利点と課題

本研究においては、高密度で遠距離照射が可能なレーザスキャナを搭載した車両走行による河川堤防の変位計測手法を開発する。これは、“車両走行”という簡便な手法で実現でき、前述の技術者不足を背景とした効率的な点検作業の実現することが期待されるからである。車両走行によるレーザ点群を取得する装置は MMS と称されるものが一般であることは前章にて記述した。ここでは、あらためて MMS の仕様を示す。

車両で移動しながら計測を行なう際には、データ取得時の各種センサ（：レーザ機器やデジタルカメラ等の外界情報を取得する機器）ヘッドの位置姿勢を高精度かつ時間遅れなく取得する必要がある。そのため MMS においては、例えば図 3.1-6 のように各種センサと位置姿勢標定装置を同じ天板上に固定し、一つの剛体として動くように設計されている。

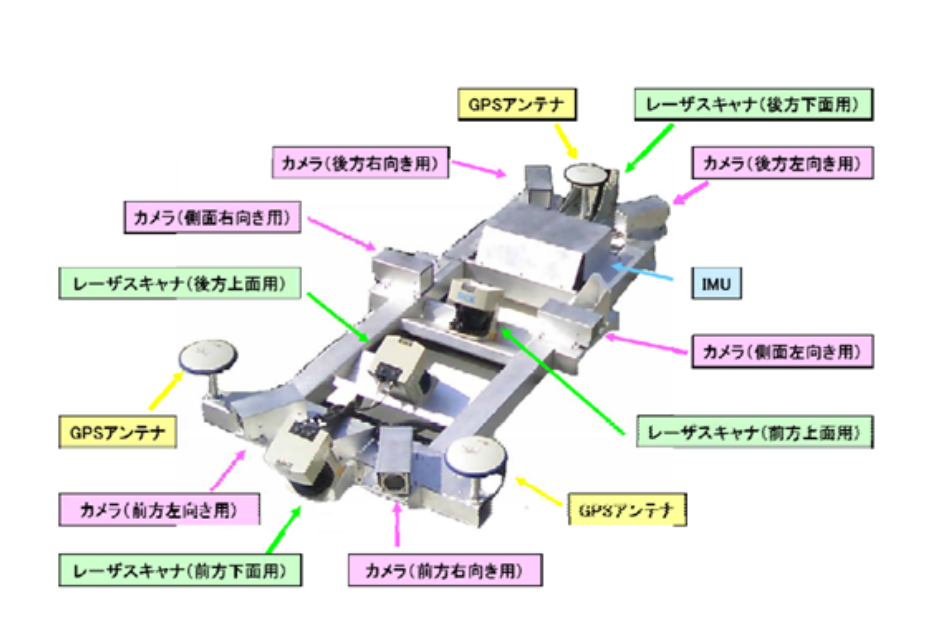


図 3.1-6 MMS に搭載されるセンサの例

車両走行時のレーザ照射に関して、レーザ照射の姿勢、方位および位置を知る際には、慣性センサ（ジャイロ・加速度計）を用いた慣性計測装置を使うが、それらは加速度・角速度を用いた積分による計測によって行うために、得られた情報の誤差が時間と共に増大することが避けられない。それを改善するため GNSS などの外部情報を活用する技術を導入する。これは GNSS の位置データが長時間にわたって安定していると言う長所を生かすものであるが、GNSS 単体では姿勢・方位が検出できない、データの更新が遅い、電波状況に影響を受けるなどの短所があるので、それを IMU により補うことで、お互いの長所を引き出す工夫が取り入れられている。すなわち IMU で算出されるデータは積分計算の結果であるため、常にドリフト変化が発生する問題を抱えており、その改善のために慣性装置を用いて位置・姿勢情報を連続的に計算し、GNSS から出力される位置・速度情報を用いて慣性装置の誤差を補正する方法が導入される<sup>8)</sup>。

本節において、MMS の計測技術の開発が必要であることを考察した結果を示す。兵庫県を流れる 1 級河川の加古川を対象にして照射距離 20m の仕様のレーザスキャナを搭載した MMS によって堤防の天端・法面の計測を実施した。具体的には、MMS によって堤防天端ならびに堤外地の法尻かからのレーザ照射を行なった。図 3.1-7 は計測区域の概要である。

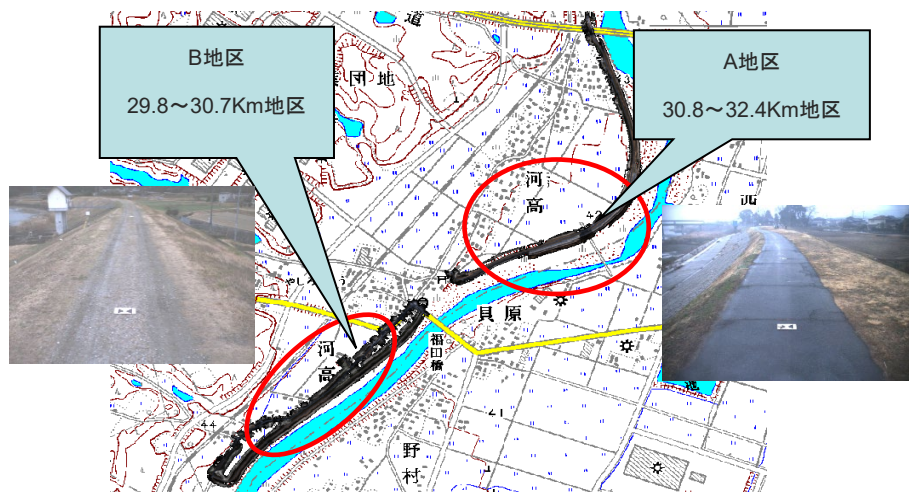


図 3.1-7 計測位置図

図 3.1-8 は、取得したレーザ点群によって堤防を再現した例であり、表 3.1-1 はレーザ点群の精度を検証した結果である。これは図 3.1-8 で示す堤防天端あるいは法面上にそれぞれ 11 個の検証点を設け、複数レーザ測量を実施して検証点の座標値を求め、その値を GNSS 測量によって得た座標値と比較したものである。堤防天端道路中心の実測との評価にて較差および標準偏差で表されるバラツキとともに、表 2.1-1 で示される要求精度 50 mm を満たしていない。すなわちレーザ点群では形状の把握は可能であるが、時間的な変化から変状を定量的に判断するための精度は充分でないことが分かる<sup>9)</sup>。これはレーザ点群の密度が計測に対して充分でなかったこと等によるものであり、これまで実用化されてきたレーザ測量を単に河川堤防の計測の MMS に転用することが困難であることを示すものである。



図 3.1-8 点群によって再現した堤防

表 3.1-1 精度検証結果

検証点設置位置	検証点数	平面位置		標高	
		較差 (平均) (m)	バラツキ(m)	較差 (平均) (m)	バラツキ(m)
堤防天端	11.000	0.084	0.084	0.037	0.047
	11.000	0.086	0.086	0.004	0.056
	11.000	0.093	0.090	0.057	0.067
	11.000	0.089	0.116	0.041	0.049
	11.000	0.114	0.103	0.042	0.054
のり面	11.000	0.099	0.096	0.088	0.085
	11.000	0.085	0.083	0.075	0.072
	11.000	0.095	0.092	0.077	0.074
	11.000	0.094	0.090	0.078	0.076

そこで、図 2.3-3 に示す MMS に搭載するレーザスキャナの仕様を考察するための実験結果について述べる。すなわち 3 次元データの取得法としてのレーザスキャナの精度検証実験結果を実施し、河川堤防を計測するのに適した MMS のセンサを考察する<sup>10)</sup>。

### 3.2 レーザ測量精度検証実験の概要

実験は 9 月および 12 月において 2 度実施し、その結果から再現性を含めた精度に関して考察する。計測現場の状況を図 3.2-1 に、計測現場の見取り図を図 3.2-2 に示す。図における青色の四角形で示す位置が 3 次元レーザスキャナの計測位置である。また参照のためにトータルステーション (以下 TS) による計測を実施し、その設置位置を緑色の三角で示す。



図 3.2-1 計測現場の概観

橙色の丸印は 3 次元レーザスキャナのレジストレーションの際に使用するターゲットであり，それぞれのターゲットを w3, w5 で表し，また図中の A~J の記号は本検証作業に使用した検証点である．これらの検証点の遠景を図 3.1-3，また近景を図 3.3-4 に示す．

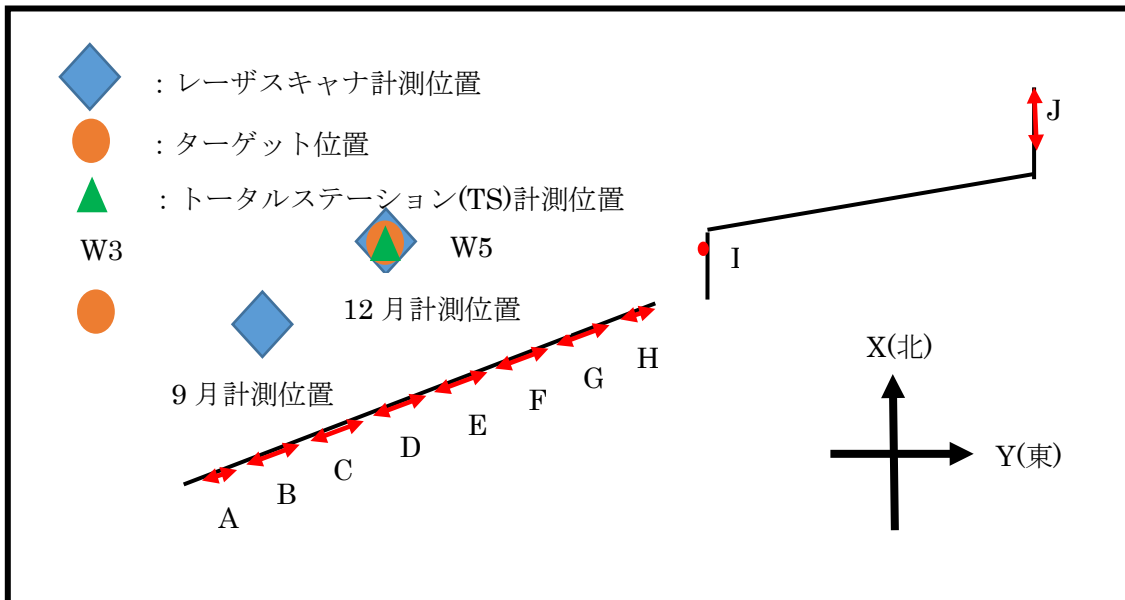


図 3.2-2 計測現場の鳥瞰図



図 3.2-3 遠景写真 A~J

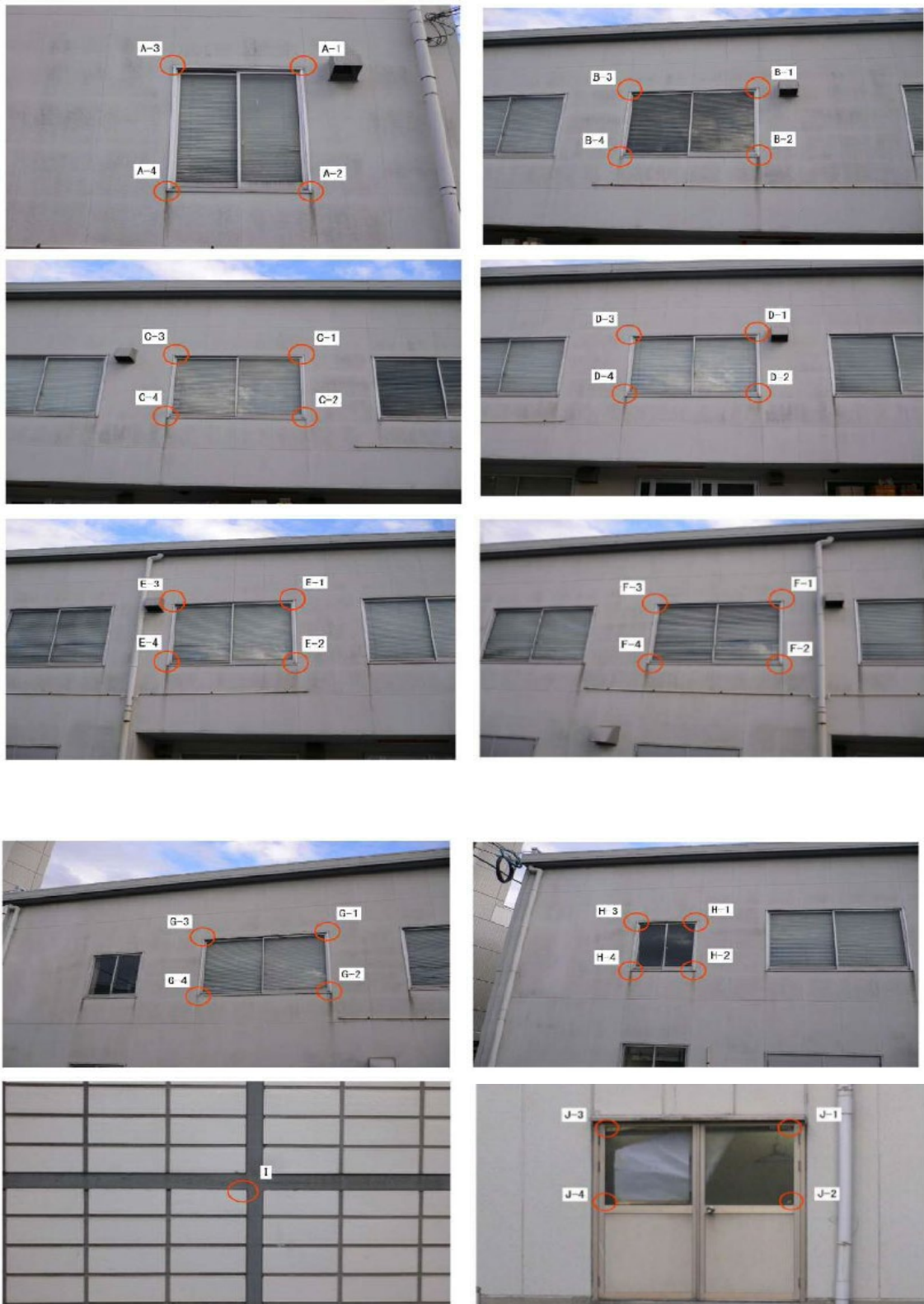


図 3.2-4 近景写真 A-1～J-4

実験に用いたレーザスキャナは、最大照射距離 360m、スキャンレート約 101 万点/秒の仕様である。本計測実験では、レーザスキャナより計測される点群より求めた座標値と、TS により取得される座標値を比較する。図 3.2-3 および図 3.2-4 に示す A-1～H-4 の各窓枠の角、あるいはタイルの目地の角、また扉のガラス部分の角を検証点とした。例えば図 3.2-4 における検証点 B-1 は、検証点が存在する建物の壁面の奥行き、上下、左右それぞれの方向から伸びる赤色のエッジ線の交点を求め、当交点の座標値を用いる。

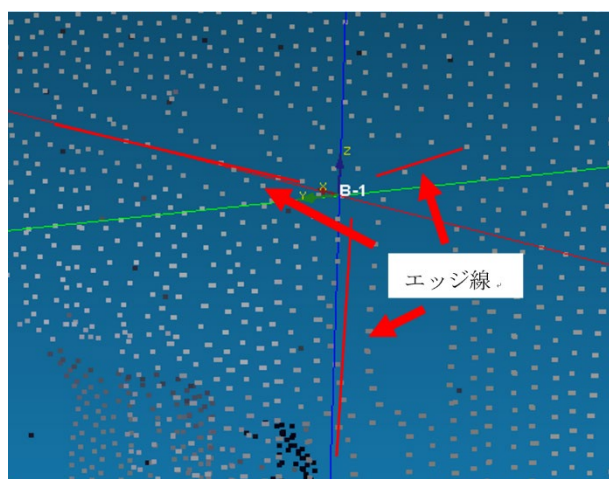


図 3.2-5 窓枠等の検証点座標の特定方法

評価する精度は式 3-1 および式 3-2 で求める。TS を使った測量によって得られた座標値を参考にして、レーザスキャナの精度を求めるものである。レーザの測距誤差は仕様では、正確度 10mm、精度 5mm であるが、前節で議論したように仕様通りの精度は出現せず、精度は計測データを取得するまでは未知数である。本研究は、レーザ測量に影響を与える要因を考察し、河川堤防の測量に適したレーザスキャナの仕様を考察するものである。そこで、これまで測量作業に使用される TS による測量とどの程度乖離するのかを評価し、また RMS によって計測値のバラツキを評価する。

$$DIS = OBS - TV \quad \text{式 3-1}$$

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

DIS:較差 OBS:レーザ点群により計測した座標値,  
TV : TS により取得した座標値, RMS:平均二乗平方根

次節において精度の考察を行うが、精度は RMS すなわちバラツキで評価する。

### 3.3 レーザ測量精度に及ぼす要因の考察

本節では、データの点群密度と照射距離、入射角の関係を考察する。図 3.3-1 は、地面に照射した際の車両からの水平距離とレーザ点群密度の関係である。河川堤防の標準的な法

勾配 2 割の断面形状を考慮すると、堤防天端を走行しながら計測する場合は、鉛直および水平距離にして 20m の範囲内が対象となるが、照射距離による点群密度の変化が大きく表れることが分かる。法面の法尻箇所の点群密度を向上させるためには、往復走行によって得られたデータを重ね合わせるなどの工夫を行なう必要がある。また実際の河川堤防では、法面上の植生や小段等のレーザ照射の障害になる物の影響により、堤防法面全体で均一なレーザ点群を取得することは困難である場合もあり、天端とのり肩部以外と法面では点群密度が大きく異なることが予想される<sup>1)</sup>。図 3.3-2 は、点群密度と照射距離の関係である。点群密度は、検証点の周囲 0.5m×0.5m の正方形内のレーザ点数である。

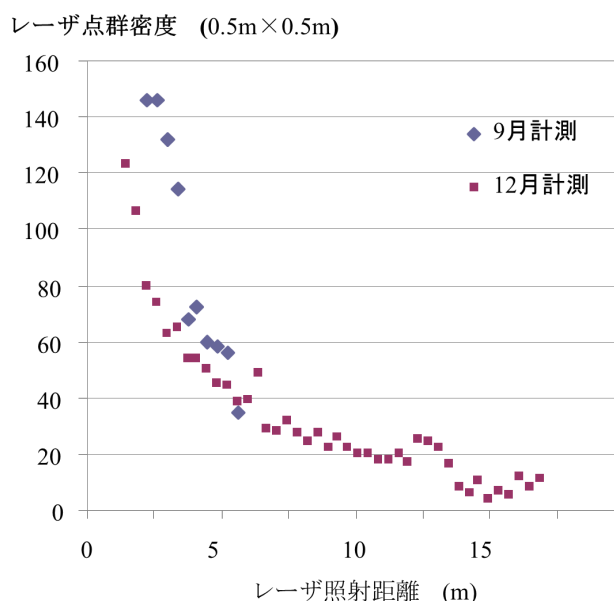


図 3.3-1 レーザ照射距離とレーザ点群密度の関係

次にレーザ点群の座標計測精度を検証した実験結果について記述する。河川堤防では、MMS が走行する場所は天端が一般的であり、レーザが照射される角度は俯角になるが、レーザで計測される座標値はフットプリントと称されるレーザ照射面積に依存することが知られており、仰角もフットプリントの大きさを変化させるので、その場合の精度を把握しておけば、河川堤防を計測する場合の俯角と精度の関係も類推することができる。計測精度の検証にあたっては、GNSS 測量で設置した基準点からノンミラー型 TS を用いて窓枠等の四隅を計測し、そこから窓枠の重心の座標を求め、前節の式により MMS で計測した値と比較した。

計測時は、建物からの距離を変化させた。これは、レーザ照射距離を遠くした条件により、レーザ点群密度の影響が大きく現れたデータを取得し、そのデータを使って計測精度の検証を行なうためである。図 3.3-2 は建物の壁面に平行な方向（水平方向と記す）の精度、図 3.3-3 は建物の壁面に鉛直な方向（鉛直方向と記す）の精度を検証した結果である。それぞれ車両からの標高差を横軸にしている。水平方向および鉛直方向の精度に関しては、車両と建物間の距離に応じて計測精度が劣る傾向が現れている。これは、レーザ点群密度が関係し

ていると考えられる。また水平方向の計測精度では仰角に対しての明瞭な依存性がほとんど見られないが、鉛直方向の精度に関しては建物と車両間の距離による精度の差が大きく出現している。この原因として次のような要因が考えられる。レーザ光は距離とともに広がる性質を持つ。対象物からは、ある広さを持つスポットから1つの値をデータとして取得することになるので、このレーザのスポット径が小さいものほど精度が良いことになる。この計測対象照射時のレーザのサイズはフットプリントと称され、フットプリント  $D$  および分解能  $S$  と照射距離の関係は次のようにあらわされる。

$$D=0.17R+12 \quad , \quad S=0.026R$$

$D$  : スポット径 (mm) ,  $R$  : 照射距離 (m) ,  $S$  : データ間隔 (分解能) (mm)

今回の計測の精度の目標は 50mm を考えており、レーザスキャナの仕様上では 3.0mrad の仕様で 100m先でのスポット径は約 30mm である。精度検証結果では、100m 以内の照射距離でも 50 mmの精度を得ることが困難な場合が多く、フットプリントが与える精度の影響は実際には大きく現れることが分かる<sup>12)</sup>。

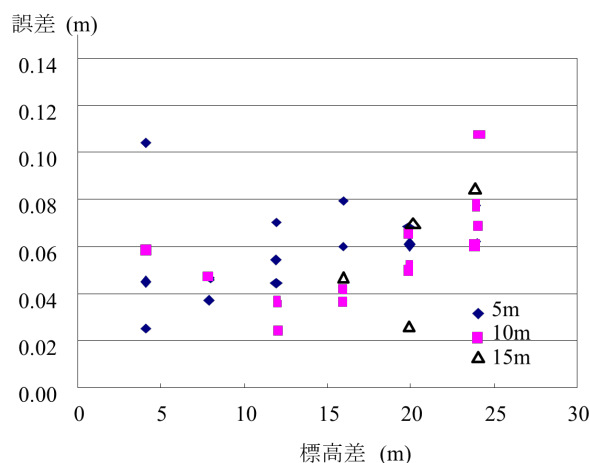


図 3.3-2 水平方向の精度検証結果

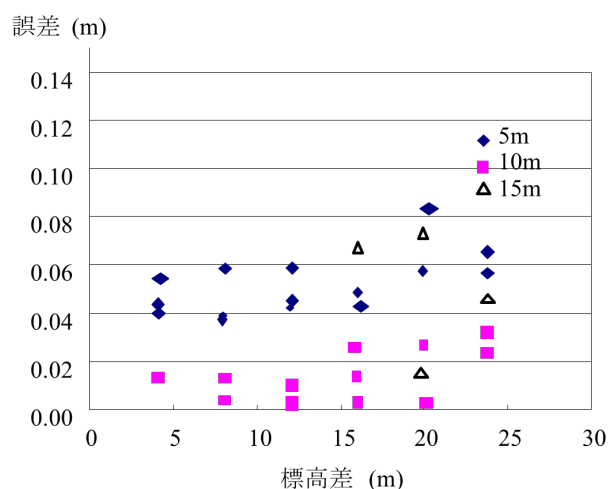


図 3.3-3 鉛直方向の精度検証結果

さらに点群密度の影響が考えられる。図 3.3-4 は図の標定点をレーザ点群で再現した図である。図に示すように、点群密度によって標定点の形状の認識の良否の程度は大きく変わる。標定点の中心の差票を求めるためには、明確な形状の認識が必要であり、そのためには高密度の点群が必要である。堤防の変状を定量化する際にも、まずは変状発生個所を認識する必要がある。これらの結果を勘案すると、MMS による河川堤防の計測には、堤防天端から堤防全体を照射する 20~30m の範囲内の点群密度およびレーザ光の対象への入射角が鉛直に近くなる条件の計測になることが重要であると考えられる<sup>13)</sup>。

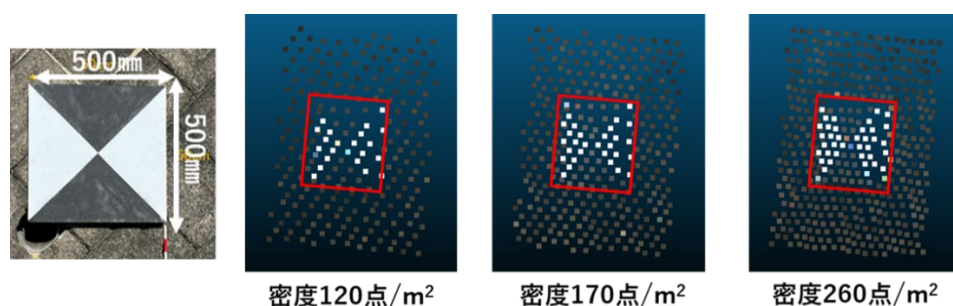


図 3.3-4 点群密度と形状認識の難易さの関係

### 3.4 第3章のまとめ

本章では、3次元レーザ点群による堤防モニタリングの実用化を図るために、レーザ点群の特性を踏まえて、使用するレーザスキャナの性能を考察した。レーザ点群の精度検証実験の結果から、あらためてレーザの点群密度と精度の関係をまとめると図 3.4-1 となる。ここでの精度は前節で議論した TS とレーザスキャナの測量結果に基づくものである。

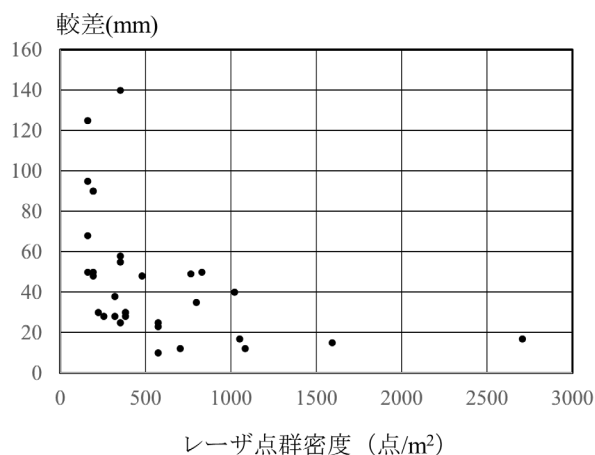


図 3.4-1 点群密度と精度（較差）の関係

機器の仕様上でのレーザの照射距離は 100m 以上であるが、15m 以内でも照射距離が長くなるにつれて、点群密度が大きく減少する。図 3.4-1 によると、この点群密度の減少に伴い、較差が大きくなる傾向が現れる。図に示した結果は、TS による測量値が正しいと想定した場合の結果ではあるが、対象物の認識の良否が較差に直接影響を及ぼすので、レーザ光が到達しているかどうかを判断するのではなく、対象物を正確に認識できる照射点数が確保できるのかの観点が重要になることが分かる。またレーザ点群密度は、車両走行速度に依存することも予想されるので、河川堤防の変状検出を目的とした MMS においては、計測の効率化との兼ね合いもあるが、走行速度を抑制してレーザ点群密度の向上を図った方が、変状の認識は容易になり、また精度の良い計測につながると言える。

また本章における検証作業では、3次元レーザスキャナに関する点群密度と照射距離だけでなく、レーザ光の入射角度についても検討した。レーザ光は2章にて示したように本計測機器は 0.1m で 3.5mm のフットプリントを持つように設計されている。そのため、照射距離に応じてフットプリントが大きくなり、その結果として点群密度および精度の減少につながる。したがって、本研究が提案する図 2.3-3 に示す高所からのレーザ光の照射を活用する技術は、車両を停止させた状態でレーザスキャンすることで点群密度の向上を図ることが可能であり、さらにレーザ光の入射角度を制御できるので河川堤防計測として適していると言える。これらのことより、本研究の提案手法においては、レーザ光の照射距離は堤防全体を照射範囲とする仕様で良く、ハード機器の低コスト化を図ることが可能である。次章において、表 4.1-1 に示される要求精度を堤防計測で実現できるのかを検討する。

表 4.1-1 各河川管理項目の目的に応じた許容誤差（目安）

:「河川管理用三次元データ活用マニュアル（案）」（国土交通省）<sup>14)</sup>

大分類	中分類	小分類	活用目的	概略の許容誤差 (標高)
治水 関連	河道の 流下能力	堤防高・形状	越水危険箇所抽出	5cm 程度
		河道形状	形状把握	30cm 程度
		土砂堆積	河床掘削等の対策検討	30cm 程度 (差分解析の場合は 15cm 程度)
		植生(樹木)の繁茂	植生ボリューム把握	50cm 程度
		河床材料	調査地点選定	—
	局所的な 流速・流向・ 抵抗	水衝部	洗掘状況の定量把握	30cm 程度
		河川横断工作物設置箇所の 下流、流速に影響を与える 深掘れ等	洗掘状況の定量把握	30cm 程度
		植生(樹木)	伐採計画の策定	15cm 程度(差分解析 により成長度を把握 するため)
	構造物	堤防	点検箇所の一次スクリー ニング	5cm 程度
		河川管理施設(例 根固工)	変状把握	30cm 程度
		許可工作物(橋梁)	橋脚部洗掘状況把握	30cm 程度
	危機 管理	堤外側	越水危険箇所	越水危険箇所抽出
被災箇所調査			被災状況把握	30cm 程度
災害復旧			被災箇所形状把握	10cm 程度
堤内側		堤内地盤形状	越水時危険箇所抽出	5cm 程度

## 第4章 河川モニタリング技術の現場検証実験

前章において、レーザ点群による測量の基本特性を検証した。本章では、MMSによる河川堤防のモニタリング技術の実用化を検証した結果を述べる。MMSは、車両走行という迅速かつ簡便な作業で広範囲の測量が可能になることを活かして、道路分野において道路台帳付図の整備、路面性状の把握の基礎調査等に活用されてきた技術である。前述のように、河川堤防の地形を測量するため、高所にレーザスキャナを設置する工夫は試みられているが、汎用化されているものは、車両の天板に測量機器を設置した仕様のものである。本章では、まず車両走行にともなうレーザ測量の特性を検討するため、汎用的な仕様であるMMSにおける車両走行速度およびレーザ照射角度によって、レーザ点群密度や測量精度がどのような影響を受けるのかを考察する。次に高所からのレーザ照射の効果について検証した結果を述べる<sup>1)</sup>。

### 4.1 MMSを用いたモニタリング技術の課題

実験に用いたレーザスキャナは、最大照射距離 500m、スキャンレート 100Hz およびパルスレートが 300kHz のものである。ここでは、高密度のレーザ点群が得られるように、車両の走行方向に対する相対方位角が 45 度となる角度でレーザ照射するものを 2 基搭載した。なおレーザスキャナは 90 度の天頂角で設置され、360 度スキャンする。レーザスキャナは車両天板上の位置に固定され、レーザ照射位置も車両と同じ高さとなる。レーザスキャナを利用した測量の特徴として、照射距離の増大に連れて点群密度は低下する。本研究では、堤防全体の測量結果から健全性を評価する手法を検討するので、堤防の形状の再現性の良否に関係するレーザ照射密度に注目する。具体的には、レーザ照射距離に対するレーザ点群密度の低下が、車両走行速度の影響を受けるのかを考察した。

実験結果を図 4.1-1 に示す。実験では MMS の走行速度を変えて往復走行し、走行箇所からの距離に応じて、車両と同じ高さに設置した標定点の 1m<sup>2</sup> の面積に入射したレーザ光の個数をレーザ点群密度とした。図から、レーザ点群密度は、車両からの距離だけでなく、車両速度の影響も受けることが分かる。具体的には、車両からの距離と共にレーザ点群密度が急激に減少すると共に、車両速度が大きくなると照射距離に対するレーザ点群密度が減少する。本実験で用いた MMS では、500m の照射距離の仕様であるレーザスキャナを用いたが、時速 20~30km の走行速度時では約 20m 程度以内の範囲内しか高密度のレーザ点群が得られないことが分かる。レーザ点群密度の間隔は、車両走行速度、パルスレートおよびスキャンレートで決定される。例えば、時速 20km の速度で走行した場合、パルスレートが 200Hz、すなわち 1 秒間に 200 回スキャンした場合、進行方向のレーザ点の間隔は約 0.028m となる。また進行方向と直角の方向は、パルスレートが 55 万回でスキャンレートが 200Hz の場合、1 回転あたりのレーザ照射数は 2,750 回となり、約 0.13°間隔でレーザが照射されるので、10m 離れた位置でのレーザ点間隔は 0.023m となる。このように車両の走行速

度が速くなると、進行方向のレーザ点間隔は大きくなる。これにレーザ光線の広がり角の影響が入るので、実験結果のように、レーザ点群密度は、照射距離が大きくなり、さらに車両走行速度が速くなるにつれて大きく低下する。このように車両走行による測量は作業の利便性はあるものの、汎用的な仕様の MMS では、近距離から遠距離までの対象物に対して、均一なレーザ点群密度を得ることが困難となることが明らかになった。

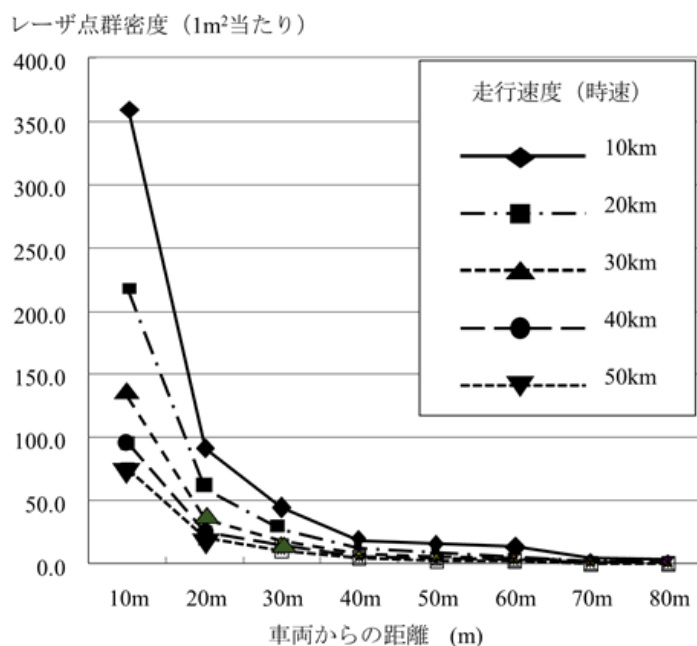


図 4.1-1 レーザ点群密度と走行速度および照射距離の関係

次に、堤防天端からのレーザ照射による測量精度に対する俯角の影響を検討した。本研究では、岡山県の一級河川旭川水系である百間川の右岸側 8K ポスト地点付近において、河川堤防の堤外地側の法尻と堤防天端を走行して測量した。図 4.1-2 および図 4.1-3 は、法尻にて計測を行ったリフトアップ式の 3D レーザスキャナ内のカメラから撮影されたものである。計測区間に特殊堤、樋門・樋管等は無く、点群を用いて求めた法面勾配は約 2 割であった。堤防天端から測量した場合、法面上の各地点では、照射距離だけでなく、レーザ光の入射角度が異なる。レーザ光の入射角に応じて、フットプリントと称される地表に照射された 1 発のレーザ光が描く円形または楕円形の測定範囲が変わるため、測量精度も法面全体で均一ではない。そこで、法面上での測量精度がどのようなようになるのかを、俯角をパラメータにして、天端を走行する MMS による測量結果を用いて検証した。ここでは、河川堤防法面上に円状の検証点を設置し、その中心の位置座標を 4 級基準点測量相当のネットワーク型 RTK 単点観測 (VRS-GNSS 測量) 法により測量する。それを真値とみなして、MMS による座標値との差の絶対値を較差として測量精度を表す。



図 4.1-2 計測位置画像 (河口方向)



図 4.1-3 計測位置画像 (8K ポストとターゲット)

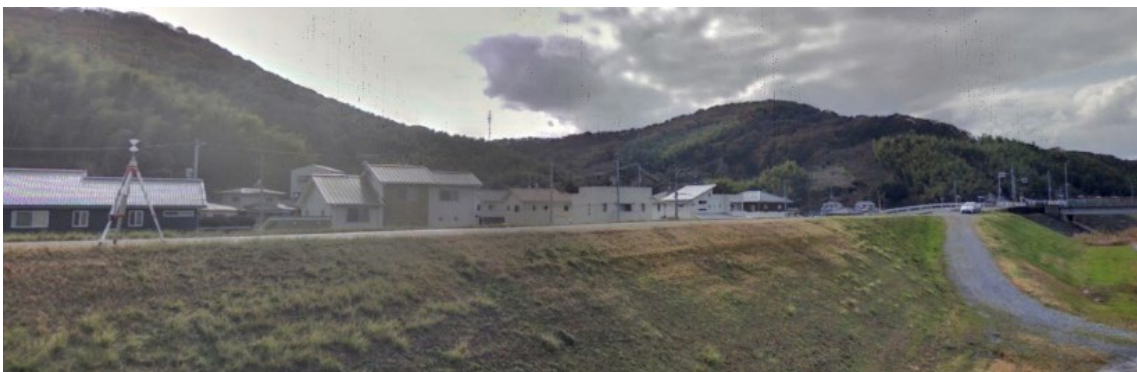


図 4.1-4 計測位置画像 (上流方向)

図 4.1-4 は、水平 2 方向の座標値の較差の平均値、さらに図 4.1-5 は鉛直方向の座標値の較差である。図より、水平方向と鉛直方向ともに、俯角が小さくなると較差が大きくなる。また車両走行速度が大きくなると、俯角が大きくても較差が極端に大きくなる場合が現れた。これは第 5 図で見たように、車両速度と共にレーザ点群密度が少なくなり、標定点の中心座標を正確に認識できるレーザ点数が確保されなかったことによる。俯角の大きさを確保するために、3.5m の高所にレーザスキャナを設置して MMS 測量を実施する手法も前出の通り紹介したが、標準的な堤防が 2 割勾配で形成されていることを考慮すると、天端の走行時での法尻に対する俯角は 40°以下になる。本実験結果を考慮すると、実施事例がある 3.5m の高さからのレーザ照射によっても、法尻まで均一なレーザ点群密度による高精度の測量は困難であると考えられる<sup>2)</sup>。

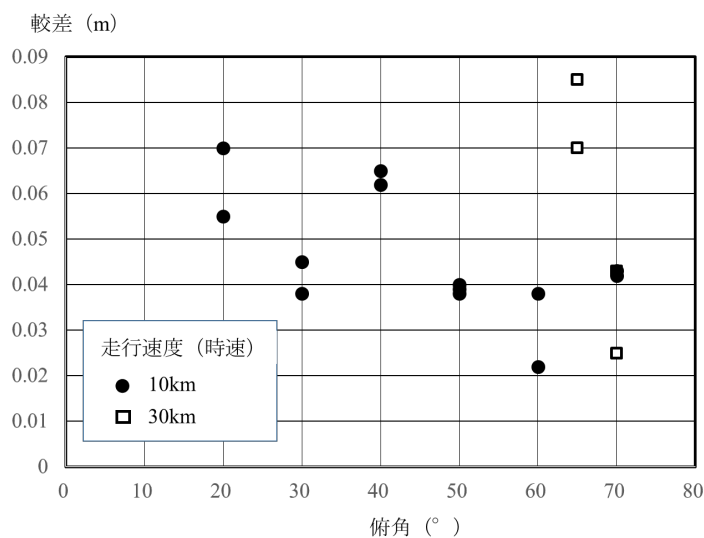


図 4.1-4 俯角と測量精度の関係（水平方向）

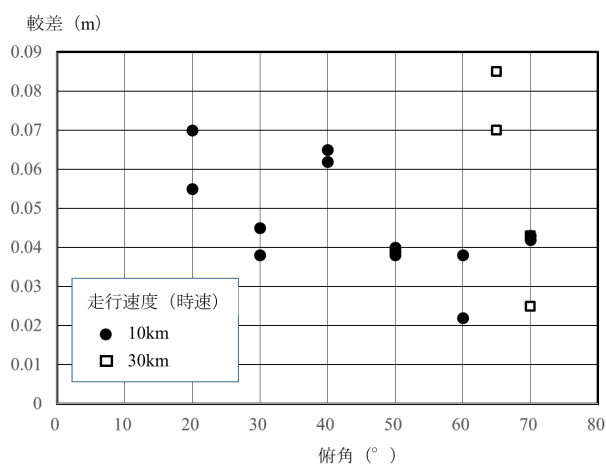


図 4.1-5 俯角と測量精度の関係（鉛直方向）

また実際の河川堤防では、法面上の植生や小段といったレーザ光の障害物が存在することにより、堤防法面全体で均一なレーザ点群を取得することが困難となる。そこで法面に約6.0mの高さの植生が繁茂している2割勾配の堤防において、天端からレーザ照射する場合、このレーザの照射高さによって法面上のレーザ点群密度がどのように変わるのかを検証した。図4.1-6に現場の状況を示す。図4.1-7には、車両上の位置、地上および3.5mの高度から照射したレーザ測量の点群から作成した堤防の断面図である。



図 4.1-6 堤防法面における植生の繁茂状況

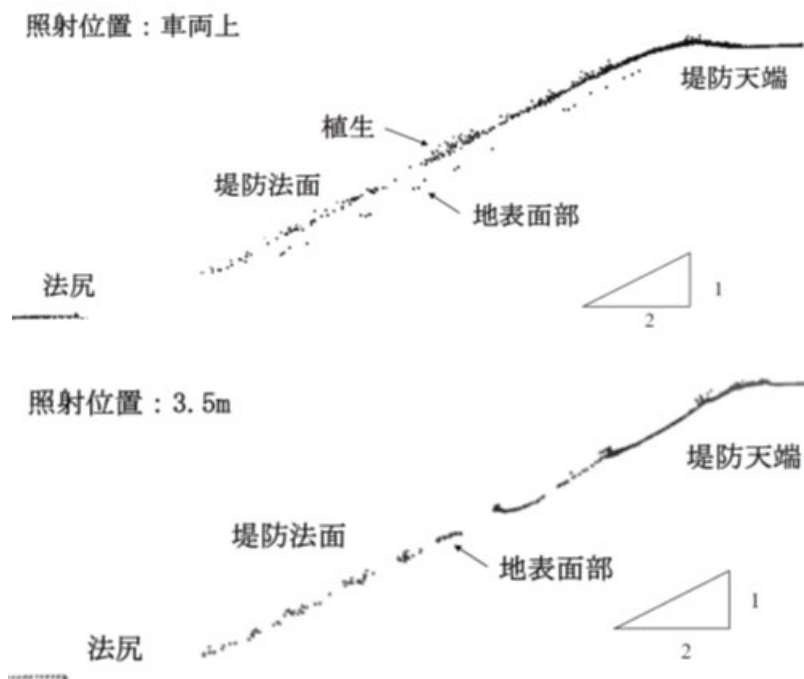


図 4.1-7 レーザ照射位置を変えた場合の法面断面上の点群分布

図より、車両上からのレーザ照射の場合は、植生を透過するレーザ点群が少なくなり、法面での地表面上のレーザ点群密度が少なくなることが分かる。また 3.5m の位置からのレーザ照射では、植生間を透過して地表面に到達する点群は多くなるものの、法面上で欠損する箇所が多く観察される結果となった。このように、法尻付近を含めて、いずれも法面全体の状態を把握することができない結果となった。これらを基に、本研究において、あらためて堤防全体を 3 次元測量できる手法を考える<sup>3)</sup>。

#### 4.2 MMSの課題の解決策

前節で、車両走行による測量の課題を考察した。本研究では、その課題を解決するための手法として、図 4.2-1 に示すような、地上から 5.5m の高所に、照射距離約 190m、パルスレート 1000kHz のレーザスキャナを設置した測量システムを用い、その有用性を検証することを試みた。なお車両走行型測量手法の利便性を確保、レーザスキャナは車両に搭載し、車両走行にて移動する。前節で議論したように、測量精度に車両の走行速度の影響が現れるので、パルスレートの大きなスキャナを使用し、測量は車両が停止した状態で実施した。

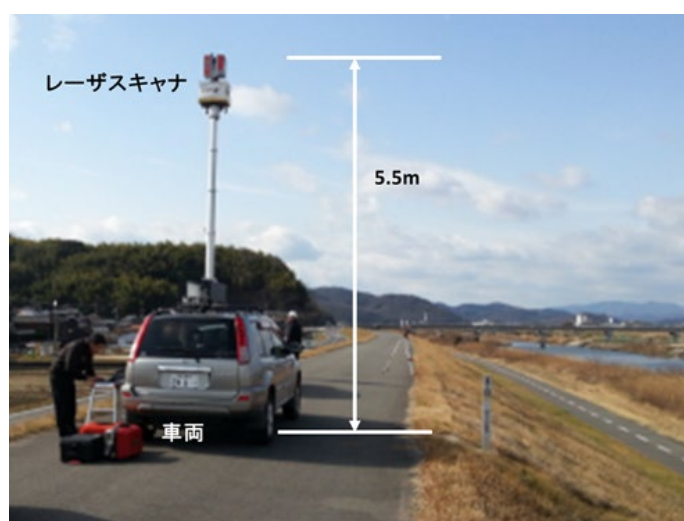


図 4.2-1 5.5m からのレーザ照射システム

前節の実験と同じ堤防において、図 4.2-1 に示す 5.5m の高度から照射したレーザ測量の点群から作成した堤防の断面図が、図 4.2-2 である。図 4.1-7 に示された堤防の断面図と比較すると、高さが 5.5m の位置からの照射では、植生間を透過して地表面から反射されるレーザ点群の密度が高くなり、高所からのレーザ照射の利点が現れる。このレーザ点群密度を詳細に調べた結果が図 4.2-3 である。レーザ照射位置でのレーザ点群密度を「直下」と表現した。図に示すように、レーザ点群密度は照射距離と共に大きく減少するが、法尻でも 1m<sup>2</sup> 当たり約 1000 点以上のレーザ点群密度を得ることができる。すなわち、高所からのレーザ照射により堤防全体の形状を高精度に再現することが可能である。次に表 4.2-1 に、各法面

上での測量精度を示す。精度は図 4.1-4 および図 4.1-5 で示したものと同一方法で求めた較差で表現した。5.5m からの高所からのレーザ照射により、直下の法面全体が $\pm 20$  mm以下、さらに半径約 40m 範囲内で $\pm 50$  mm以下の精度での測量が可能となった。天端からの照射距離が 40m の位置に設置した場合の標定点の較差は $\pm 20$ mm 以内であったことを考えると、遠距離の法尻部では俯角の影響が現れていると考える<sup>4)</sup>。

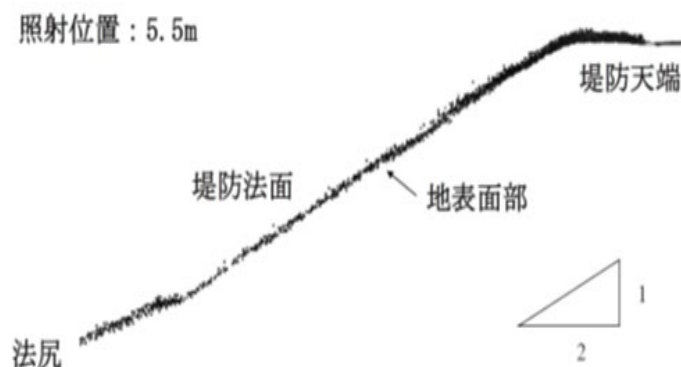


図 4.2-2 5.5m からのレーザ照射による堤防断面図

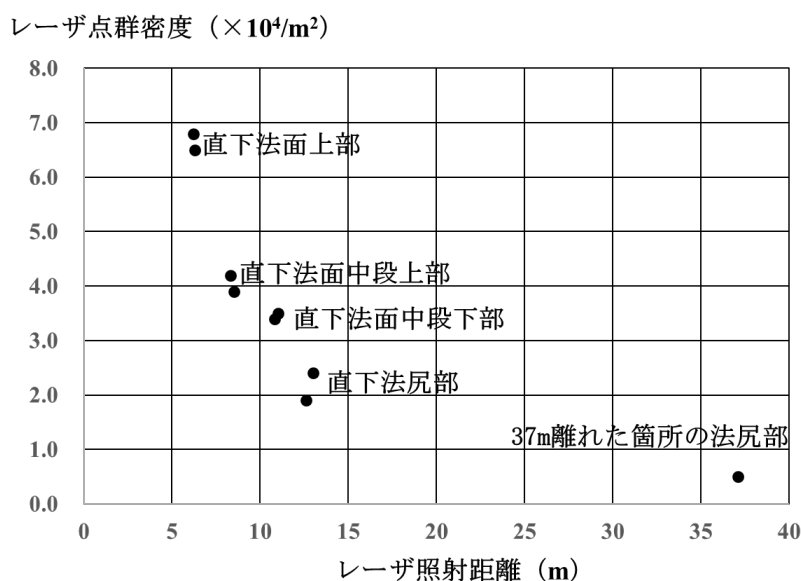


図 4.2-3 5.5m からのレーザ照射による点群密度

高さが 4.1m を超える車両は、道路構造の保全および交通の危険の防止上支障がないと認めて指定した道路でも、車両で通行することは困難である。そこで実際の測量時は、車両が静止した状態で高所からのレーザ照射を繰り返しながら移動する。また前節にて示したように、車両で移動しながら測量する手法は、車両速度の影響を受けるので、車両が静止した状態で測量することは、堤防全体を安定した精度で測量できる利点もある。本手法では高所

からのレーザ照射により、より広範囲での測量が可能になるので、静止した状態の測量を移動しながら繰り返す作業を実施しても、機器の据替作業を繰り返す測量作業の効率化を図ることが可能となる。航空レーザ測量の精度は、航空機の飛行高度を確保する必要があるので、鉛直方向にて約±150mm程度、さらに水平方向はそれより劣る。本手法のように、高所からレーザを照射する地上測量により、植生が繁茂している堤防でも、航空レーザ測量と比べて、高精度にて堤防全体の形状把握が可能になる<sup>5)</sup>。

表 4.2-1 5.5m からのレーザ照射の測量精度

場所	較差(mm)
直下法面上部	10.9
直下法面中段下部	13.6
直下法面中段上部	12.9
法尻	11.0
37m 離れた箇所 の法尻部	42.0

次に、車載型のリフトアップ式 3D レーザスキャナを用いて河川堤防の計測を行い、取得した点群データの精度検証を行うことで、本計測機器の河川堤防の変状を検知することの適応性を検討する。これには、堤防法尻と天端にて計測を行ったデータを用いて断面形状を確認し、さらに断面における精度を検証することで、計測機器の有効性を確認する。

#### 4.3 提案手法による変状検知の有用性の検討と考察

本節では、5.5m からの高所からのレーザ照射によって、堤防の地形を測量した結果を述べる。現場は前節と同じく岡山市内を流れる 1 級河川旭川水系百聞川における 8kp 付近である。定期点検によって、あらかじめ変状が目視によって確認されていた箇所に対して、本提案手法による測量を適用し、本手法の有用性を検討した。図 4.3-1 は取得された河川堤防の点群データであり、図中の赤丸は計測位置を示す。また図 4.3-2 は、点群データにより堤防の法面を再現したものである。カラー化はデジタルカメラの情報を用いて行った。結果から、法面全体が可視化されていることが分かる。

本節では、航空レーザ測量などで活用されてきた可視化技術を応用することで、変状発生個所の抽出を容易にすることを試みた。具体的には、地形の傾斜の変化を明瞭に表現する傾斜量図と標高分布に彩色を施した高度段彩図を透過合成し、堤防の形状を可視化する手法を導入した。これは不透明度を 100%に調整した傾斜量図の上に、カラー表示した高度段彩図の不透明度を 50%に減じて重ね合わせて地形を表現する。傾斜量図のみでは尾根部や谷部の逆転が生じることもあるが、この手法ではそれが生じることもない。さらに地形に関して重要な情報となる「標高」と「傾斜」を組み合わせることによって、地形判読において着目する高低差を直感的に把握することができる。図 4.3-3 は、本手法による 1000 点/m<sup>2</sup>以

上という高密度レーザ点群を活かし、1.0m 間隔の標高を彩色した高度断彩図と傾斜量図を透過合成したものであり、さらに図中に等高線を描いて地形を詳細に可視化したものである。実線で囲んだ部分に等高線の変化が見られており、変状発生箇所と認識することができる。このような法面の変状はガリ浸食痕の恐れがあり、雨水によって浸食は助長されるので、その変化を監視していく必要がある。この変状に対しては、本手法に示す可視化手法を用いて、当箇所の浸食の大きさの変化を容易に行うことができるので、変状発生箇所の定量化までを迅速かつ簡便に行うという高密度 3 次元レーザ点群の特性を活用した堤防点検作業の実用化を図ることができる<sup>6)</sup>。



図 4.3-1 点群データ（計測位置:天端）



図 4.3-2 点群データで表現された法面の概観

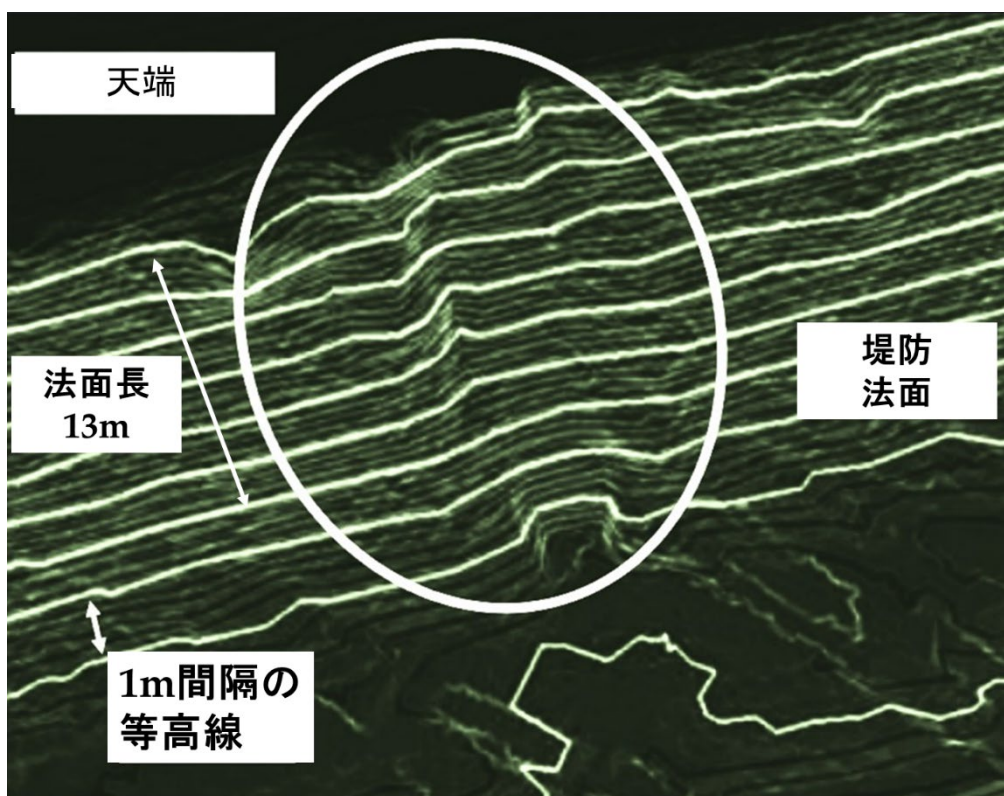


図 4.3-3 レーザ点群の可視化例

実際の現位置での調査結果を図 4.3-4 に示す。この調査により、約 50mm の起伏が検出されており、MMS 測量によって可視化されたものと同じ結果を得た。堤防法面は、植生によって被覆されていることで耐侵食の機能を果たすため、植生のない裸地の存在は、その機能を失わせることになる。すなわち法面の一部にでも植生が少ない箇所や凹地があれば、そこが弱点となって洗掘が進行する。この植生の効果に関しては、越流が発生したにもかかわらず、裏法面上の植生により破堤を免れた事例も報告されている。また、越流水が堤防を破壊するせん断力は、ほぼ越流水深に比例するので、堤防に不陸があれば、その深さだけ大きくなる。例えば 100mm の越水に対して同じ深さの不陸があれば、その区間の越水深は 2 倍の 200mm という大きな越水深となる。数 10mm の不陸であれば問題になることは少ないが、それが拡大して 100mm 以上の不陸になると越流水の集中を招き、破堤の危険性が大きくなる。そのため、法崩れだけでなく、植生の少ない箇所や凹地や不陸の進行度合いを把握することが重要となる<sup>7)</sup>。これまでは広範囲を面的かつ高精度に測量できなかつたため、この不陸等の進行具合の定量化も困難であったが、本手法は法面全体を広範囲にわたって±40mm の高精度で測量できるので、微小な変状の定量化も可能になり、要監視箇所あるいは要対策箇所の絞り込みが容易になる。このように、これまで見逃すことが多かった変状に対し、高密度レーザ点群による堤防全体の高精度測量が実施できることは、MMS が有していた課題の解決に寄与できると考える<sup>8)</sup>。

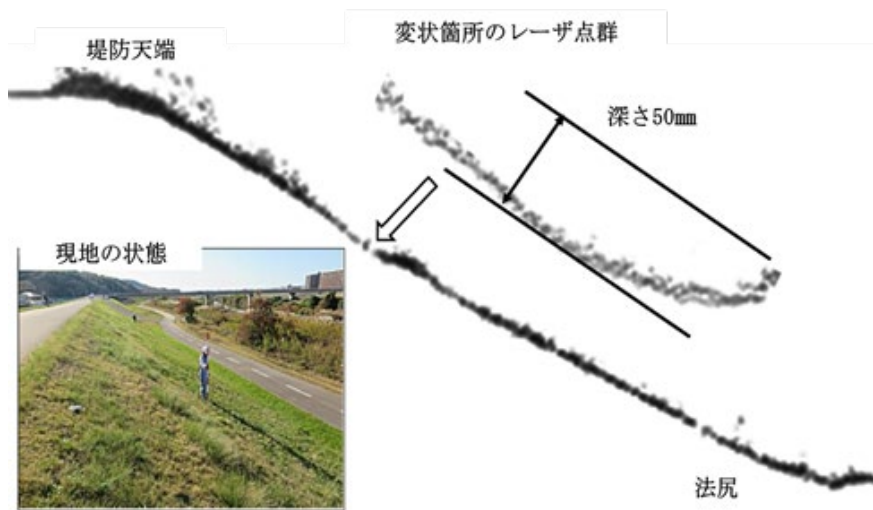


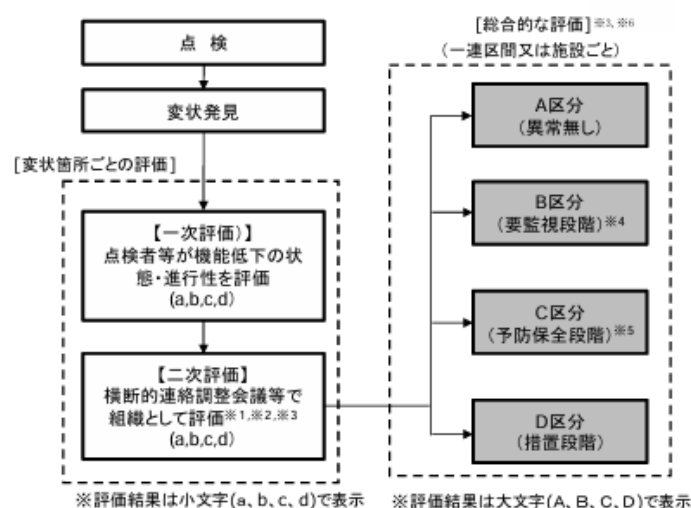
図 4.3-4 法面の変状の定量化の事例

#### 4.4 第4章のまとめ

本章では、河川堤防の点検に3次元データを活用するための手法として、これまで検討されてきた車両走行型レーザ測定の課題を考察し、その課題を解決する手法についての研究成果をまとめた。具体的には、縦断測定の代替手法としての活用が検討されている既往の車両走行型のレーザ測量技術（MMS）は、法面の勾配によって生まれる死角だけでなく、堤防上の植生の影響により、レーザ欠損箇所が発生し、結果として法面全体の健全性を評価することが困難であることを示した。さらに本研究では、それをレーザ測量時の俯角や車両走行速度と関連させて議論し、法尻までのデータ取得が可能なレーザ測量照射位置を考察した結果として、5.5mの高所からレーザ照射する手法が有用となることを検証した。一連の研究により、これまでの車両走行によるレーザ測量と比較して、本研究による車両に搭載した高所からのレーザスキャナによる測量は、移動体による作業としての効率性を保ちながら、法面全体の変状の検出が可能であることを示した。近年の気候変動に伴って多発する豪雨により、堤防決壊などの外水氾濫による甚大な被害も増加する傾向にある。いっぽうで、河川管理に要する財政が厳しくなっている現状を鑑みると、従来の河川管理手法をより一層効率化することが求められている。堤防の3次元データを活用する手法には、本研究で議論した車両走行型の他に、航空レーザ測量あるいはUAVによるレーザ測量の活用が試みられている。コスト、測量精度および作業の簡便性などを考え、各手法の特性を使い分けながら、それぞれの利点を活かした測量を河川管理に活用することが検討されていくと考える。その中で、本研究成果は、地上型レーザ測量作業を効率化する手法として、航空レーザ測量よりも低コストでUAVを用いる手法より簡便な作業である利点を活かし、目視で確認する堤防点検作業を補完するものとしての実用化が期待できる。

堤防は不可視部分が多く、また堤体や基礎地盤等と一体で機能を発揮するため、目視点検

で機能の状態を評価することは容易ではないことは知られていた。しかしながら、これまでには目に見える形で施設の機能に影響を与える可能性のある「変状」のみに着目し、変状箇所ごとに健全性の評価を実施していた。本研究で開発した手法を用いることで、図 4.3-5 に示す「堤防等河川管理施設及び河道の点検・評価要領（令和 5 年国土交通省）」<sup>9)</sup>（以下、要領）が提唱する「予防保全」型の維持管理が可能になると考える。予防保全とは、堤防が致命的な損傷を受ける前または機能に支障が出る前の軽微な損傷段階に点検・修繕を行い、長寿命化を図る維持管理手法であり、従来の「壊れてから直す（事後保全）」方式から転換することで、特に進行性の損傷による被害拡大を未然に防ぐことにより、結果として維持管理に要するトータルコストの削減を図りながらも、確実なインフラ構造物の機能を保つことを目的とするものである<sup>10)</sup>。



- ※1. 既往資料等(治水地形分類図、災害履歴、地質情報 築堤履歴、定期横断測量図、浸透流解析結果、設計資料等)を踏まえる
- ※2. 不可視、発生原因が不明な変状については、必要に応じて、詳細点検(調査を含む)を実施し、その点検結果を踏まえる
- ※3. 必要に応じて、学識経験者、専門家等の助言を受ける
- ※4. 軽微な補修を必要とする変状を含む
- ※5. 必要に応じて、詳細点検(調査を含む)を実施
- ※6. 本フロー図は、河道の点検評価は対象としていない。

図 4.3-5 予防保全型の維持管理手法の概念<sup>9)</sup>

要領に示される図 4.3-5 において、「一次評価は目視点検の場合において、点検者等が機能低下の状態や進行性を評価する。」とあり、点検作業も出水期前、台風期及び出水後等の時期に、堤防等河川管理施設及び河道の変状変化を発見・観察するために行う目視を主体とした点検（簡易な計測、触診・打音検査等を含む）に適用すると示されてきた。さらに、この図 4.3-5 に示す点検作業のフローに基づき、表 4.3-1 に示す変状箇所ごとの点検結果評価区分による健全性の判断が求められる。具体的には、次のような変状箇所ごとの点検結果評価

区分となる。

- ・評価区分は「異状なし」「要監視段階」「予防保全段階」及び「措置段階」の4段階となる。
- ・「要監視段階」では、必要に応じて軽微な変状は補修を実施する。「予防保全段階」では、変状の進行状況、損傷規模・経済性等を総合的に判断し、適切な対策を計画的に実施する。
- ・「措置段階」では、評価結果から堤防等河川管理施設の機能に支障が生じていると判断される場合であるため、速やかに補修等の対策を実施するものとするが、次期出水期までに補修等の対策が間に合わないなどの場合には応急的な対策を実施する。

しかしながら、目視点検を主体とした点検作業では変状の定量的評価が困難であり、さらに序論で議論したように、地球規模の環境変化による降水量の変化に対応した維持管理を考えると、面的で詳細な点検作業が要求される。その一方で、前章で議論したように、技術者不足の深刻化にも対応した点検作業が必要であり、本研究にて開発した ICT 機器を使った効率的な点検作業を導入の検討が必須になる。これらの背景を考慮すれば、車両で移動しながら高密度の点群を取得する MMS を、堤防全体をモニタリングする技術に高度化する本研究成果は今後の堤防点検に大きく貢献することが期待される<sup>11)</sup>。これまでの目視点検と技術者の経験に頼る巡視・点検作業ではなく、本研究の図 4.3-3 および図 4.3-4 に示したような、甚大な損傷が発生する前の微細な変状を定量的に検知する技術により、図 4.3-6 に示す予防保全型の維持管理に対応する評価項目の導入が可能になると考える。

表 4.3-1 変状箇所ごとの点検結果評価区分<sup>9)</sup>

区分		状態	変状確認	機能支障
a	異状なし	・ 目視できる変状がない、または目視できる軽微な変状が確認されるが、堤防等河川管理施設の機能に支障が生じていない健全な状態	なし	なし
b	要監視段階	・ 堤防等河川管理施設の機能に支障が生じていないが、進行する可能性のある変状が確認され、経過を監視する必要がある状態（軽微な補修を必要とする場合を含む）	あり	なし
c	予防保全段階	・ 堤防等河川管理施設の機能に支障が生じていないが、進行性があり予防保全の観点から、対策を実施することが望ましい状態 ・ 詳細点検（調査を含む）によって、堤防等河川管理施設の機能低下状態を再評価する必要がある状態	あり	なし
d	措置段階	・ 堤防等河川管理施設の機能に支障が生じており、補修又は更新等の対策が必要な状態 ・ 詳細点検（調査を含む）によって機能に支障が生じていると判断され、対策が必要な状態	あり	あり

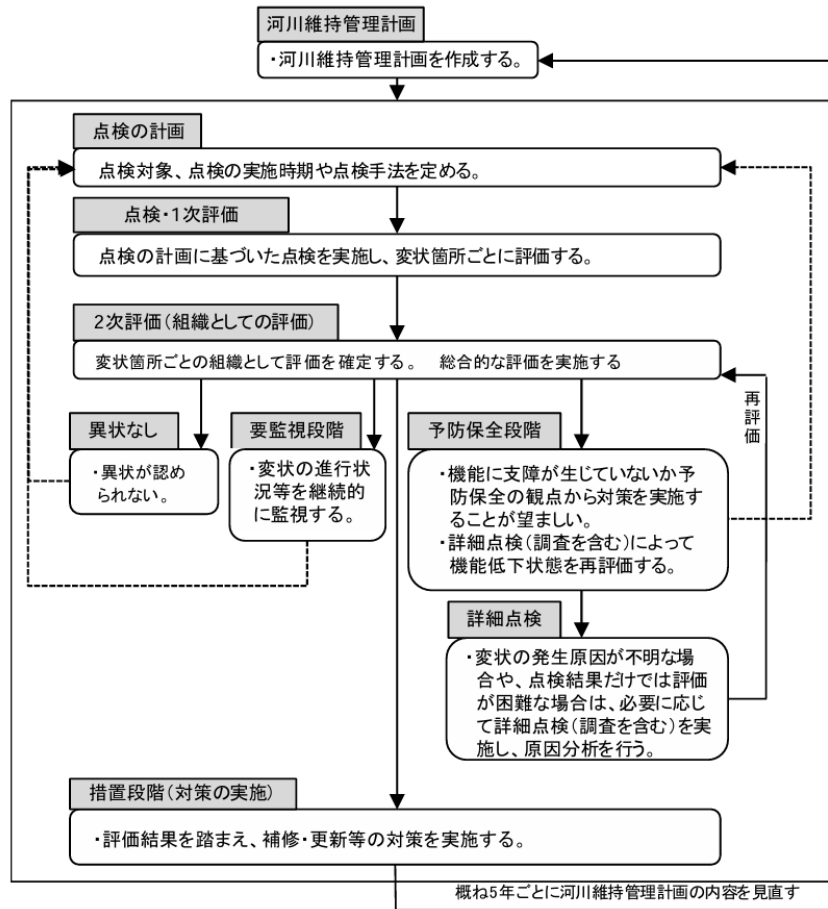


図 4.3-6 今後必要となる堤防等河川管理施設及び河道の点検・評価フローの概念<sup>8)</sup>

## 第5章 共助・自助における課題の解決策

本章では地域防災計画の中の「災害応急対策」における課題解決策についての考察結果を述べる。具体的には、災害関連死を防ぐために、商業施設（以下、SC）を指定避難場所の役割を担う一時避難所として利用することを検討するものである。SCの空間を地域住民の一時避難所として利用することは、SCの経営の観点からも顧客へのイメージ向上を図ることができるので有意義と考えられるが、どの程度有用になるのかの定量的な評価は十分に検討されておらず、またその評価手法も確立されていない。本研究では、自治体が提供するオープンデータをGISにて解析することにより、SCを一時避難所として利用する有用性を定量的に解析する手法を考察し、その結果から、あらためてSCを一時避難場所として利用することの効果を評価する。

### 5.1 従来の研究の整理

#### (1) 水害時における公共指定機関の浸水リスクに関する研究

指定公共機関に指定されている日本郵便株式会社が運営する郵便局を対象に浸水リスクに関する基礎的な評価が行われている<sup>1)</sup>。全1,158拠点を対象に洪水浸水想定区域（想定最大規模）を重ね統合し、浸水区域内にある郵便局のある割合を都道府県別に示した。全1,158拠点での平均は、49.0%に浸水リスクがあるという結果であった。災害発生時に防災拠点として稼働すべきである公共指定機関の中でも約半数が機能できない可能性があることから、拠点の再配置の必要性を示唆している。この研究では、GISを用いた浸水リスクの評価法が示されており、本研究もそれに倣い、一時滞在施設として利用できる可能性のあるSCについて浸水リスクを評価する。

#### (2) 避難所の収容力に関する研究

首都圏大規模水害時において、江東デルタ地帯を舞台に洪水氾濫シミュレーション・人口分布・建物分布のGISデータを用いて、避難所の収容力について研究している<sup>2)</sup>。水害時避難場所を母点としたボロノイ分割によって、各避難所に避難してくると予想される要避難者数を集計し、建物面積から求められる収容人数との比較によって、指定水害時避難場所のみへの避難とその他の公共施設も活用した場合、さらに民間の事業所・集合住宅も活用した場合の3パターンで収容力の分析が行われている。その結果、域内避難では、自治体が指定する水害時指定避難場所のみを避難先とした場合、荒川沿いで、収容可能人数を超えた要避難者が集まることを示している。その他の公共施設や民間施設を活用することで要避難者の収容力を高めることは可能であるが、民間施設の立地特性から、地域によっては、民間建物の利用だけでは、不十分であり、避難先の新設や広域避難が必要と示している。本研究では、この手法を参考にし、避難場所の充足率を評価することで、帰宅困難者の受け入れに関する課題を明らかにすることを試みる<sup>3)</sup>。

### (3) 災害時の官民連携に関する研究

阪神・淡路大震災や平成 12 年東海豪雨で指定避難所以外の民間施設が利用されていたことを受け、官民連携の必要性についての報告がある<sup>3)</sup>。また、官民連携による災害時拠点施設に求められる機能として、情報伝達能力、収容能力、衛生的であること、物資が十分にあり集配できること、万が一停電などライフラインに支障があってもすぐに復旧できることなどを挙げている。条件を満たしている施設の数が少ないことや実際に利用した際の運営方針や、費用負担の面で課題があると述べている<sup>4)</sup>。

### (4) 商業業務集積地区における一時滞在施設利用に関する研究

みなとみらい 21 地区に存在する主要施設に対し、施設概要や防災対策、帰宅困難者受け入れの準備の有無など防災に関するアンケート調査が実施されている。また、その中で、帰宅困難者一時滞在施設として横浜市と協定を締結している施設にヒアリング調査を行い、みなとみらい 21 地区における帰宅困難者受け入れに対する実態を調査した。その結果から、一時滞在施設としての利用可能性を考える際の課題について述べている。その課題に対して、エリア内の施設連携により、一時滞在空間所創出が期待できる可能性を示唆している<sup>5)</sup>。

これらの先行研究を踏まえて、本研究では現在の避難所運営における帰宅困難者や災害関連死などの問題点の解決に向け、新しい避難の在り方について考えるものである。具体的には、一時滞在場所としての SC の有効性を明らかにすることで、企業の災害時協力を促し、避難場所の拡大を目指す。

## 5.2 SC所在地の被災リスクに関する検証

災害時において、避難所が不足する前例は多く挙げられる。帰宅困難者が一斉に避難所へ向かい、受け入れ可能人数を超えた人々が避難所に集中することで、帰宅困難者を受け入れる新たな一時滞在施設の確保が必要である。その候補の一つとして、SC を活用することが考えられる。SC は、一般に広大なスペースを持ち、飲食店やトイレなど生活に必要な空間、空調設備が整っているため、避難所よりも快適な環境を提供できる可能性が高い。現在、商業施設を運営する企業の指定公共機関の指定は限定的だが、災害時における一時滞在施設として地域防災や共助などの社会的役割を有しており、今後の指定拡大が期待される。前章の既存研究(1)にもあるように、公共指定機関としての役割を果たすためには、施設が対象災害の直接被害を受けないことが必要不可欠である。そのため、本検証では、SC の立地に着目して浸水リスクの評価を行う。

SC は日本ショッピングセンター協会（以下、SC 協会）により定義されている。なお物販テナントの退店後に飲食テナントやオフィスなどが入居し、物販面積 1,500m<sup>2</sup> を満たさない場合、あるいは新規開業する 10,000m<sup>2</sup> 未満の小型の商業施設が増加傾向にあることから 2025 年に定義が改訂されているが、避難所への適用性を考慮し改定前の基準を対象にする<sup>6)</sup>。

1. SCは、ディベロッパーにより計画、開発されるものであり、次の条件を備えることを必要とする。
2. 小売業の店舗面積は、1500m<sup>2</sup>以上であること
3. キーテナントを除くテナントが10店舗以上含まれていること
4. キーテナントがある場合、その面積がショッピングセンター面積の80%を超えないこと。但し、その他のテナントのうち小売業の店舗面積が1,500m<sup>2</sup>以上である場合にはこの限りではない。
5. テナント会（商店会）等があり、広告宣伝、共同催事等の共同活動を行っていること。  
本検証ではこの旧取扱い基準を満たすSCを対象として次の手順で検証する。
  - ① 背景地図には、国土地理院が提供する地理院タイルの標準地図を使用した<sup>7)</sup>。
  - ② SC協会が提供する全国SCの所在地データに東京大学空間情報科学研究センターが提供している「CSVアドレスマッチングサービス」を利用して、住所から経度・緯度を取得した<sup>8)</sup>。取得した経度・緯度を用いて、GIS上に全国SCの所在地を投影した。地方ごとにプロジェクトを作成し、投影座標系は、各地方の大部分を占める座標系で統一した。アドレスマッチング後、変換の信頼度を表すiCof値および変換された住所のレベルを表すiLvl値が不足している施設に関しては、Googleマップで、位置情報を確認し、GIS上でジオメトリを編集することにより、正確な位置情報を入手した。
  - ③ 国土交通省が提供する洪水浸水想定区域データ（河川単位）を利用して、想定最大規模降雨における浸水想定区域を投影した<sup>9)</sup>。その際、国管理河川と都道府県管理河川のデータを事前に結合しておくことで作業の効率化を図った。
  - ④ SC所在地データと洪水浸水想定区域データ（河川単位）をGISの機能を使い、重ね合わせ抽出し、洪水浸水区域に所在するSCをまとめた。
  - ⑤ 内閣府より、避難判断の基準として、避難指示が発令された時でも、建物倒壊の危険がなく浸水深より高い位置に避難が可能な場合は、命の安全は確保でき、屋内避難も可能とされている。そのため、浸水深が2階の床下より低いと仮定できる浸水深3.0m未満、すなわち浸水深ランク「2」以下は、垂直避難が可能とし、浸水深ランク「3」以上の浸水区域に所在するSCを抽出し、まとめた。浸水深ランクコードについては、表5.2-1にまとめる<sup>10)</sup>。

表 5.2-1 浸水深ランクコード

コード	浸水深
1	0m以上0.5m未満
2	0.5m以上3.0m未満
3	3.0m以上5.0m未満
4	5.0m以上10.0m未満
5	10.0m以上20.0m未満
6	20.0m以上

表 5.2-2 使用したデータ

データ名	データ基準年	データ元
SC別基礎データ一覧	2023年	SC協会
洪水浸水想定区域データ (河川単位)	2024年	国土数値情報

本検証によって得られた全国 SC の浸水リスク曝露割合は次のとおりである。

表 5.2-3 全国の SC の浸水リスク曝露割合

浸水リスク		SC数	構成割合 (%)
有	浸水深3m以上	260	8.41
	3m未満	1161	37.55
	小計	1421	45.96
未検出		1671	54.04
計		3092	100.00

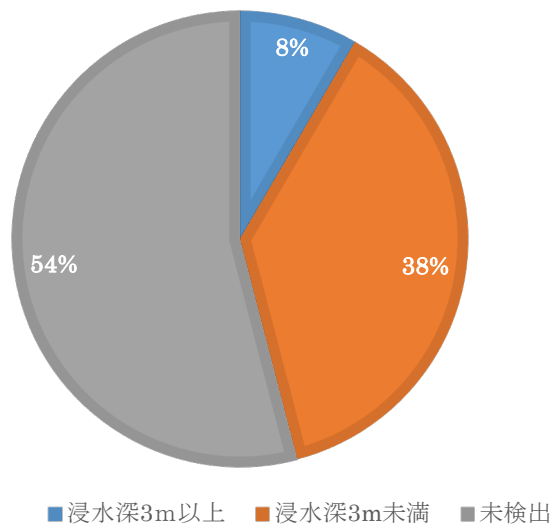


図 5.2-1 全国の SC の浸水リスク曝露割合

本分析により、全国の SC のうち、約 46%が想定最大規模の降雨における洪水の浸水リスクにさらされていることが明らかになった。特に、福井県においては、全 19 施設中 18 施設が浸水区域に所在し、SC の浸水リスクが最も高い地域であると確認された。郵便局を対象にした既存研究でも、同様に福井県で浸水のリスクが高く、福井県の地形的特徴によるものと考えられる。しかし、浸水深ランク「3」未満の SC を排除すれば、SC の浸水リスク曝露

割合は 8.41%まで低減することが確認できた。ここから、2 階建て以上の店舗であれば、一時滞在施設として有効に機能する可能性が示唆された。実際、SC は商業ビルや複合ビルの複数階建物である場合が多く水害時にも上層階を活用できることから、防災拠点として優位な性質を持っているといえる。ただし、本分析の結果は、所在地に基づく浸水リスクの評価であり、実際には、浸水リスクが「3」以上でも、浸水深より上層に避難できる可能性がある。一時滞在施設として利用可能な SC 数が増加する。しかし、浸水深ランク「3」未満に該当する場合でも一階建てや地下で構造された建物の場合、浸水リスクにさらされる恐れがある。このように、本分析手法では、SC の建物としての優位性は明確にできず、今後各 SC の建物構造データや主電源装置・防災センターの所在階データなどを合わせて用いることによって、建物としての優位性も示唆できると考える。

図 5.2-2 に都道府県別の SC の浸水リスク曝露割合を示す。



図 5.2-2 都道府県別 SC の浸水リスク曝露割合

この図を見ると、沿岸部に位置する都道府県で浸水リスクが高くなる傾向にあることが分かる。これは、沿岸部の都道府県では、河川の浸食堆積作用によって形成される土地に市街地が形成されることが多いことに起因すると考える。山から平野に出る河川によって運搬された土砂が堆積することによって形成される扇状地や三角州は、水はけのよい土地であることや、傾斜が緩やかまた平坦であるため、住宅地や商業地になっていることが多く、河川氾濫により浸水しやすい地域に SC が所在しやすいと考えられる。

次に実際に被害を受けた SC をもとに、本検証の有効性について評価する。平成 30 年西日本豪雨では、イオン九州が運営する福岡県小郡市のイオン小郡 SC が浸水し、全店舗が約

3 か月の休業を余儀なくされた。また、当該 SC は、平成 30 年西日本豪雨以降も梅雨期の大雨により 3 度の浸水被害が報告されている。しかし、本検証では、図 5-3 に示されるように浸水深ランク「2」に所在するとしていたが、実際の店舗範囲は浸水深ランク「3」の区域にも含まれていることが判明した。また、当店舗は、1 階建てであり、いずれにせよ一時滞在施設としての利用は不可能であるにもかかわらず、本検証では、垂直避難により、一時滞在施設として利用できる可能性があるという評価をした。このような事例を減らすためには、SC の所在地データを店舗の及ぶ範囲でとらえる必要があるため、ポイントデータからポリゴンデータに変換する作業が必要であると考え<sup>11)</sup>。

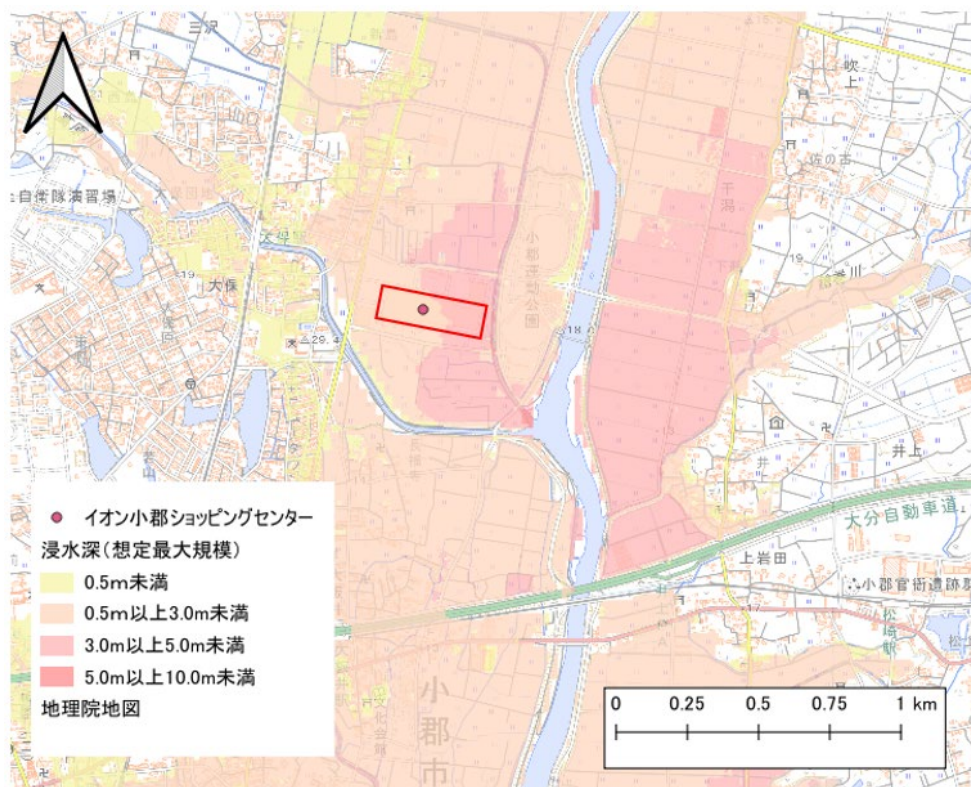


図 5.2-3 イオン小郡 SC の浸水深

### 5.3 SCの一時滞在場所としての有効性検証

本節では、大阪市北区に焦点を当て、災害時に発生すると予想される帰宅困難者数と指定避難場所の収容人数について充足率を可視化し、現指定避難場所の問題点を明らかにする。大阪府は、前述にもある通り、ゼロメートル地帯に位置しており、災害に対して脆弱であり、多くの人口を有していることから大規模災害の際に大量の帰宅困難者が発生すると予想される。大阪府によると、南海トラフ地震によって大阪市で発生するとされる帰宅困難者数は、約 90 万人と推定されている。その中でも、北区が、22.5 万人と約 1/4 を占めている<sup>12)</sup>。それに対して、大阪市では、令和 6 年 11 月 13 日時点で、宿泊施設は、33 施設、その他民間

施設は、35 施設が災害時における旅行者を含む帰宅困難者の受入れ等に関する協定を締結している。宿泊施設は、その施設に宿泊している宿泊客や多言語対応できる利点から、外国人の受け入れを想定している。商業施設は、その施設の利用者の保護や災害発生前に主として施設内のサービスを利用しようとしたものを保護することが目的としている。ここで、避難施設にかかわる用語について、表 5.3-1 にまとめる。

表 5.3-1 避難施設の用語

指定避難所	災害の状況が落ち着き次第、一定期間生活をするための施設
指定緊急避難場所 (一時避難場所)	災害発生時、命の安全を守るために避難する場所。避難場所によっては対象災害が定められている
津波避難ビル	津波や河川氾濫から身を守るため、浸水深より高い場所に避難するためのビル
一時滞在施設	帰宅困難者（主に観光客や外国人）を受け入れる施設

(1) 対象エリア

大阪市では、平成 25 年 8 月に、南海トラフの津波浸水想定結果を経て、17 区で津波による浸水の恐れがあり、東部の 5 区においても、河川氾濫時の浸水の危険があるとして、津波避難ビル、水害時避難ビルの確保を促進している。北区においては、現時点で津波避難ビルとして、公共施設 70 施設、民間施設 57 施設が指定されている<sup>13)</sup>。対象エリアを以下の図 5.3-1、図 5.3-2 に示す。拡大図において、位置関係を明確にするため、鉄道データを用いた。

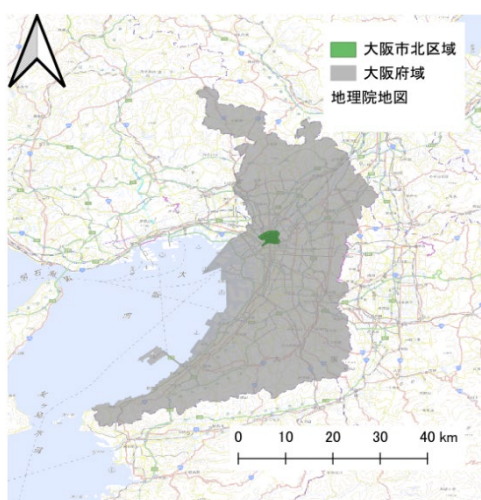


図 5.3-1 対象エリア広域図

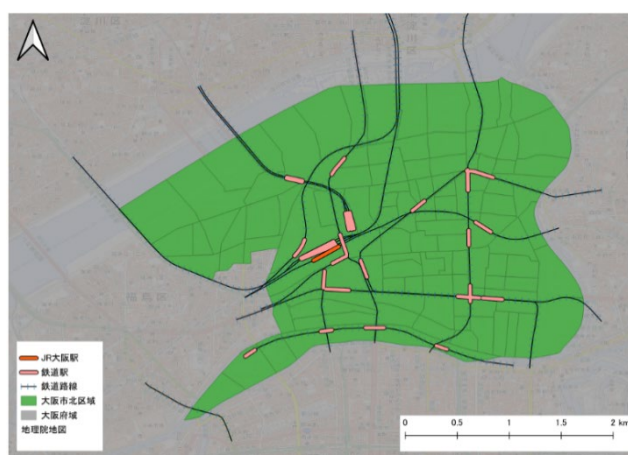


図 5.3-2 対象エリア拡大図

地震災害時の避難者数は、大阪市が公表している南海トラフ発生時の想定帰宅困難者数のデータと各町丁目の昼間人口の分布に基づいて、帰宅困難者数を割り当てた。各町丁目の昼間人口分布を図 5.3-3 に示す。

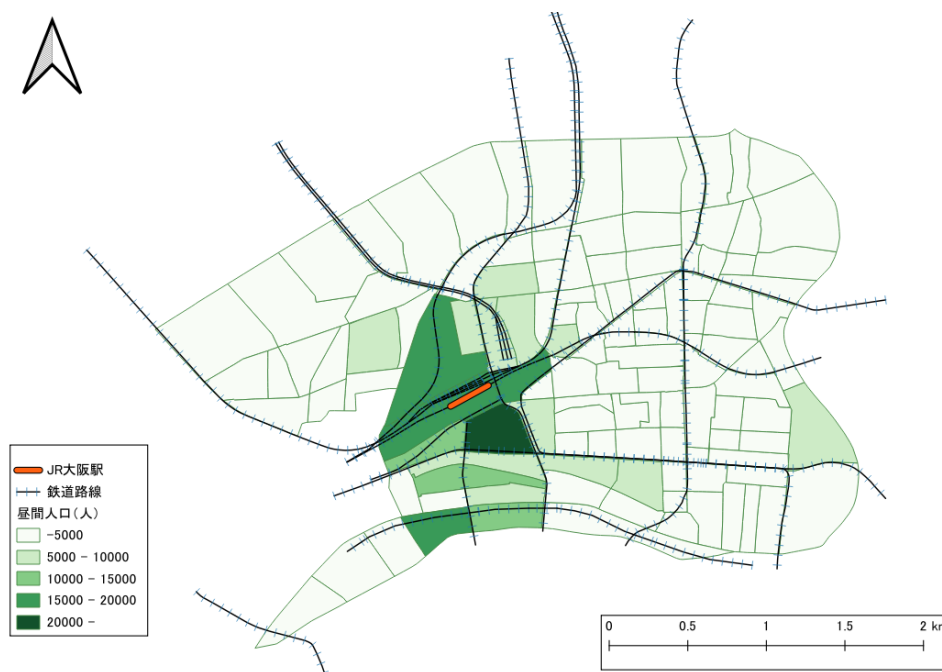


図 5.3-3 大阪市北区の昼間人口分布

水害時は、地震災害より被害の進行が比較的緩やかであり、公共交通機関の計画運行などの効果によって、昼間人口が平常時とは異なると予測される。そのため、本研究では、夜間人口に着目し、避難者数の推定を行う。要避難者は、浸水区域に居住する人口のうち 1, 2 階に住む住民を対象とした。想定最大規模降雨時における浸水が予測されている区域に居住する人口に国勢調査の「令和 2 年国勢調査 人口等集計」<sup>14)</sup>から得られる大阪市北区の 1, 2 階の住居に住む人口割合を乗ずることで、要避難者数を算出した。なお、この人口割合は、大阪市北区全体における割合であるため、町丁目別の特徴は反映されていないことに注意する。

表 5.3-2 大阪市北区の 1・2 階の居住割合  
(国勢調査の「令和 2 年国勢調査 人口等集計」から作成)<sup>14)</sup>

一般世帯人数 (人)						1・2階に 居住する 割合
住宅に住む一般世帯	一戸建て	長屋建て	共同住宅 (1・2 階建て)	世帯が住む階が1・2階	合計	
136761	13440	684	439	14621	29184	0.21

地震災害時における避難場所充足率の算出方法を以下に示す。

- ① 政府統計の総合窓口 e-Stat から入手した大阪市北区の境界データ（町丁・字等）に大阪市が公開している町丁目別の昼間人口データを統合し、昼間人口分布率から求められる町丁目毎の帰宅困難者数を「dayhinan」フィールドに算出した。その他、境界データには、町丁目別の夜間人口や面積、統合のためのコードが格納されている<sup>15)</sup>。
- ② 大阪市が提供している津波避難ビルおよび一時避難場所データに必要な応じてアドレスマッチングを行い、GIS 上に投影した。一時避難場所データに関しては、対象災害が定められていることに注意する。投影座標系は、JGD2000/EPGS2448 とした。以降の処理のために、2つの避難場所データを結合し、「津波時避難場所」とした。
- ③ ボロノイ分割処理によって各避難施設の勢力図を作成した。ボロノイ分割とは、隣り合う母点間を結ぶ直線に、垂直二等分線を引くことで、各母点の最近隣領域を分割する処理である。
- ④ ユニオン処理によって、③で作成したボロノイ勢力図を境界データで分割した<sup>16)</sup>。ユニオン処理とは、あるポリゴンの形状をポリゴンによって、切断する処理である。この処理によって出力されたジオメトリの面積を「unionAREA」とし、境界データに格納されている町丁目別の面積「AREA」との面積割合を各ジオメトリの「hinan」に乗ずることで、各ジオメトリに存在する按分避難者数を算出した<sup>17)</sup>。
- ⑤ 集計ツールを用いて、各避難場所のボロノイエリアに存在する避難推定者数を累計し、各避難場所の充足率を算出し、適切なシンボロジの設定により可視化した。ここにおいて、充足率は想定される避難者数に対する避難場所の収容可能人数の割合であり、以下式 5.3-1 から導くことができる<sup>18)</sup>。

$$\text{避難場所充足率(\%)} = \left( \frac{\text{収容可能人数}}{\text{想定される避難者数}} \right) \times 100 \quad (\text{式 5.3-1})$$

100%以上で避難場所における供給が必要数を満たしていることを表す。同様の手順で、地震災害時における避難場所充足率を求めた。水害時における避難場所充足率に関しては、上記の手順①の手順を一部変更する。洪水浸水想定区域データ（河川単位）に基づき浸水区域と予測されている区域を避難検討エリアとし、該当町丁目の夜間人口にあらかじめ用意した表 5.3-1 で求めた 1・2 階の居住割合を、境界データに格納されている夜間人口に乗ずることで、避難者数を求め、「nighthinan」フィールドを作成した。明確な一時滞在場所としての要件は、現在定められていないため、本検証では、津波避難ビルの指定条件を用いて対象の SC を決定する。大阪市によると、津波避難ビルの要件として、新耐震基準を満たしていること、鉄筋コンクリート造・鉄骨鉄筋コンクリート・鉄骨造（軽量鉄骨は除く）で、3階建て相当であることを必要としている。

収容人数については、防犯や運営面から判断して、SC 内で避難場所として利用できるのは、共用部分のみと考える。平均受け入れ目安である生活スペースについては、被災者が尊厳ある生活を送るために必要な最低限の条件を数値化した国際基準であるスフィア基準により、1人当たり最低 3.5 m<sup>2</sup>を確保することが求められている<sup>19)</sup>。また延床面積に対する売場面積の割合であるレントابل比を考慮して、各 SC の共用部分の面積を求めることにより収容人数を算出した<sup>20)</sup>。ここで、これまでの研究事例で分析された SC における全体共用部分についての結果を利用する。例えば韓国ソウル市の Times Square における面積構成を分析した事例では、SC は全体面積 63705m<sup>2</sup>の中で、専有部分が 32666m<sup>2</sup>であったとしている<sup>21)</sup>。この結果より、SC のレントابل比が、51%であると考え、避難場所として使える部分が、店舗面積の 49%として収容人数を推定する。なお、収容人数は、店舗面積だけに依存せず、従業員数に基づいても算定する必要があるなど施設によって収容人数の基準は異なるが、本研究では面積を基準として収容人数を算出することとする。図 5.3-4 に大阪市北区に所在する SC を示す。ここから、SC は主に昼間人口が多いエリアに集中して立地していることが分かる。これは、北区では SC が入居するビルにオフィスも入居し通勤者が多く集まっていることや、SC 自体が集客施設であるため、昼間人口の高いエリアに立地する傾向があると考えられる。一部離れている店舗は、UR 都市開発機構が運営する住居ビルに入居する SC であり、それを除いて考えれば、一般に商業ビルや複合ビルに入居する SC の多くは、昼間人口の多いエリアに所在すると言える。なお、所在 SC のうち、グランフロント大阪については、令和 6 年 10 月 31 日時点で、津波避難ビルに指定されており、指定避難場所として扱ったため対象 SC からは除外して考える<sup>22)</sup>。また、津波避難ビルの条件を満た



図 5.3-4 大阪市北区に所在する SC 及び対象 SC

さないSCは、一時滞在施設として不適であるとするため、対象SCからは除外する。そこで、竣工年や建物構造などは、各ビルの設計会社やSCのホームページなどから得た。条件を満たすSCについても次の図5.3-4に示す。大阪市北区に所在するSCは、23施設であるが、その中で一時滞在施設として適切と判断できるSCは、13施設であった。また、条件を満たしたSCについて、算出した収容人数とともに詳細を表5.3-3に、使用したデータを表5.3-4に示す。

表 5.3-3 対象SCの詳細情報

SC名	店舗面積 (m <sup>2</sup> )	収容人数 (人)	営業形態	竣工
ハービスPLAZA	14400	4276	複合ビル	1997年
HEP FIVE (ヘップファイブ)	21100	6266	商業ビル	1998年
ヨドバシカメラ マルチメディア梅田、LINKS UMEDA (リンクス梅田)	90747	26949	商業ビル	2019年
イーマ	7566	2247	商業ビル	2002年
ヒルトンプラザ ウェスト	7825	2324	オフィスビル	2004年
ハービスPLAZA ENT (ハービスプラザ エント)	20000	5939	商業ビル	2004年
ぷららてんま	6252	1857	住宅ビル	2005年
NU chayamachi (ヌー茶屋町)	11600	3445	商業ビル	2005年
ブリーゼブリーゼ	10000	2970	複合ビル	2008年
NU chayamachiプラス (ヌー茶屋町プラス)	3000	891	複合ビル	2011年
LUCUA (ルクア)	20000	5939	駅ビル	2011年
LUCUA 1100 (ルクアイーレ)	33000	9800	商業ビル	2015年
ヒルトンプラザ イースト	10789	3204	ホテル	1986年

表 5.3-4 使用したデータ

データ名	データ基準年	データ元
SC別基礎データ一覧	2023年	SC協会
一時避難場所	2024年	大阪市
津波避難ビル	2024年	大阪市
境界データ (町丁・字等)	2020年	国勢調査
昼間人口	2020年	大阪市
鉄道路線・駅	2023年	国土数値情報
河川	2009年	国土数値情報
津波浸水想定	2023年	国土数値情報
洪水浸水想定区域データ (河川単位)	2023年	国土数値情報

#### 5.4 検証結果と考察

本節では地震災害時における現在の指定避難場所の充足率の解析結果を図 5.4-1, 5.4-2 に示す。地震災害時では、津波被害がある場合、全体的に避難所の充足率が低下することが分かる。特に区域西側で充足率の低下が顕著である。これは、図 5.4-3 に示すように、津波浸水の影響で、指定避難場所が利用不可能となったためである。領域東側では、大きな変化は見られなかったが、津波の影響がないエリアで、充足率の変動がみられる。これは、小中学校において、指定避難場所には、校舎とは別に運動場が指定されている場合が多く、津波避難時では、校舎分のポロノジオメトリが欠損していることが確認された。そのため、充足率が低下したと考えられる。欠損した原因には、避難場所データ入力の際に、校舎と運動場を区別して、登録しなければならないが、運動場のみを登録してしまった可能性や校舎部分が同施設として扱われた可能性が考えられる。

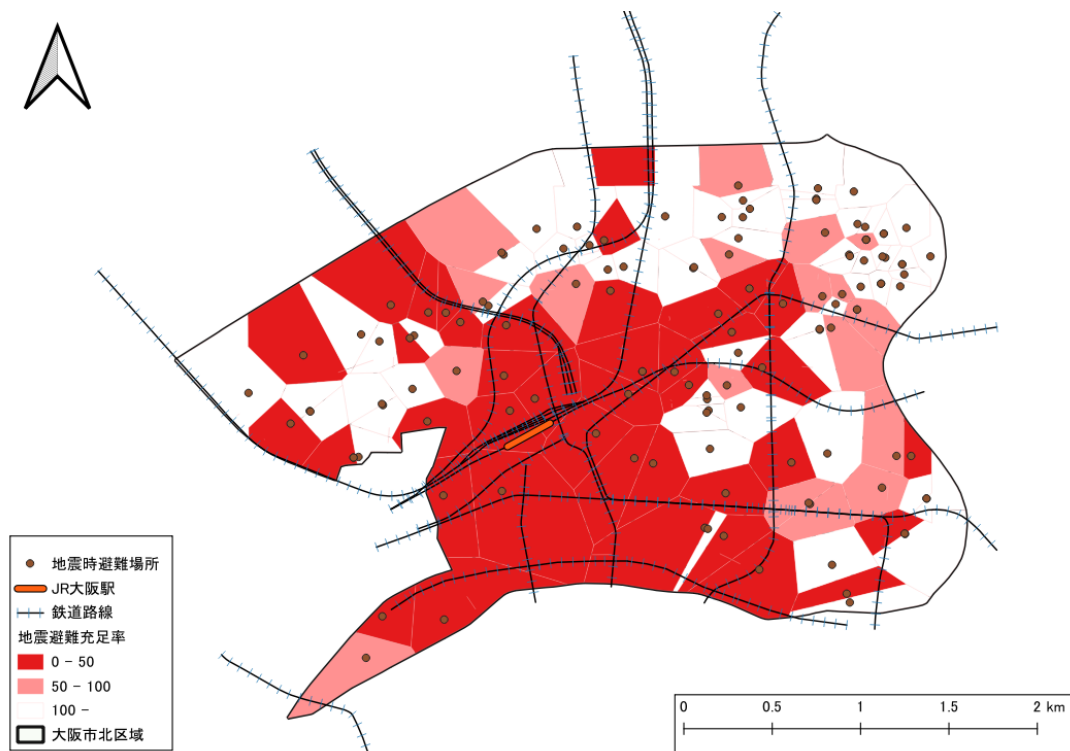


図 5.4-1 地震災害時における指定避難場所の充足率

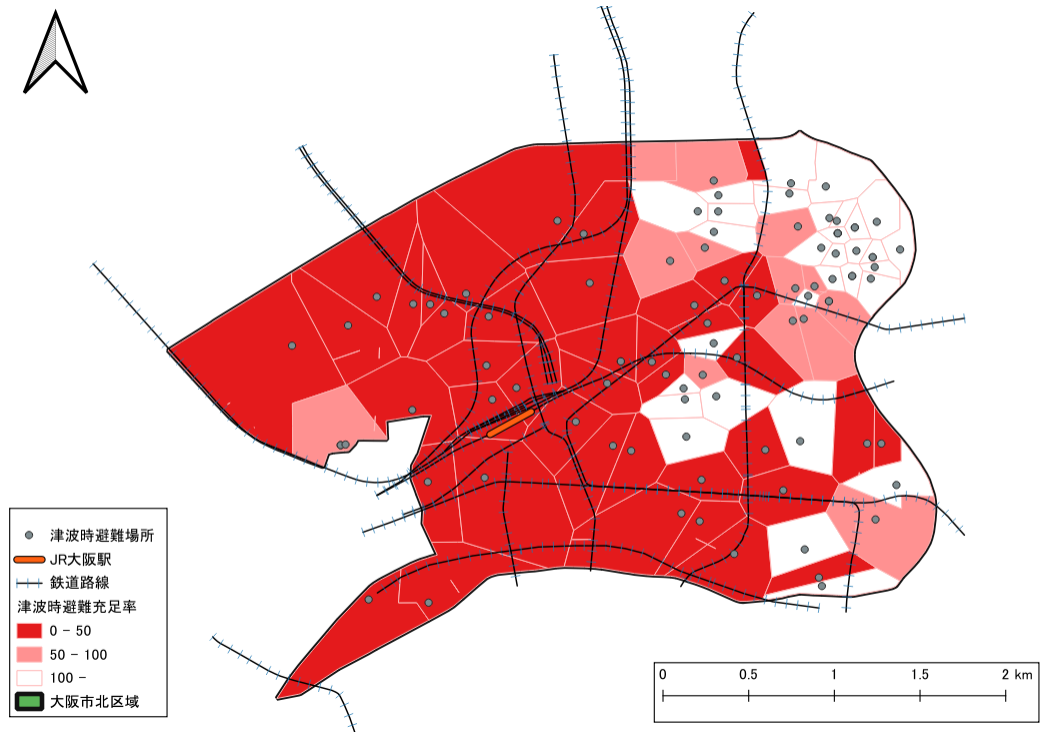


図 5.4-2 地震災害時（津波避難時）における指定避難場所の充足率

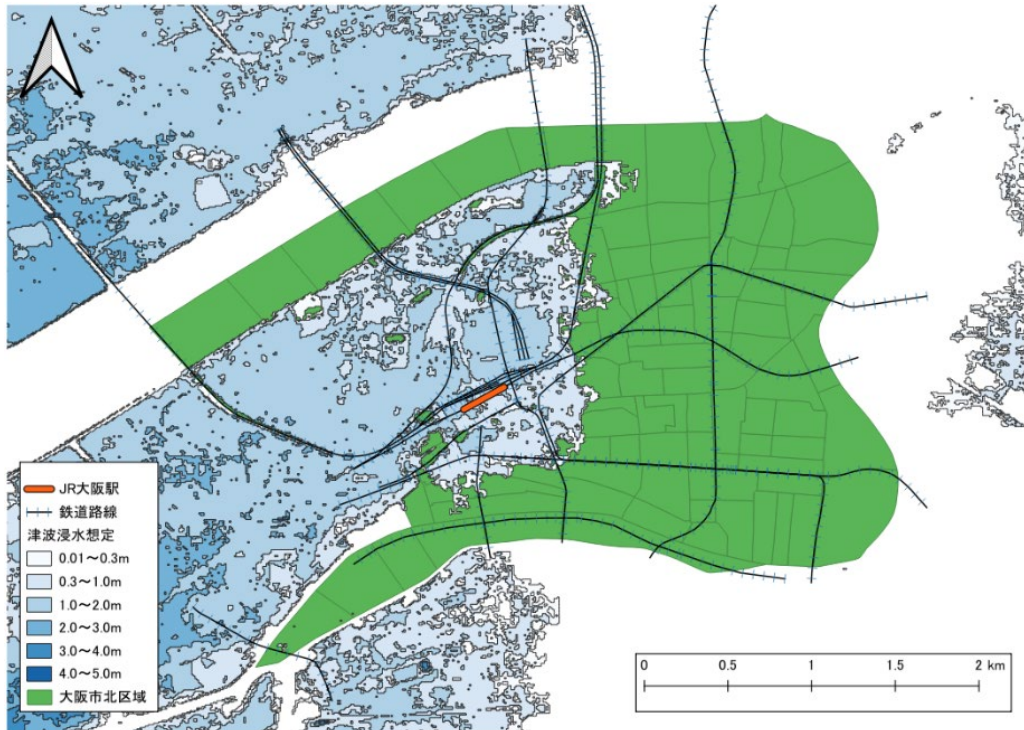


図 5.4-3 大阪市北区の津波浸水リスク

次に洪水時における現指定避難場所の想定最大規模降雨に対する充足率を図 5.4-4 に、計画規模降雨に対する充足率を図 5.4-5 に示す。洪水時における指定避難場所の充足率については、想定最大規模降雨時で約半分の地域で必要収容人数は確保できていると言える<sup>23)</sup>。

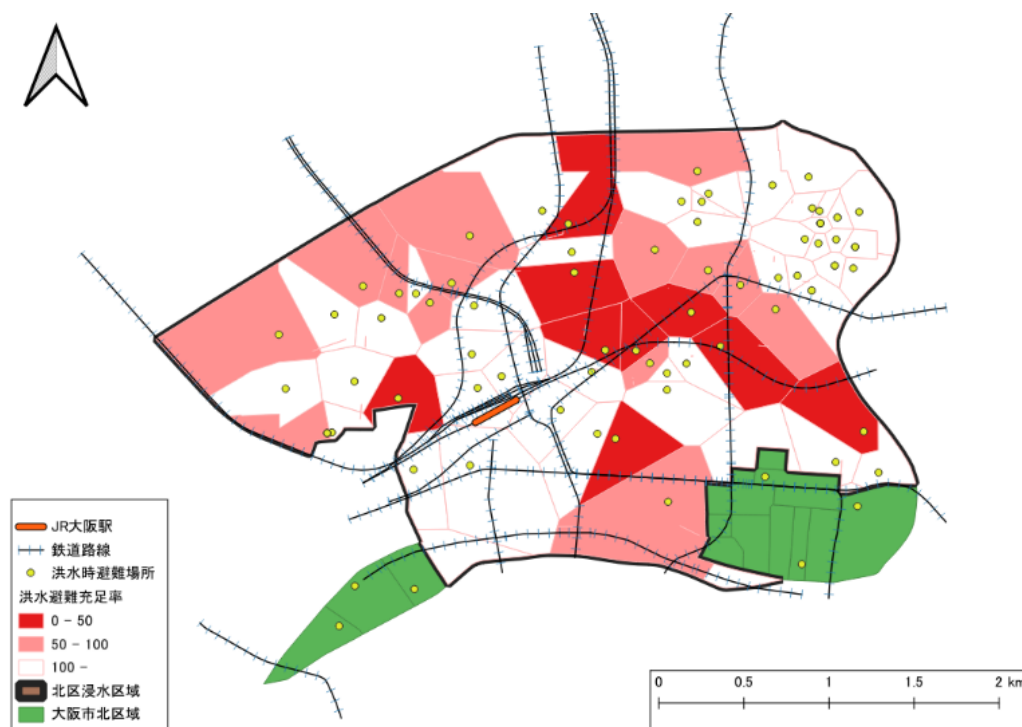


図 5.4-4 洪水時における指定避難場所の充足率：想定最大規模降雨

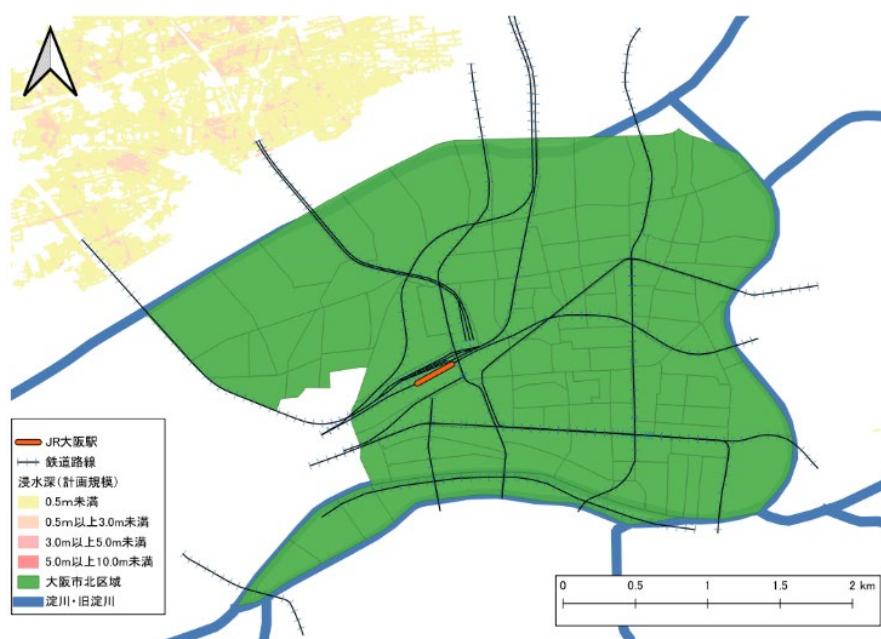


図 5.4-5 洪水時における指定避難場所の充足率：計画規模降雨

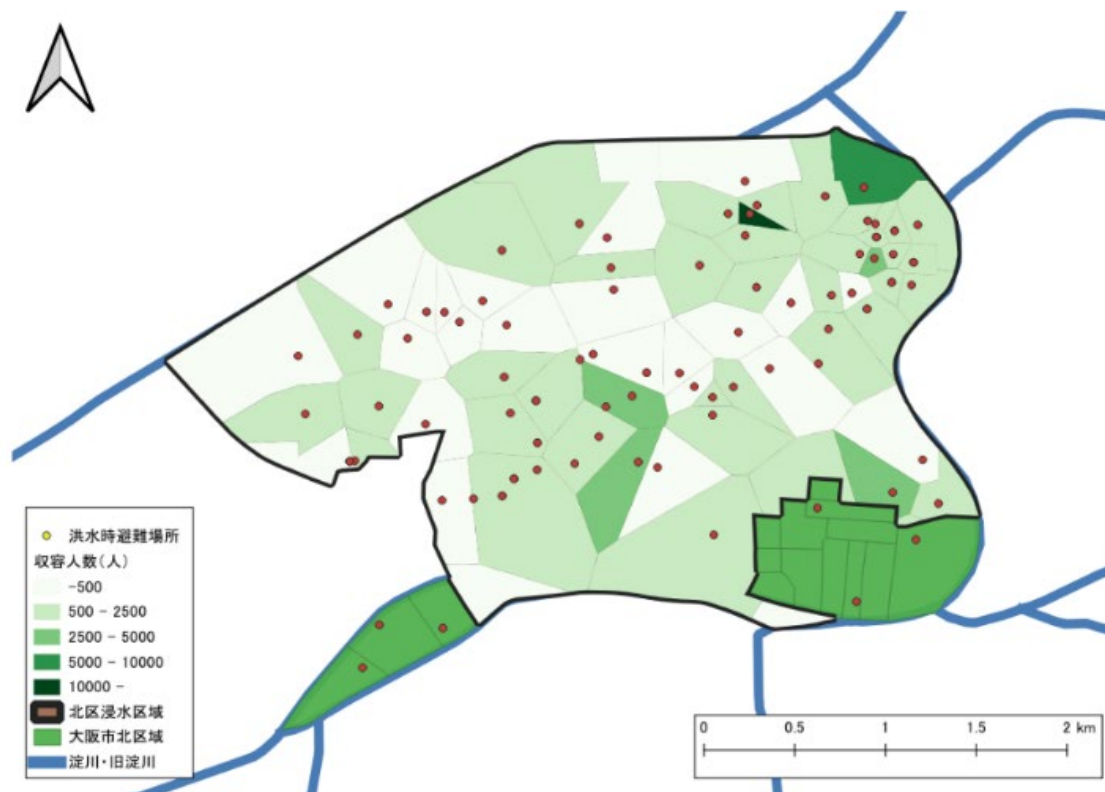
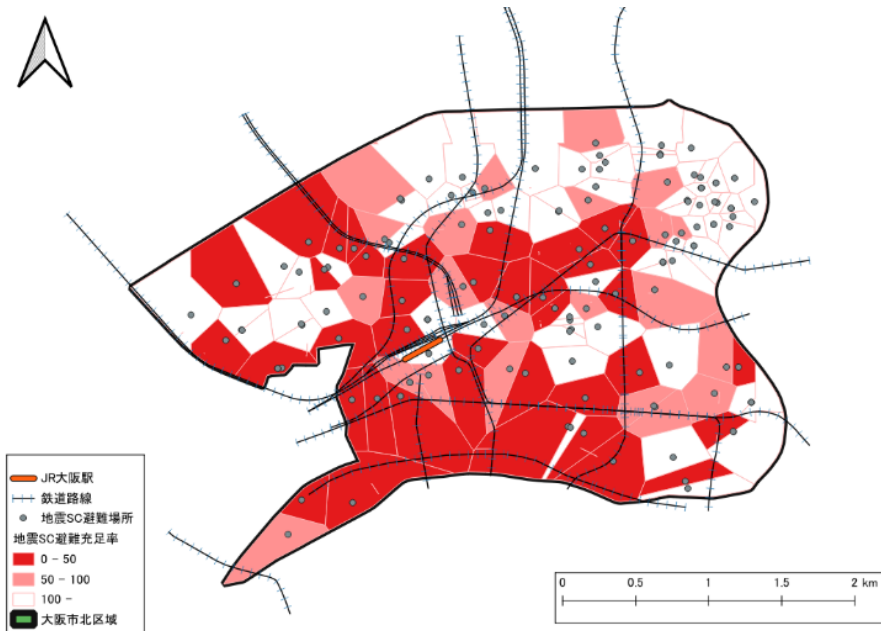


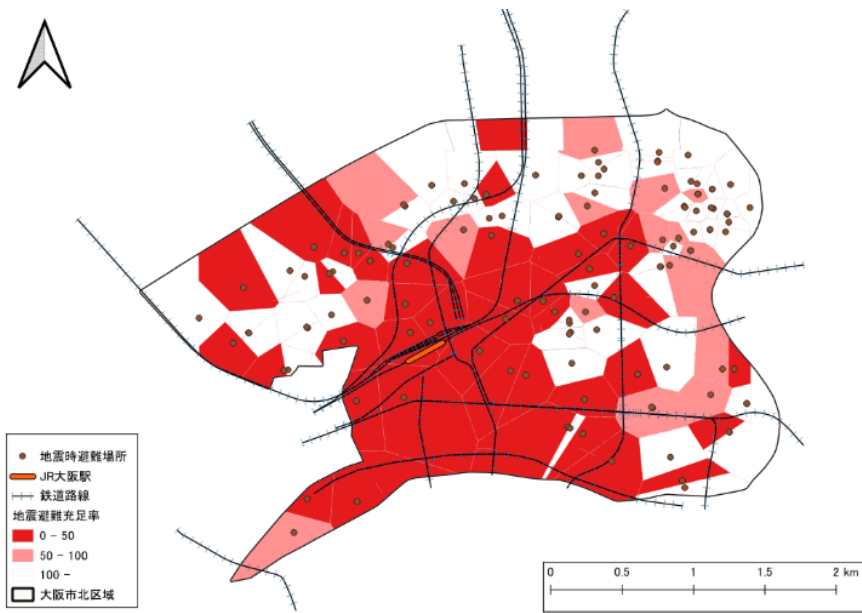
図 5.4-5 各指定避難場所の収容人数

これは、大阪市北区は、集合住宅の割合が高く、今回の避難基準において、要避難となる人数が少なかったためと考えられる。充足率が低くなっている区画は、図 5.4-5 に示すように避難場所の収容人数が少ないことに起因していると考えられる。

地震時の避難についての解析結果を図 5.4-6、津波を考慮した際の解析結果を図 5.4-7 に示す。それぞれ SC を利用しない場合と利用する場合についての結果である。図に示すように地震時における SC の効果について、大阪駅付近で充足率が向上した。これによって、避難場所の収容人数確保状況が SC によって改善されたといえる。津波被害がある場合でも、同様に駅周辺で充足率の改善が確認できる。ここで、駅周辺では、公共機関の運行が休止された場合、鉄道利用者である帰宅困難者が多く発生すると予想できる。そのため、駅周辺の商業施設の帰宅困難者の受け入れ拡大によって、避難場所の圧迫抑制に大きく寄与できると考える。すなわち SC が存在する大阪駅周辺の充足率が向上することが分かる。鉄道が不通になることで帰宅困難者の多くが発生することを考えれば、駅周辺の充足率が向上することには利点が大きいと考える<sup>24)</sup>。

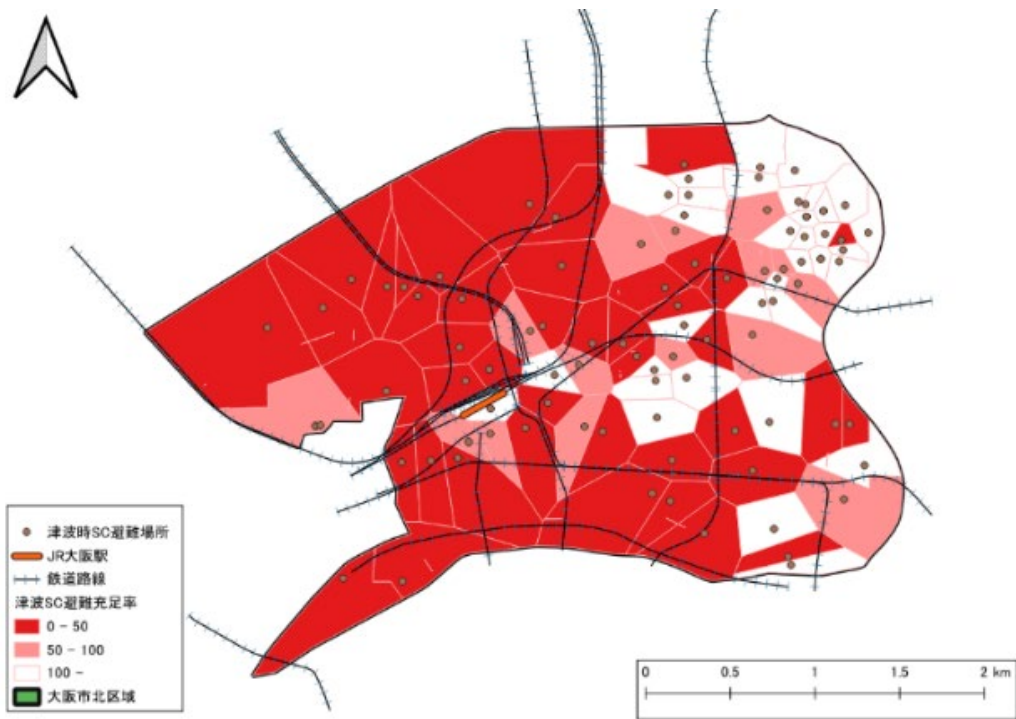


SC あり

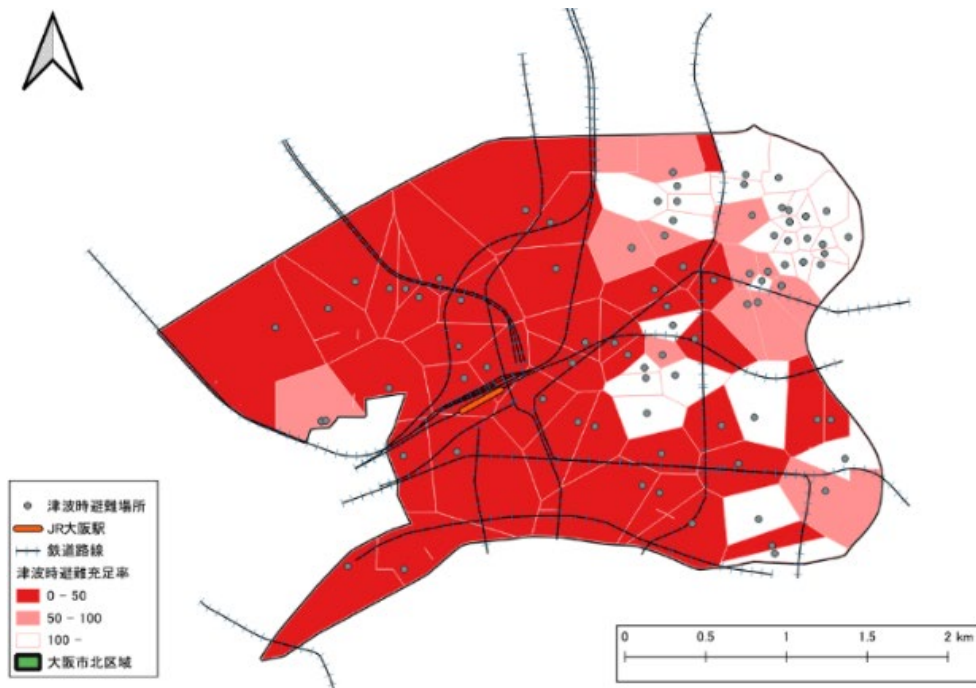


SC なし

図 5.4-6 対象 SC を一時滞在施設として用いた場合 (地震時避難)



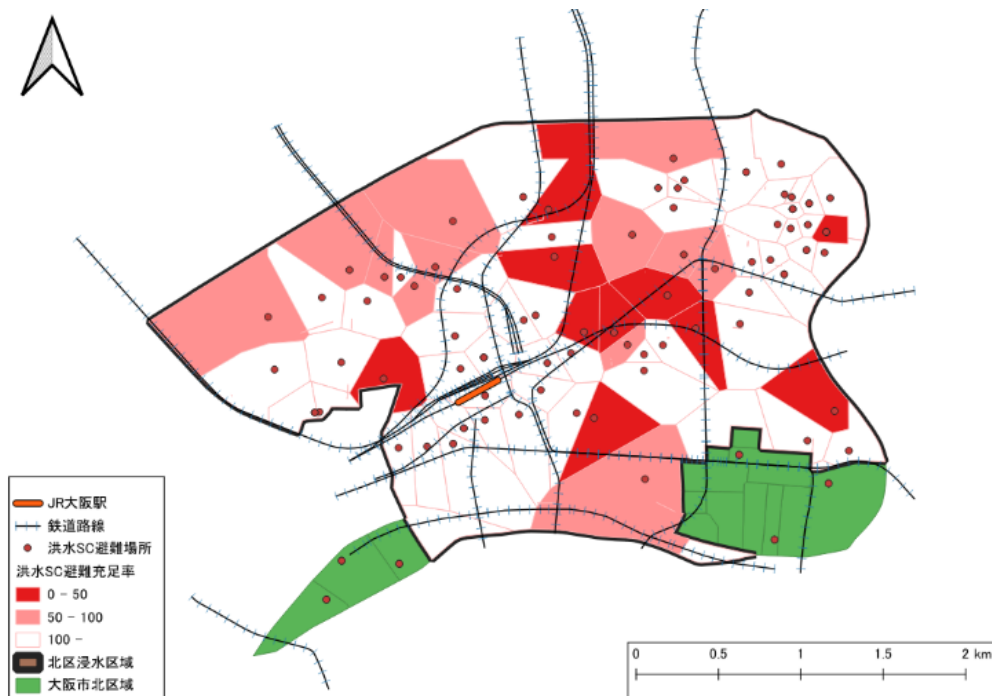
SCあり



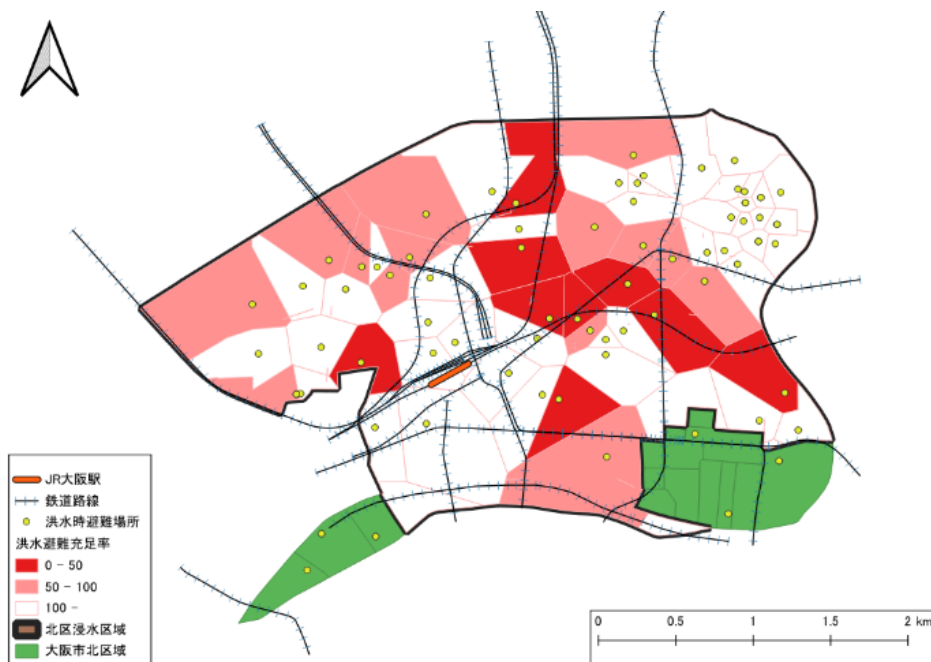
SCなし

図 5.4-7 対象 SC を一時滞在施設として用いた場合 (津波時避難)

洪水時の SC の利用による充足率の変化を図 5.4-8 に示す。SC が所在するエリアは、SC なしの状態でも充足率は依然として高い状態にあったため、SC の有無によって大きな変化は現れていない。



SC あり



SC なし

図 5.4-6 対象 SC を一時滞在施設として用いた場合：洪水時避難

表 5.4-1 北区全体の避難所充足率

対象災害	充足率	
	SCなし	SCあり
地震	124.29	146.91
津波	86.37	99.72
洪水	299.86	448.45

北区全体でみると、地震及び洪水災害時には、十分避難施設は確保できているといえるが、SCを一時滞在施設として活用することで、より充足率は高まった。津波発生時には、SCの一時滞在施設としての利用の効果が見られ、不足している分を補う効果があることが確認された。今回の避難者数の推定方法では、南海トラフ地震で発生する想定されている帰宅困難者数に対してのみの検証であったため、実際の地震発生時には揺れや津波、液状化による家屋倒壊によって、避難者が発生する可能性も十分に考えられるため、より多くの避難施設が必要である<sup>25)</sup>。また、滞在の目安として3日間とされているが、3日間経過後の移動手段や食料について懸念点がある。そのため、企業のBCPの策定により、災害発生後でも迅速な事業再開を実現することで、避難施設からの早急な開放が可能であると考えられる。民間施設を避難場所として活用した事例は、内閣府によって発表されているが、その中で、セキュリティ面や、費用負担面、施設開放に係る人員などに課題があるとされている<sup>26)</sup>。

## 5.5 第5章のまとめ

全国規模で見て、想定最大規模降雨による浸水リスクに曝されないSCが約54%あること、さらに垂直避難が可能になるSCは91%に及ぶことを分析した結果に基づき、滞在時の環境を考えればSCを一時避難場所に活用することが有用であることを示した。本研究では、GISを用いてSCの有用性を解析する手法とその結果を考察した。具体的には浸水リスクの無い避難場所として利用可能なSCを抽出し、さらにボロノイ分割により、各SCを避難先として選択する避難者の人数を算出するなど、SCを一時避難場所として利用した場合の充足率の変化をGISにより標準地図上で可視化する手順を考察した。また想定最大規模の降雨時に発生する洪水に対して、夜間人口を基にした居住者数に対して、避難場所としてSCを利用するにより、各町丁目において、どの程度充足率が改善されるのかを示した。

避難場所が不足している区域でも、SCが存在することで当区域では充足率が100%以上になり、またSCを含めて近隣の避難場所を利用することを考えれば、大阪市北区全体の避難場所の充足率が100%以上になるなど、SCの一時避難場所としての利用の効果を定量化することができた。また本研究では、昼間人口に基づいて、地震発生時の帰宅困難者に対する充足率を、GISを用いて町丁目ごとに求める解析手順を考察し、津波を回避できる場所に

ある SC を一時避難場所として利用することの効果を実量的に示した。その結果、津波避難ビルの確保だけでは、地域全体での充足率は 100%に満たないが、SC を利用して各避難場所に帰宅困難者を振り分けることで、洪水の場合と同様に大阪市北区での充足率を 100%以上にできることを示した。ここででは限定的な場所での事例にて考察したが、本研究では GIS を用い一時避難場所の充足率の分析法の構築を目的としており、本研究で考察した手法は全国の地域防災計画立案時に適用できるものであると考える。これらの結果を踏まえ、SC を一時避難場所として活用するための手法の考察およびその結果をまとめると、その結論は次の通り。

- 1) 浸水リスクの無い避難場所として利用可能な SC を抽出し、さらにボロノイ分割により、各 SC を避難先として選択する避難者の人数を算出するなど、SC を一時避難場所として利用した場合の充足率の変化を GIS により標準地図上で可視化する手順を考察した。
- 2) 想定最大規模の降雨時に発生する洪水に対して、夜間人口を基にした居住者数に対して、避難場所として SC を利用するにより、各町丁目において、どの程度充足率が改善されるのかを示すことができた。避難場所が不足している区域でも、SC が存在することで当区域では充足率が 100%以上になり、また SC を含めて近隣の避難場所を利用することを考えれば、大阪市北区全体の避難場所の充足率が 100%以上になるなど、SC の一時避難場所としての利用の効果を定量化することができた。
- 3) 昼間人口に基づいて、地震発生時の帰宅困難者に対する充足率を、GIS を用いて町丁目ごとに求める解析手順を考察し、津波を回避できる場所にある SC を一時避難場所として利用することの効果を実量的に示すことができた。その結果、津波避難ビルの確保だけでは、地域全体での充足率は 100%に満たないが、SC を利用して各避難場所に帰宅困難者を振り分けることで、洪水の場合と同様に大阪市北区での充足率を約 100%にできることを示した。

## 第6章 結論

都道府県や市町村などの地方自治体は、災害対策基本法に基づき、住民の生命・財産を守るため、防災活動を総合的・計画的に進めるために地域防災計画を作成している。そこでは、国や関係機関と連携し、災害予防・応急・復旧・復興の各段階で、行政が行う公助と共に、住民が主体となって実施する自助や共助あるいは事業者の事業継続の役割も含めた対策と手順を定めた「地域ごとの防災の羅針盤」とも言える防災・減災の基本政策が定められている。具体的には、地域防災計画において、「災害予防」「災害応急対策」「災害復旧・復興」の3段階で行うべき行動が定められている。これまでの災害時の事例を見れば、「災害復旧・復興」の段階の対策や行動では、比較的大きな災害に対しては、国と連携した予算措置や人的支援体制に依存しているという課題はあるものの、被災した自治体単独での対応が困難な場合では、自治体同士が連携する体制が整えられており、結果として被災した自治体の欠点を補う活動が円滑にできている状況が数多く見られている。一方、「災害予防」「災害応急対策」においては、人的および予算的措置の困難さによる対応の不備が際立って現れており、減災につながる措置が十分にできていないのが実情である。その代表的なものには、「災害予防」においては、自治体が管理するインフラ構造物の健全性を把握し、優先的に対策を実施するための箇所を抽出することが要求されるが、モニタリングした資料が欠如していることにより、効率的で有効な処置が実施できていない。これはインフラ構造物に関する専門的知識を備えた技術員の不足に加えて、対象となる構造物が膨大な数にのぼるため、点検・診断作業が追い付かない状態になっているのが原因の一つである。また「災害応急対策」においては、二次災害とも関連する避難所不足およびその環境の不備による災害の拡大問題がある。平成25年に災害対策基本法が改正され、指定避難所の基準の明確化、避難所における生活環境の整備および避難所以外の場所に滞在する被災者への配慮等が規定に盛り込まれた。この法改正以降、「避難生活の良好な生活環境の確保に向けた取組指針（令和6年12月改定）」等に基づき、自治体に対して避難所における良好な生活環境が確保されることが求められている。しかしながら、これまでの災害事例では、避難所での生活による身体的負担から持病が悪化した事例や疲労が蓄積することで心不全や肺炎などの循環器系・呼吸器系の疾患を発症した事例、あるいは指定避難所に入れず、車中泊を強いられることによるエコノミークラス症候群を発症した事例など、災害関連死と認められた死者数の減少策が講じられていない実情がある。本研究はこの背景を鑑み、近年多発している豪雨による水害に着目し、「災害予防」において、人的労力を軽減しながらも効率的に危険箇所を抽出するモニタリング技術の開発と、「災害応急対策」において、災害関連を防ぐための一時避難場所としての商業施設（ショッピングセンター：SC）の利用の効果を考察した結果をまとめたものが本論文である。

前者のモニタリング技術の研究については、車載型リフトアップ式3Dレーザスキャナを用いた河川堤防のモニタリング手法を開発した。これは、現在の3次元計測において主流

となっている三脚に設置する機器ではなく、走行車両に設置したポールの上に計測機器の本体となる 3D レーザスキャナを設置するものである。レーザ照射を高所から実施することができるという利点を持つ。車両走行時は当ポールをたたみ、計測実施時は最大で約 5.35m の高さまで伸縮させる。これらの機構を備えているため、計測位置が複数個所求められる計測においても、移動時はポールを縮めて一般車両として移動を行い、計測時には車両を停止させ、さらに計測高さまでポールを伸ばさせる。さらに実際の河川堤防で当手法を用いた計測を実施し、そこで得られたデータの精度検証や点群によって再現される形状範囲の考察を行った。事前に実施した精度検証実験の結果としては、レーザ照射範囲である半径 20m の対象において、絶対精度が水平座標で 10mm 以内、標高値座標で 15 mm 以内の精度が確保されること、相対精度に関して x,y,z すべての 3 次元座標に対して 10 mm 以内であることが確認された。その結果を基に、岡山市内を流れる 1 級河川百間川にて、本機器の標準ピッチ数である 20,000Hz によるレーザ照射による計測を実施し、3 次元点群によって再現される形状を検証した。高さ 6m 法面勾配 2 割の堤防にて検証を実施し、植生が繁茂する法面において ±10 mm 以内の精度に収まる結果を得た。これにより延長距離の長い河川に対しても、車両で移動しながらも高精度で堤防形状を計測できる技術の実用性を実証するものであり、目視で変状を確認する点検作業を高度化し、さらに 200m ごとに実施する定期縦横断測量に替わる面的な計測ながらも効率の良いモニタリング技術が実現できることを示した。

これらの結果を踏まえ、本研究では、「災害予防」において、河川堤防の点検に 3 次元データを活用するための手法の有用性の結論は次の通り<sup>1)</sup>。

- 1) 人的労力による縦断測量の代替え手法としての活用が検討されている既往の車両走行型のレーザ測量技術は、法面の勾配による死角だけでなく、堤防上に繁茂する植生の影響により、法面を含めた堤防全体の健全性を評価することが困難であることを示した。さらに本研究では、車両走行技術におけるレーザ測量時の俯角や走行速度と関連させて議論し、法尻までのデータ取得が可能なレーザ測量照射位置を考察し、5.5m の高所からレーザ照射する手法の有用性を検証した。その結果、これまでの車両走行によるレーザ測量 (MMS) と比較して、移動体による測量作業の効率性を保ちながら、法面上での変状の検出が可能であることを示した。これにより予防保全型の維持管理に適用できるモニタリングの構築が可能になると考える。
- 2) 近年の気候変動に伴って多発する豪雨により、堤防決壊などの外水氾濫による甚大な被害も増加する傾向にある。いっぽうで、河川管理に要する財政が厳しくなり、技術者不足も深刻化している現状を鑑みると、従来の河川管理手法をより一層効率化することが求められている。堤防の 3 次元データを活用する手法には、本研究で議論した車両走行型の他に、航空レーザ測量あるいは UAV によるレーザ測量の活用が試みられている。コスト、測量精度および作業の簡便性などを考え、各手法の特性を使い分けながら、それぞれの利点を活かす測量を河川管理に活用することが検討されていくと

考える。その中で、本研究成果は、地上型レーザ測量作業を効率化する手法として、航空レーザ測量よりも低コストで UAV を用いる手法より簡便な作業となることを活かし、目視で確認する堤防点検作業を補完するものとしての実用化が期待できる。

次に「災害応急対策」の課題の解決策については、全国規模で見て、想定最大規模降雨による浸水リスクに曝されない SC が約 54%あること、さらに垂直避難が可能になる SC は 91%に及ぶことを分析した結果に基づき、滞在時の環境を考えれば SC を一時避難場所に活用することが有用であることを解析する手法とその結果を考察した。具体的には浸水リスクの無い避難場所として利用可能な SC を抽出し、さらにボロノイ分割により、各 SC を避難先として選択する避難者の人数を算出するなど、SC を一時避難場所として利用した場合の充足率の変化を GIS により標準地図上で可視化する手順を考察した。これにより想定最大規模の降雨時に発生する洪水に対して、夜間人口を基にした居住者数に対して、避難場所として SC を利用するにより、各町丁目において、どの程度充足率が改善されるのかを示すことができた。避難場所が不足している区域でも、SC が存在することで当区域では充足率が 100%以上になり、また SC を含めて近隣の避難場所を利用することを考えれば、大阪市北区全体の避難場所の充足率が 100%以上になるなど、SC の一時避難場所としての利用の効果を定量化することができた。また本研究では、昼間人口に基づいて、地震発生時の帰宅困難者に対する充足率を、GIS を用いて町丁目ごとに求める解析手順を考察し、津波を回避できる場所にある SC を一時避難場所として利用することの効果を示した。その結果、津波避難ビルの確保だけでは、地域全体での充足率は 100%に満たないが、SC を利用して各避難場所に帰宅困難者を振り分けることで、洪水の場合と同様に大阪市北区での充足率を 100%以上にできることを示した。ここででは限定的な場所での事例にて考察したが、本研究では GIS を用いて一時避難場所の充足率の分析法の構築を目的としており、本研究で考察した手法は全国の地域防災計画立案時に適用できるものである、これらの結果を踏まえ、本研究では、「災害応急対策」において、SC を一時避難場所として活用するための手法の考察およびその結果の結論は次の通り<sup>2)</sup>。

- 1) 浸水リスクの無い避難場所として利用可能な SC を抽出し、さらにボロノイ分割により、各 SC を避難先として選択する避難者の人数を算出するなど、SC を一時避難場所として利用した場合の充足率の変化を GIS により標準地図上で可視化する手順を考察した。これにより想定最大規模の降雨時に発生する洪水に対して、夜間人口を基にした居住者数に対して、避難場所として SC を利用するにより、各町丁目において、どの程度充足率が改善されるのかを示すことができた。避難場所が不足している区域でも、SC が存在することで当区域では充足率が 100%以上になり、また SC を含めて近隣の避難場所を利用することを考えれば、大阪市北区全体の避難場所の充足率が 100%以上になるなど、SC の一時避難場所としての利用の効果を定量化することができた。
- 2) 昼間人口に基づいて、地震発生時の帰宅困難者に対する充足率を、GIS を用いて町丁目ごとに求める解析手順を考察し、津波を回避できる場所にある SC を一時避難場所とし

て利用することの効果を定量的に示すことができた。その結果、津波避難ビルの確保だけでは、地域全体での充足率は100%に満たないが、SCを利用して各避難場所に帰宅困難者を振り分けることで、洪水の場合と同様に大阪市北区での充足率を100%以上にできることを示した。

このように、本研究では各種オープンデータとGISを組み合わせる解析により避難者の収容人数を算出し、その結果に基づき、SCの一時避難場所としての有用性を町丁目ごとあるいは地区全体で議論することができた。本文に記述したように、災害時での一時避難場所としての活用を議論することは、SCのBCPの策定においても重要な項目であると考えられる。

なお今後の課題については、次の通りである。

- 1) 「災害予防」の課題解決策：予防保全型の点検（巡視）作業の実現に向けたモニタリング技術の開発について
  - ・約40mの範囲ごとのStop and Goの測量方法で、どの程度の効率化が可能なのかをコストを含めて実証する必要がある。そのため本手法の現地への適用事例を増やして（現在はまだ試行段階）、あらためて利点と課題を整理し、他手法との使い分けを明確にする必要がある。
- 2) 「災害応急対策」の課題解決策：災害関連死を防ぐためのSCの利用の検討について
  - ・SCが分布しておらず、既存の避難所や公共施設で近隣住民に十分な収容能力を提供できない地域が多数存在しているため、地域特性差を踏まえる必要があり、さらには実際の地震発生時の揺れや津波、液状化による家屋倒壊で発生する避難者の推定などを考慮した防災計画の立案に発展させることが必要である。
  - ・2025年問題（団塊世代後期高齢者）一層進む高齢化を踏まえ、水平移動できない要配慮者の人口が増加する災害時要配慮者の歩行可能範囲を踏まえたSCへの水平避難の研究、あるいは町丁目単位で要配慮者がSCを有効に活用可能か議論する際のデータ分析が必要である。
  - ・共用部の面積については、SC協会にデータは存在しておらず、レンタル比率に関しては業界を巻き込んだ議論が必要であり、また鉄道を利用した駅ビルと車を利用した郊外型SCでは利用者の属性が異なるため、全国的に同じ計算式では通用しないことを実証する必要がある。

## 【参考文献】

### 第1章

- 1) 加藤 孝明, 神谷 秀美, 程 洪, ヤルコン ユスフ: 地域防災計画支援システム構築を通じた地域防災計画の策定プロセスの提案, 都市計画報告集, Vol.1, No.1, pp.74-78, 2002.
- 2) 沼田 宗純, 近藤 伸也, 井上 雅志, 目黒 公郎: 広域的応援体制確立のための地域防災計画の比較分析, 生産研究, Vol.63, No.6, pp.755-763, 2011.
- 3) 例えば国土交通白書 2022, 国土交通省
- 4) 中村 民雄: 災害対策基本法の改正: 市民からみた意義と課題, 学術の動向, 19 巻, 2 号, 2\_82-2\_87, 2014
- 5) 丹波 史紀: 避難者・帰還者の生活実態, —「生活の質」の維持・回復に向けて, 学術の動向, 26 巻 3 号 3\_34-3\_37, 2021
- 6) 例えば水害レポート 2024, 国土交通省
- 7) 佐古俊介, 延常浩次: 河川堤防の雨水排水による被災と対応, 国土技術研究センター JICE Report, Vol.31, pp.8-11, 2017.
- 8) 国土技術研究センター: 目視点検によるモニタリングに関する技術資料, pp.15-20, 2025
- 9) 久保田啓二郎, 大浪裕之, 西山哲, 東良慶: 自然災害被害の予測・把握技術の高度化に向けて-堤防の変状等を高精度に把握するモービルマッピングシステムの開発, 土木技術資料, Vol.55 号, pp.6-9, 2013
- 10) 間野耕司: 河川堤防モニタリングに関するモービルマッピングシステム (MMS) 計測技術の研究, pp6-19, 2018
- 11) 橘菊生, 間野耕司, 島村秀樹, 西山哲: 河川堤防計測へのモバイルマッピングシステムの適用, 写真測量とリモートセンシング, Vol.54, No.4, pp. 166-177, 2015
- 12) Puente, I., Gonzalez-Jorge, H., Martinez-Sanchez, J., Arias, P. : Review of mobile mapping and surveying technologies. Measurement, 46, 2127–2145, 2013
- 13) 避難所運営等避難生活支援のためのガイドライン (チェックリスト), 平成 28 年 4 月 (令和 6 年 12 月改定), 内閣府 (防災担当)
- 14) 避難生活における良好な生活環境の確保に向けた取組指針, 平成 25 年 8 月 (令和 6 年 12 月改定), 内閣府 (防災担当)
- 15) 秋富 慎司, 坪倉 正治, 大黒 正志, 齋藤 典才, 安田 健二: 令和 6 年能登半島地震における災害関連死の現状と南相馬市の教訓, 日本老年医学会雑誌, 62 巻, 1 号, pp.12-15, 2025
- 16) 避難所における生活環境の確保に向けた取組事例集, 令和 6 年 3 月, 内閣府 (防災担当)
- 17) 金 炫兌, 小金井 真: 避難所における避難環境の実態調査及び今後の課題—熊本地震を中心に—, 日本建築学会環境系論文集, 87 巻, 799 号, pp.550-558, 2022
- 18) 赤間 健一: DCP による BCP 導入方策に関する研究 (<特集>事業継続計画 (BCP) とテレ

ワーク), 日本テレワーク学会誌, 8 巻, 2 号, pp. 42-46, 2010

- 19) 瀬戸 寿一, 杉本 直也 : 地理空間情報のオープンデータ化とその活用可能性 静岡県を事例に, 2014 年度日本地理学会春季学術大会, セッション ID : 525, 2014
- 20) 讃岐 亮, 佐藤 栄治, 鈴木 達也, 吉川 徹, 牧 紀男 : 避難場所としての商業施設の立地ポテンシャル評価 紀伊半島の食料を供する施設を対象として, 78 巻, 692 号, pp. 2127-2134 日本建築学会計画系論文集, 2013

## 第 2 章

- 1) 岡山県土木部河川課 : 主要河川の勾配と洪水の特徴, 岡山県ホームページ, <https://www.pref.okayama.jp/page/detail-4641.html>, (2025-11-11).
- 2) 国土交通省 水管理・国土保全局 : 水害レポート 2022
- 3) 国土交通省 水管理・国土保全局 気候変動を踏まえた治水計画に係る技術検討会 : 気候変動を踏まえた治水計画のあり方 提言, pp.10-21, 2021
- 4) 水害レポート 2018, 国土交通省
- 5) 例えば河川データブック 2020, 国土交通省
- 6) 吉川勝秀 : 新河川堤防学-河川堤防システムの整備と管理の実際, pp.1-9, 技報堂出版, 2011.
- 7) 宮本健也 : 河川維持管理の現状と課題, 2018.
- 8) 安部宏紀 : 戦略的な河川維持管理に向けた取り組み, 建設マネジメント技術 2012 年 11 月号, pp.15-21, 2012.
- 9) 白波瀬卓哉 : 革新的河川管理プロジェクトにおける新技術の導入に向けた取り組み, 建設マネジメント技術 2019 年 11 月号, pp.17-20, 2019.
- 10) 国土交通省 水管理・国土保全局 河川環境課 河川保全企画室 : 河川管理用三次元データ活用マニュアル (案), 2020
- 11) 国土交通省 水管理・国土保全局 : 河川維持管理に関する技術研修テキスト【実務者編】, 2014
- 12) Tachibana, K.; Mano, K.; Shimamura, H.; Nishiyama, S. The Application of Mobile Mapping System to River Embankment Measurement. J. Jpn. Soc. Photogramm. Remote Sens, 54, pp.166-177, 2015
- 13) 国土交通省 水管理・国土保全局 河川砂防技術基準 維持管理編 (河川編) (令和 7 年 8 月時点) ,2025
- 14) 佐古 俊介, 高橋 耀介, 上野 俊幸 : 大規模河川堤防の河川水及び降雨の浸透特性に関する現地観測, 河川技術論文集, 30 巻, pp. 155-160, 2024
- 15) Al-Durgham, K.; Lichti, D.D.; Kwak, E.; Dixon, R. Automated Accuracy Assessment of a Mobile Mapping System with Lightweight Laser Scanning and MEMS Sensors. Appl. Sci. , 11, 1007,2021

- 16) 笹野 拓海, 山口 裕哉, 白石 宗一郎, 岡本 直樹, 岩上 弘明, 佐田 達典: 位相差方式レーザーキャナを搭載した MMS における地物の素材特性と計測条件が取得点群に及ぼす影響の検証, 土木学会論文集 F3 (土木情報学), 78 巻, 2 号, II\_26-II\_33, 2022
- 17) 田中 成典, 窪田 諭, 今井 龍一, 中村 健二, 山本 雄平, 寺口 敏生, 櫻井 淳, レーザキャナ搭載 UAV 開発のための点群データ計測の利用場面と解析・処理技術に関する調査研究, 土木学会論文集 F3 (土木情報学), 72 巻, 2 号, II\_82-II\_89, 2016
- 18) 日高 菜緒: 点群データ処理アルゴリズムの総括および土木分野での活用事例と展望, AI・データサイエンス論文集, 4 巻, 3 号, pp.301-309, 2023
- 19) 例えば国土交通省 水管理・国土保全局: 水害レポート 2023
- 20) 国土交通省 水管理・国土保全局: 水害レポート 2018
- 21) 内閣府 防災白書 2021
- 22) <https://www.qscpua.or.jp/cgi-bin/qscpua/pdf/20200703.pdf> 令和 2 年 7 月豪雨の概要 (2025-11-11)
- 23) 内閣府 防災白書 2023
- 24) 滝田 真, 熊谷 良雄: 大規模災害時の避難所運営に関する地域防災力評価, 地域安全学会論文集, 4 巻, pp. 15-24, 2002
- 25) 朝日新聞 DIGITAL: 2020 年 9 月 23 日
- 26) [https://www.bousai.metro.tokyo.lg.jp/kitaku\\_portal/1000050/1000536.html](https://www.bousai.metro.tokyo.lg.jp/kitaku_portal/1000050/1000536.html) 東京都ホームページ (2025-11-11)
- 27) <https://www.pref.ishikawa.lg.jp/saigai/202401jishin-taisakuhonbu.html> 石川県ホームページ (2025-11-11)
- 28) <https://www.hokkoku.co.jp/articles/tym/1958742> 北国新聞ホームページ (2025-11-11)
- 29) 朝日新聞 DIGITAL: 2011 年 3 月 11 日
- 30) 水谷 嘉浩: 避難生活の「住」について ～能登半島地震の報告と避難所のあるべき姿～, リハビリテーション・エンジニアリング, 39 巻, 3 号, pp. 116-121, 2024
- 31) 日本経済新聞: 2024 年 1 月 6 日
- 32) 坂田 朗夫, 川本 篤志, 伊藤 則夫, 白木 渡: 大規模広域災害に対する市町村 BCP 策定の視点, 土木学会論文集 F6 (安全問題), 68 巻, 2 号, I\_46-I\_51, 2012
- 33) 大西 健丞, 大規模災害に備えた自治体と民間団体の連携, ボランティア学研究, 14 巻, pp.89-94, 2014
- 34) <https://www.bousai.go.jp/kyoiku/pdf/guidline.pdf> 内閣府 (防災担当) (2025-11-11)
- 35) <https://www.bousai.go.jp/taisaku/keikaku/kihon.html> 内閣府 (2025-11-11)

### 第 3 章

- 1) <https://www.river-jsce.jp/2025symposium/os2/1177/> 国土交通省 (2025-11-11)
- 2) <https://www.mlit.go.jp/common/000220473.pdf> 国土交通省 (2025-11-11)

- 3) [https://www.meti.go.jp/medi\\_lib/report/2021FY/000212.pdf](https://www.meti.go.jp/medi_lib/report/2021FY/000212.pdf) 企業と連携するデジタル人材に関する調査 経済産業省 (2025-11-11)
- 4) 国土交通省 水管理・国土保全局 河川砂防技術基準 維持管理編(河川編) (令和7年)
- 5) [https://www.mlit.go.jp/river/shinngikai\\_blog/shaseishin/kasenbunkakai/shouinkai/rigyouhyouka/dai02kai/dai02kai\\_siryu3.pdf](https://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/shaseishin/kasenbunkakai/shouinkai/rigyouhyouka/dai02kai/dai02kai_siryu3.pdf) 国土交通省 (2025-11-11)
- 6) Tsubaki, R.; Moramarco, T.; Maniatis, G.; Coz, J.L.; Muste, M. Advances in river measurement technologies. *New Waves Hy-drom.* , Vol.1, pp.36–59, 2025
- 7) Prashar, N.; Lakra, H.S.; Shaw, R.; Kaur, H. Urban Flood Resilience: A comprehensive review of assessment methods, tools, and techniques to manage disaster, Vol.20, 100299, 2023
- 8) Guo, M.; Zhou, Y.; Zhao, J.; Zhou, T.; Yan, B.; Huang, X. Urban Geospatial Information Acquisition Mobile Mapping System based on close-range photogrammetry and IGS site calibration. *Geo-Spat. Inf. Sci.*, 24, 558–579,2021
- 9) Vaaja, M.; Hyyppä, J.; Kukko, A.; Kaartinen, H.; Hyyppä, H.; Alho, P. Mapping topography changes and elevation accuracies using a mobile laser scanner. *Remote Sens.* , Vol.3, pp.587–600, 2011
- 10) Lee, J.; Yoo, S.; Kim, C.; Sohn, H.G. Automatic levee surface extraction from mobile LiDAR data using directional equalization and projection clustering. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* Vol.116, 103143, 2023
- 11) 星野裕二, 西山哲: 車載写真レーザ測量を使った法面モニタリングに関する考察, 土木学会論文集, Vol.80, No23, 24-23347, 2024
- 12) 間野耕司, 石井一徳, 平尾公孝, 橘菊生, 吉村充則, Devrim Akca, Armin Gruen: 移動計測車両測量システム(MMS)により取得される点群の精度評価, 写真測量とリモートセンシング, Vol.51, No.4, pp.186-200, 2012
- 13) Samori, S., Nishiyama, S. and Sakita, K.: Quantifying the slope deformation of a laser point cloud acquired using mobile mapping system, *International Journal of GEOMATE* , Vol.21, No.88, pp.10-21, 2021
- 14) 河川管理用三次元データ活用マニュアル (案) 令和2年2月 国土交通省 水管理・国土保全局 河川環境課 河川保全企画室

#### 第4章

- 1) Cahalane, C., Lewis, P., McElhinney, C.P., McNerney, E., McCarthy, T. : Improving MMS Performance during Infrastructure Surveys through Geometry Aided Design. *Infrastructures*, Vol.1, No.5, 2016
- 2) Al-Bayari, O. Mobile mapping systems in civil engineering projects (case studies). *Appl. Geomat.* 2019, 11, pp. 1–13, 2016

- 3) Takada, N., Nishi, M., Fukuda, M. : Damage to River Levees and Revetments. *Soils Found*, 36, pp.241–254, 1996
- 4) Wang, X., Wang, Y., Liao, X., Huang, Y., Wang, Y., Ling, Y., Chan, T.O. : Monitoring of Levee Deformation for Urban Flood Risk Management Using Airborne 3D Point Clouds. *Water* , Vol.16, ID:559, 2024
- 5) Elhashash, M., Albanwan, H., Qin, R. : A Review of Mobile Mapping Systems: From Sensors to Applications. *Sensors* , Vol.22, 4262, 2022
- 6) Guo, M., Zhou, Y., Zhao, J., Zhou, T., Yan, B.; Huang, X. Urban Geospatial Information Acquisition Mobile Mapping System based on close-range photogrammetry and IGS site calibration. *Geo-Spat. Inf. Sci.* , Vol.24, pp.558–579, 2021
- 7) Tsubaki, R.; Moramarco, T.; Maniatis, G.; Coz, J.L.; Muste, M. Advances in river measurement technologies. *New Waves Hy-drom.* , Vol.1, pp.36–59, 2025
- 8) Kawajiri, S., Kawaguchi, T., Ogasawara, A., Minabe, Y., Nakamura, D. : Geotechnical characteristics of levees subjected to sand boil due to high water levels. *Geotech. Res.* , Vol.12, pp.29–42, 2024
- 9) 堤防等河川管理施設及び河道の点検・評価要領, 令和5年3月,国土交通省 水管理・国土保全局 河川環境課, pp.3-16, 2023
- 10) 猪狩 名人:予防保全型メンテナンスへの転換に向けて,土木構造・材料論文集, 40巻, PP.15-18, 2024
- 11) 中島 洋行 : ライフサイクルコストを最適化する保全方法の検討—事後保全と予防保全に焦点を当てて—, 日本信頼性学会誌, 47巻 4号, pp.125-130, 2025

## 第5章

- 1) 今田 弘太, 沼田 宗純 : 郵便局の浸水リスクに関する基礎的評価, 生産研究, 76巻, 4号, pp. 385-389, 2024
- 2) 牧之段 浩平, 大原 美保, 目黒 公郎, 須見 徹太郎 : 大規模水害時の江東デルタ地帯における危険性分析と避難方法の検討, 生産研究, 62巻, 4号, pp. 425-429, 2010
- 3) 則竹 桃実, 四井 早紀, 大津山 堅介, 廣井 悠 : 民間施設等を活用した大規模水害時の域内避難の可能性の検討, 都市計画論文集, 60巻, 3号, pp.1479-1486, 2025
- 4) 鈴木圭一, 朝日向 猛, 芝崎良美 : 官民の連携協働による災害時拠点の確保・運営方策について, JICE REPORT 第15号, pp.52-57, 2009
- 5) 太田 葵, 稲垣 景子, 佐土原 聡 : 商業・業務集積地区における災害時一時滞在空間に関する実態調査 みなとみらい21地区を対象として, 都市計画報告集, 16巻, 1号, pp. 28-31, 2017
- 6) [https://www.jcsc.or.jp/sc\\_data/data/definition](https://www.jcsc.or.jp/sc_data/data/definition), 一般社団法人日本ショッピングセンター協会 ホームページ (2025-11-11)

- 7) <https://maps.gsi.go.jp/development/ichiran.html> 国土地理院, 地理院タイル一覧ページ (2025-11-11)
- 8) <https://geocode.csis.u-tokyo.ac.jp/home/csv-admatch/> 東京大学アドレスマッチングサービス (2025-11-11)
- 9) <https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-A31.html> 国土数値情報ダウンロードサービス (2025-11-11)
- 10) [https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/codelist/water\\_depth\\_code.html](https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/codelist/water_depth_code.html) 国土数値情報ダウンロードサービス (2025-11-11)
- 11) <https://ja.wikipedia.org/wiki/イオン小郡ショッピングセンター> (2025-11-11)
- 12) <https://www.pref.osaka.lg.jp/documents/84957/01zintekitatemono.pdf> 大阪府域の被害想定について (人的被害・建物被害) (2025-11-11)
- 13) <https://www.city.osaka.lg.jp/keizaisenryaku/page/0000550027.html> 災害時における旅行者の受入れ施設について, 大阪市ホームページ (2025-11-11)
- 14) <https://www.stat.go.jp/data/kokusei/2020/kekka.html> 総務省統計局 (2025-11-11)
- 15) <https://www.e-stat.go.jp/> 政府統計の統計窓口 (2025-11-11)
- 16) 松本 嘉孝, 加藤 崇洋, 猪八重 拓郎: GIS を用いた災害時の応急給水量の評価—愛知県豊田市中心部を事例として—, 土木学会論文集 G (環境), 72 巻, 6 号, II\_319-II\_324, 2016
- 17) 山田 崇史, 佐々木 雅宏, 岸本 達也: 津波避難時の避難施設選択モデルを用いた避難施設圏域の推定—復興支援調査アーカイブによる仙台市・名取市・岩沼市の分析—, 日本建築学会技術報告集, 22 巻, 51 号, 825-830, 2016
- 18) 藤山 遼太, 岡田 智秀, 田島 洋輔: 静岡県遠州灘地域における津波避難施設の指定・整備要件に関する研究, 土木学会論文集, 79 巻, 18 号, ID: 23-18105, 2023
- 19) 水野 雅男, 西森 知弘, 銀吉屋 僚太: 東京都地域防災計画における野外収容施設の位置づけの変遷と大震災時の開設実態に関する研究, 地域安全学会論文集, 41 巻, 355-362, 2022
- 20) 大家 亮子: 「地域拠点機能」を発揮する地域貢献型・提案型の駅ビルづくりに関する研究, 都市計画論文集, 45.2 巻, pp. 1-8, 2018
- 21) 李 東昱: 都市型用途複合施設における利用実態及び用途構成に関する研究, 千葉大学大学院工学研究科学位論文, pp.41-70, 2014
- 22) <https://www.city.osaka.lg.jp/kita/page/0000299035.html> 大阪市津波ビル (2025-11-11)
- 23) 石野 好彦, 瀬尾 直樹, 原田 賢治: 御前崎地区住民の津波避難に関する基礎調査 —東北地方太平洋沖地震後 10 年の地域の津波避難—, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), 78 巻, 4 号, I\_689-I\_701, 2022
- 24) 新藤 淳, 村上 正浩, 廣井 悠, 市居 嗣之, 宮田 桜子, 黒目 剛, 虎谷 洸: 新宿駅周辺地域における帰宅困難者一時滞在施設開設支援手法の開発, 日本地震工学会論文集, 19 巻,

6号, 6\_296-6\_305, 2019

- 25) 南 慎一, 竹内 慎一: 指定避難所の防災機能からみた地区の避難計画に関する研究 : 釧路市におけるケーススタディ, 日本建築学会計画系論文集, 66 巻, 543 号. Pp.215-221, 2001
- 26) 小野 太樹, 松田 雄二: 全国自治体における避難行動要支援者の避難環境に関する研究, 日本建築学会技術報告集, 31 巻, 79 号, pp.1497-1502, 2025

## 第 6 章

- 1) Junko Kaneto , Nishiyama Satoshi, Keisuke Yoshida: 3D Data Acquisition Methods and Their Use in River Levee Topographic Survey, Sensors, Volume 26, Issue 3, 841, 2026
- 2) Junko Kaneto, Satoshi Nishiyama and Kazushi Kimoto : Study on case for utilizing shopping centers as temporary evacuation sites, Intelligence, Informatics and Infrastructure (in press), 2026

## 謝 辞

研究の遂行および論文を執筆にあたり，岡山大学学術研究院環境生命自然科学学域 比江島慎二教授，氏原岳人准教授ならびに赤穂良輔准教授には論文審査と共に貴重な助言をいただきました．ここに御礼申し上げます．また岡山大学学術研究院環境生命自然科学学域 西山哲教授，吉田圭介准教授ならびに木本和志准教授には，主指導教員ならびに副指導教員として研究および論文の指導をしていただきました．ここに厚く御礼申し上げます．