

博士論文

建設工程のDX化のための
3次元データを活用した施工管理技術の研究

2025年3月

長江健三

岡山大学大学院
環境生命科学研究科

目次

第 1 章 緒論	1
1. 1 本研究の背景	1
1. 2 ICT 施工の概要	6
1. 3 本研究の目的	41
1. 4 従来の研究	43
1. 4. 1 UAV 測定の飛行方法に関する研究	43
1. 4. 2 カメラに関する研究	43
1. 4. 3 SFM/MVS に関する研究	43
1. 4. 4 実践で使える研究	44
1. 5 本論文の概要	45
第 2 章 ICT 施工の実務課題	48
2. 1 諸言	48
2. 2 実務における課題と対策	49
2. 2. 1 UAV 測定における課題	49
2. 2. 2 施工時における課題	50
2. 2. 3 施工管理時における課題	51
2. 2. 4 結言	59
第 3 章 UAV 測定の検討	62
3. 1 諸言	62
3. 2 自動定点撮影	63
3. 3 法面データ取得のための UAV 測定	65
3. 4 飛行方法の違いによる影響	73

3. 5	データを利用した精度向上の検証	75
3. 6	キャリブレーションの違いによる影響	76
3. 7	結言	80
第 4 章	推進工事における 3 次元測量技術を応用した見えるかの実証	81
4. 1	諸言	81
4. 2	概要	81
4. 3	実験内容と検証	82
4. 4	結言	86
第 5 章	維持管理手法の効率化	87
5. 1	諸言	87
5. 2	計測機器	88
5. 3	解析手法	89
5. 4	対象法面と計測概要	91
5. 5	Mobile Mapping System に関する検証	92
5. 6	MMS 計測で取得した点群の変状精度の検証	108
5. 7	Iterative Closest Point に関する検証	115
第 6 章	結論	130

第1章 緒論

1. 1 本研究の背景

道路、橋梁、ダム、上下水道など社会資本（インフラストラクチャー）の多くは日常生活に必要であり経済活動を支える基盤である。1960年代から1980年代にかけて多く整備されたこれらの施設は建設後50年を超えつつあり老朽化が顕在化している。インフラの劣化進行により橋梁の崩落や道路の陥没など安全性の低下が懸念され、緊急補修などのコストが急増する。災害時の発生リスクも高まり、発生により災害復旧に多額のコストが掛かり、物流の停滞など経済損失も発生する。老朽化したインフラの再整備は多大なコストと時間を要する。国や地方自治体など財政負担が増大し、環境への影響や土地利用の問題も伴う。そのため既存インフラの維持・改修を優先しつつ、必要に応じて新設を検討するバランスの取れた戦略が求められる。これらは10年以上前から指摘され続けている。インフラの持続的な維持管理のためには適切な点検・診断技術の導入、計画的な補修・更新が不可欠となる。点検には従来技術の目視点検等が行われているが点検箇所が増大により負担増となる。さらに危険の恐れのある個所には伸縮計や光波観測などが行われているが、最新技術の活用により効率的な運用が期待されている。最新技術の一つに自動車の自動運転の要素技術に数えられるMMS（モービルマッピングシステム）などがある。各種計測機器を搭載し、3次元位置情報を取得しながら車両走行中に周辺の道路構造物を始め地形データなどを高精度で効率よくデータ取得する。SLAM技術を利用した携帯型レーザーシステムなども利用されている。また近年建設業界において進んでいるデジタル技術を含むICT技術がある。UAV(Unmanned Aerial Vehicle)や地上レーザー計測機を利用した地形測量技術により点群データを利用したデジタル管理が可能となっている。図1-1-1にインフラの老朽化の現状をまとめた国土交通省の資料を示す。

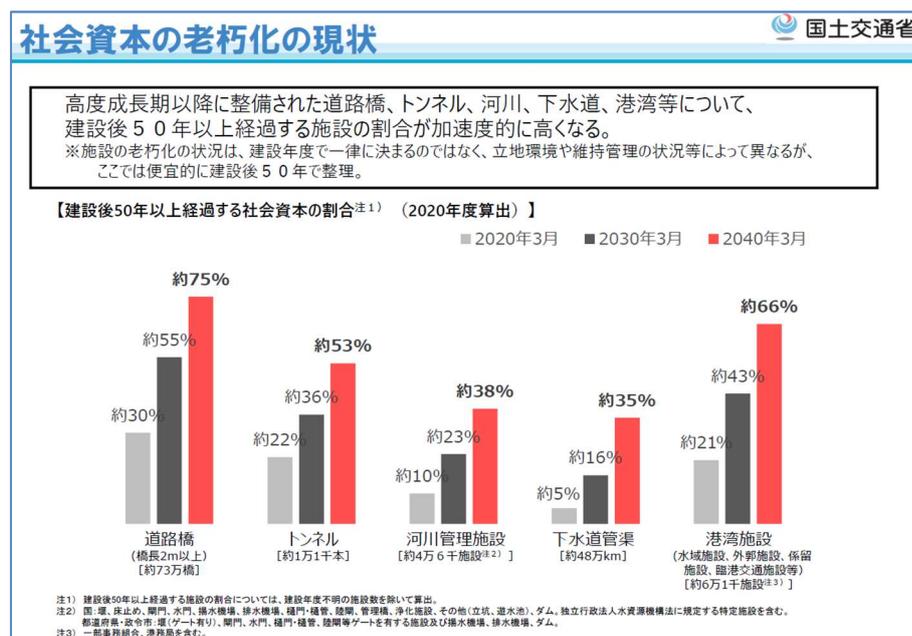


図1-1-1 社会資本の老朽化の現状

日本の人口は近年減少局面を迎えており、2070年には総人口が9000万人を割り込み、高齢化は39%の水準になると厚生労働省で推計されている。労働人口の減少にともない多くの産業に影響を及ぼすとされているが、既に建設業では就業者の減少や高齢化が深刻な問題となっている。インフラの維持管理を担う自治体職員も減少しており、全国の4分の1の市町村は技術系職員が配置されていないなどの状況により、老朽化が進むインフラの適切な点検や維持管理が十分に行えない自治体が増えている。特に小規模自治体では専門的な技術を持つ職員の確保が難しく、外部のコンサルタント等に依存せざるを得ないケースが多い。しかし財政的な制約や人材確保の困難さから十分な対応ができずインフラの劣化が加速する懸念がある。地方自治体は道路、橋梁などの土木施設に加え、学校、公共施設など多岐にわたるインフラを維持管理する必要がある。人的不足により施設ごとの老朽化状況や修繕履歴の管理が煩雑となり、適切な維持管理計画を策定することが難しくなる。建物の計画から維持管理まで一貫した管理をおこなう技術にBIMがあり、建築分野では世界中で国策として研究され実務レベルで利用されつつある。土木分野では建築BIMに変わりBIM/CIM施策がとられている。特に点検分野においての人的不足は深刻な課題となっており、地域住民の意識を高め、持続可能な維持管理体制の構築が求められている。図1-1-2にインフラの管理体制の現状を示す。国、高速道路会社などよりも県・政令市の割合が高く、市町村の管理割合が最も多いことがわかる。

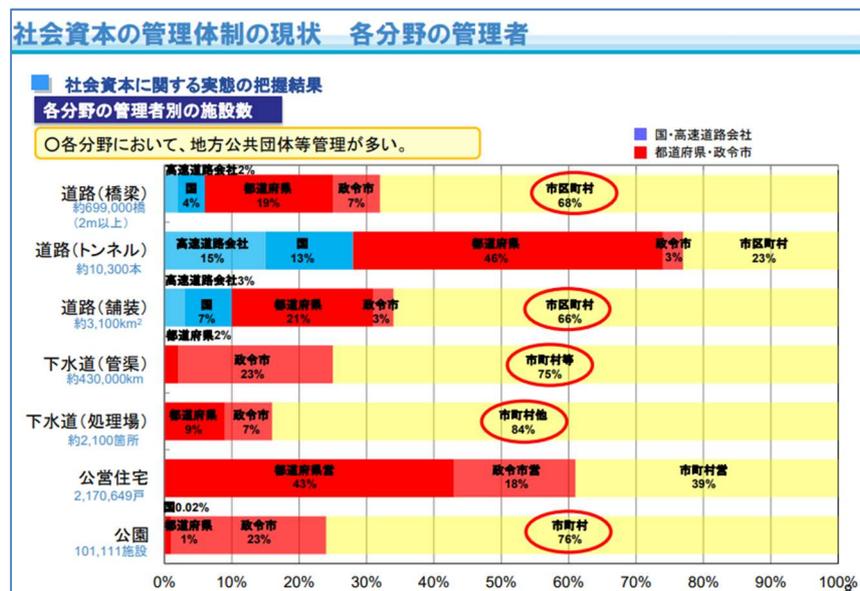


図1-1-2 社会資本の管理体制の現状

維持管理時のコスト削減などの効率化には、DX（Digital Transformation）など新しい概念が必要となる。DXという言葉は2018年に経済産業省が発表した「DXレポート」により注目を集めている。建設業においても建設DXという言葉が浸透している。建設業のIT化もしくはデジタル化は20年以上前から国が主導となり業界全体の取り組みとして早期に開始されていた。建設業におけるDX化はCALS構想から始まったと考える。1980年代にアメリカ合衆国でIT革命と共にCALS/EC（Continuous Acquisition and Life-cycle Support/Electronic Commerce）が提唱された。日本では公共事業の効率化や透明性の向上などを目的に1990年代に国土交通省で建設CALS/ECが始まった。CALSは「継続的な調達とライフサイクルの支援」、ECは「電子商取引」を意味する。「公共事業支援統合情報システム」として主に電子納品と電子入札システムの策定から始まった。2000年代に入りパソコンの低価格化と共にエクセル、ワードといったソフトウェアを利用した書類及びデジタルカメラを利用した写真管理などのデジタル化が進み、設計図面は2DCADが普及した。CALS/ECでは情報取得手段の一つとしてTS出来形等の情報化施工管理の整備が始まった。建設CALSのイメージを図1-1-3に示す。

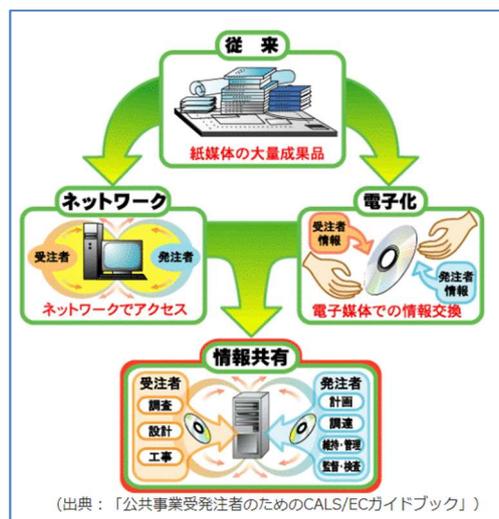


図 1-1-3 建設 CALS のイメージ

建設 CALS がデジタル化において一定の成果を得られると、次の施策として CIM (Construction Information Modeling/Management) の導入が検討され、2012 年に提言された。CIM は建築における BIM (Building Information Modeling) を土木業務に適用したものである。BIM は 2000 年代にアメリカ合衆国で考案され、その後ヨーロッパに広まり基準等が各国で確立されて世界中に普及している。BIM で作成されるデータはコンピュータ上に作成した建物の 3 次元デジタルモデルに管理情報などの属性データを追加したものである。CIM を導入することにより電子納品などのデジタル化からデジタルライゼーションといったデータを活用する段階に進化させ BIM と同様に調査から維持管理まで一貫して情報を共有・活用できるようになる。CIM は国内用語であり世界的には infraBIM など BIM の一部として認識されている。CIM は BIM/CIM へと名称を変更している。3DCAD ソフトウェアと BIM/CIM ソフトウェアには違いがあり、3 次元モデル作成は BIM/CIM 専用ソフトなどを利用する機会が多い。2023 年に BIM/CIM の普及を目的として国土交通省直轄工事で原則適用となった。BIM/CIM のイメージを図 1-1-4 に示す。また、BIM/CIM で利用される鉄筋データを図 1-1-5 に示し、シミュレーション例を図 1-1-6 に示す。



図 1-1-4 BIM/CIM のイメージ

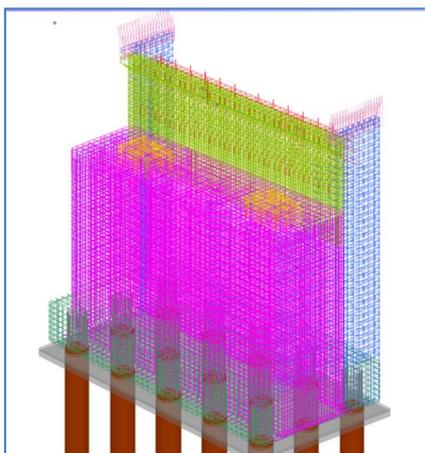


図 1-1-5 鉄筋モデル



図 1-1-6 シミュレーションモデル

建築 BIM の視点で見ると BIM とは建物情報をモデル利用して管理することであり、誰が維持管理しているシステムか？を考える必要がある。世界中で広まっている BIM 視点ではモデルがなくても建物を維持管理するシステム構築が優先傾向という考えがある。BIM/CIM とは誰が管理しているシステムか？を考えると建設業者ではなく発注者であり建設業者が BIM/CIM データを作成するのではなく BIM/CIM データを利用して工事の効率化をはかる部分利用に限定される。

一方で、現場施工では 1970 年代から情報化施工の研究・開発がはじまり、1990 年代には人工衛星や光学系測量機器を利用した建設機械が開発された。2000 年代には情報化施工として ICT (Information and Communication Technology) と呼ばれる情報通信技術を利用した施工が推進された。2016 年生産性向上と魅力的な建設現場の目指す取組みとして i-construction(以下 i-con)が提唱された。従来の情報化施工から ICT 施工と名称が変更され、ガイドライン等の基準類が整備された。ICT 施工は主に現地測量及び機械施工また出来形帳票において効率化される。現地測量では従来の測点管理から面として全体の出来形管理を行うことができ、安全に正確な土量算出が可能となる。またデータは現場を立体的に把握することができ、経験の浅い職員にも容易に現場を理解され、問題点を早期に発見できる。機械施工ではマシンコントロール (MC) といった ICT 建機を利用することで効率的でより正確な施工が可能となる。国土交通省直轄工事では ICT 施工の普及率が高まり、2025 年度より土工と河川浚渫工において原則適用となる。また、次の施策として i-con2.0 が策定されている。これまでの効率化重視から少子化を意識した省人化へとより高度な内容となる。i-con2.0 の実現により CALS から始まったデジタル化は建設 DX まで進化すると考える。I-con2.0 のイメージを図 1-1-7 に示す。

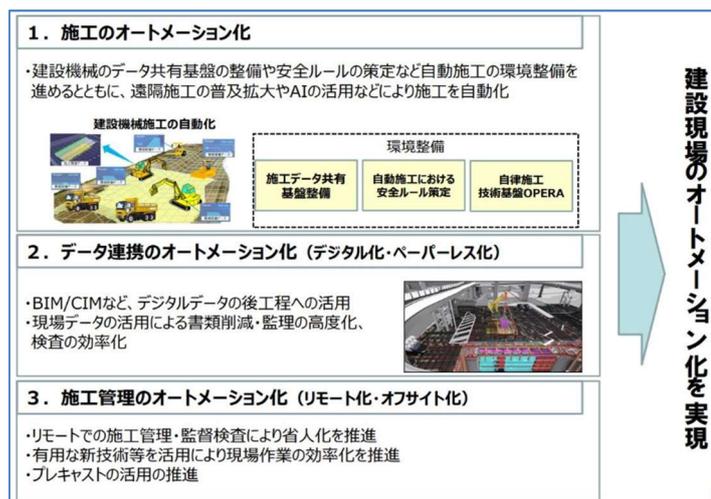


図 1-1-7 i-construction2.0 イメージ

1. 2 ICT 施工の概要

i-con は国土交通省が推進する建設業の生産性向上施策である。主に建設現場の効率化に重点がおかれ、図 1-2-1 のように説明されている。適用範囲は図 1-2-2 のように調査から維持管理にいたるまでの全工程において実施されることを目的としている。i-con 施策の中でもとくに ICT の全面的な活用 (ICT 土工) に注力している。トップランナー施策を図 1-2-3 に示す。ICT 施工の大きな流れとして大きく 5 つの段階に分類している。ICT 施工概要を図 1-2-4 に示し、ICT 施工の主な流れを図 1-2-5 に示す。

国土交通省で「ICTの全面的な活用 (ICT 土工)」等の施策を建設現場に導入することによって、建設生産システム全体の生産性向上を図り、もって魅力ある建設現場を目指す取組である i-Construction (アイ・コンストラクション) を進めています。

図 1-2-1 参照 i-construction・インフラ DX 推進コンソーシアム HP

調査・測量から設計・施工・維持管理までのあらゆるプロセスで ICT 等を活用して建設現場の生産性向上を図る

図 1-2-2 参照 i-construction・インフラ DX 推進コンソーシアム HP

トップランナー施策 (主な3つ)

- ① ICTの全面的な活用 (ICT 土工)
- ② 全体最適の導入
- ③ 施工時期の標準化

図 1-2-3 トップランナー施策

【ICT施工概要】

大きく分けて

- ① 3次元起工測量
- ② 3次元設計データ作成
- ③ ICT建設機械による施工
- ④ 3次元出来形管理等の施工管理
- ⑤ 3次元データ納品

図 1-2-4 ICT 施工概要

ICT活用工事の施工事例



図 1-2-5 ICT 施工の主な流れ

ICT 施工は、公共工事での活用事例が多く、起工測量や出来形測量に加えて、仮置き土量算出などにも応用できる。また、民間の土木工事や建築工事においても有効である。

建築工事においては、ICT 建機を 3 次元設計データの代わりに平面図のみのデータで活用できるような仕様となる。この場合、高さのみを管理し、斜め掘削箇所についてはオペレーターの判断が求められる。特に地中梁の掘削などに利用されることが多い。メーカーへの聞き取りでは、利用の判断目安として 3000m³ が挙げられていた。オペレーターへの聞き取りによると、MC の機能を OFF にし、MG として利用していた。これは、MC ではデータに不具合があると建機が急停止し、意図しない挙動を避けるためである。また、自動掘削は動作が遅いため、同様の理由で敬遠されることもある。

民間の土木工事においても同様に ICT 施工を活用でき、特に広範囲に及ぶ造成現場ではメリットがある。異なる時点の点群データ（2 時期データ）を活用し、差分解析によって体積を算出することが可能である（図 1-2-6）。また、点群と 3 次元設計データを併用することで体積を算出できるだけでなく、視覚的に進捗を確認しやすくなる。（図 1-2-7）



図 1-2-6 点群と点群の差分解析



図 1-2-7 点群と 3 次元設計データ比較

従来の施工から ICT 施工への移行にはいくつかの変更点がある。測量方法では、従来の光波測距儀などを用いた変化点ごとのデータ取得から、ドローンを活用した UAV 測量や地上型レーザースキャナーを用いた点群データの取得へと変化している。普及が進み、現在では点群データを活用した測量が一般的となりつつある。

建設機械についても、従来の建機からシステムを搭載した ICT 建機へと移行が進んでいる。ただし、普及率はまだ低く、主に ICT 施工を目的とした現場での利用にとどまっている。また、出来形管理や検査帳票ではヒートマップ型帳票が活用されている。

設計段階では必ずしも高精度な測量が求められるわけではなく、調査・設計用の測量が行われる。しかし、工事着手までの間に地形が変化する可能性がある。起工測量とは、工事着手前に現場の形状を把握するために行う測量であり、必須の工程である。従来との比較を図 1-2-8 に示す。

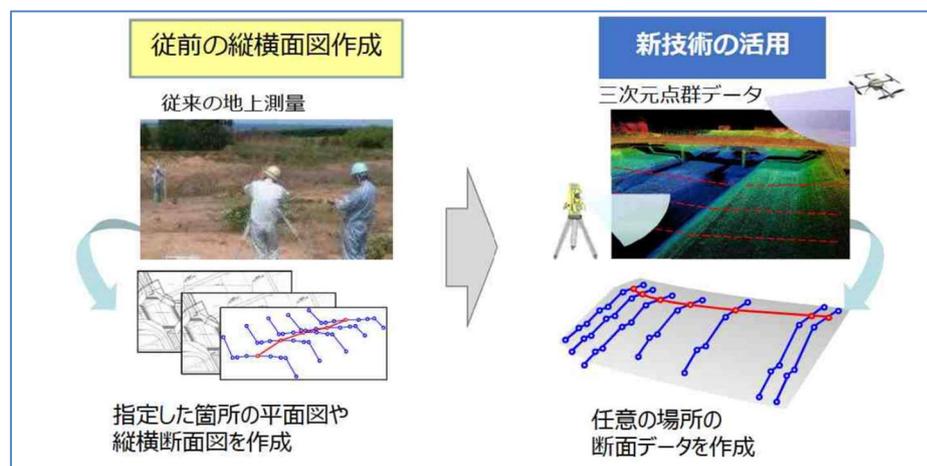


図 1-2-8 起工測量の比較

参照 国土地理院 「公共工事における測量新技術への取り組み」資料

UAV 測量

UAV 測量に利用されるドローンは国内外でさまざまな機種が生産されており、一概に分類することは難しい。しかし、本研究では説明のために、業務用大型ドローンと小型汎用ドローンの2つに分ける。

業務用大型ドローンは積載量が多く、カメラの交換が可能で、LiDAR 機器などの搭載にも対応している。主に測量業者やコンサルタントなどが所有し、実務で利用されることが多い。一方、小型汎用ドローンはカメラと本体が一体化しており、手軽さがメリットである。ただし、カメラの性能によっては、測量時に低高度撮影が必要となる。こちらは施工会社などで利用される場合が多い。

ドローンの分類方法はさまざまあるが、本研究では業務用大型ドローンと小型汎用ドローンに区分する。業務用大型ドローンを図 1-2-9 に、小型汎用ドローンを図 1-2-10 に示す。また、UAV 測量が困難な場合には地上型レーザー測量が利用される。地上型レーザー扫描仪を図 1-2-11 に、測量の実例を図 1-2-12 に示す。



図 1-2-9 業務用大型ドローン



図 1-2-10 小型汎用機ドローン



図 1-2-11

地上型レーザー扫描仪 (GLS2200)



図 1-2-12

地上型レーザー扫描仪の測量例

事前準備

UAV 測量を実施するためには事前準備が必要となる。100 g 以上の機体は本体購入時には2022年6月より無人航空機の登録が義務化されている。登録はドローン情報基盤システム2.0上にて行う。飛行計画通報機能を図 1-13 に示す。機体への登録記号の表示に加え電波で機体の識別情報を発信するリモート ID 機能を搭載させる必要がある。市販の機体については内蔵されている場合が多く、設定が必要となる。航空法その他、小型無人機当飛行禁止法など複数の法律を遵守する必要があり、実務においては包括申請など飛行許可・承認手続きをとる。2022年12月より無人航空機の飛行に関して国で発行する無人航空機操縦士の資格及び無人航空機の認証制度が開始されている。2022年12月より飛行実績の報告が任意となり飛行日誌の作成が義務化された。ドローン基盤情報システムの入力画面を図 1-2-13 に示す。

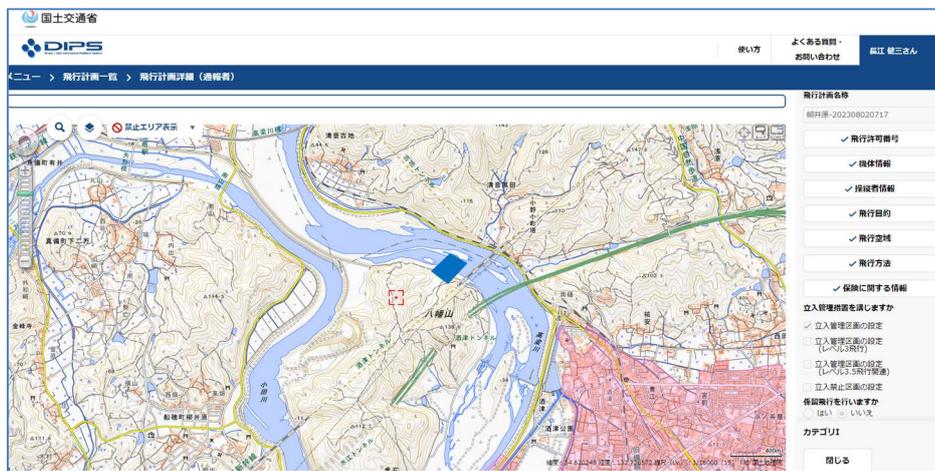


図 1-2-13 ドローン情報基盤システム (DIPS2.0) の飛行計画通報機能

カメラ性能

UAV 測量で使用するカメラ性能には制限がある。カメラ性能の一覧を図 1-2-14 に示す。焦点距離はカメラレンズの中心とフィルムに相当する撮像素子面との距離を表す。焦点距離によって写る範囲（画角）が変動する。広い範囲を撮影する広角レンズ、遠くの被写体を大きく撮影する望遠レンズなどがある。望遠レンズは背景がボケやすく測量にはやや広角が向いている。広角すぎると写真の歪みが大きくなり誤差の原因となる。ズーム機能を利用し焦点距離変更は異なるカメラで撮影したと同条件となるため焦点距離は基本的に固定設定となる。広角レンズの場合のみ焦点設定は無限遠設定が向いている。露光時間はレンズに光を取りこむ時間を表しシャッタースピード設定により時間を調整する。絞りはF 値とも呼ばれておりレンズを通る光の量を調整するとともにピント範囲も影響する。基本的にF 値は固定となる。ISO 感度は基本数値 100 で電気信号を増幅させ光量を増やすことで数値があがる。数値が大きくなるとノイズが発生するため測量時には 100 設定が基本となる。露光時間、絞り、ISO 感度はそれぞれ要素が「露出の三角形」といわれ相互に関係するためバランスをとる必要がある。失敗した写真は白とび又は黒つぶれといった現象がおこる。

<p>(使用するデジタルカメラの性能等)</p> <p>第 2 4 条 撮影に使用するデジタルカメラの本体は、次の各号の性能及び機能を有することを標準とする。</p> <ul style="list-style-type: none">一 焦点距離、露光時間、絞り、ISO 感度が手動で設定できる。二 レンズの焦点の距離を調整したり、レンズのブレ等を補正したりする自動処理機能を解除できる。三 焦点距離や露光時間等の情報が確認できる。四 十分な記録容量を確保できる。五 撮像素子サイズ及び記録画素数の情報が確認できる。 <p>2 撮影に使用するデジタルカメラのレンズは、単焦点のものを標準とする。</p>

図 1-2-14 デジタルカメラの性能等

SfM/MVS 解析

ドローン等によって得られた複数枚の空撮写真データを利用し、SfM/MVS 解析ソフトウェア利用し解析を行い点群データ化する。SfM (Structure from Motion) は写真測量の空中三角測量 (Aerial Triangulation) と同様に空撮複数写真データからカメラの位置と姿勢と三次元対応点 (タイポイント) の位置を同時に最適化するバンドル調整を行う。MVS は SfM 処理で推定した画像特徴点とペア画像から点群モデルを構築する。SfM 処理と MVS 処理をコンピュータ上で自動処理する技術となる。空撮写真は図 1-2-15 のように一度に数十枚から数百枚撮影し解析を行う。SfM 処理によって得られたドローンのカメラ位置を図 1-2-16 に示す。

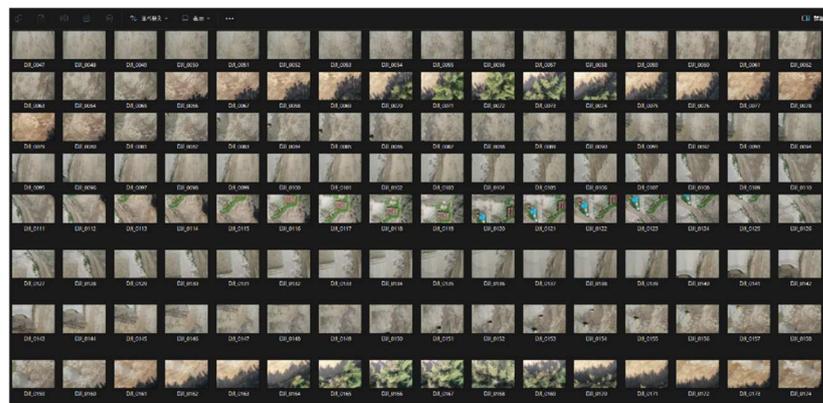


図 1-2-15 取得写真データ例

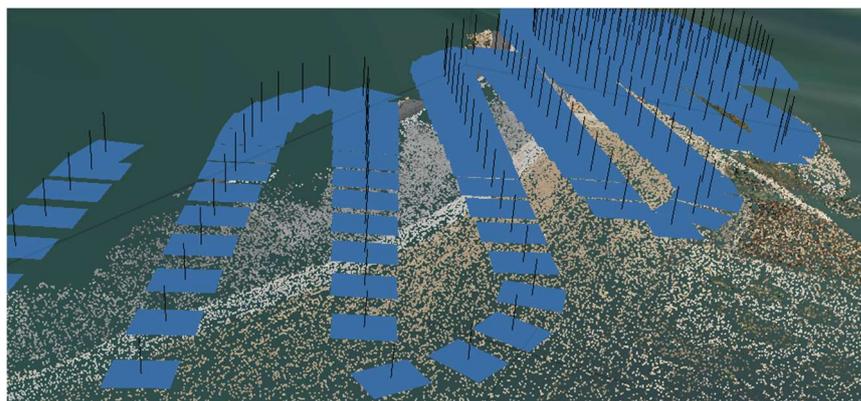


図 1-2-16 カメラの推定位置

地形測量など精度が要求されるデータ作成にはGCP（Ground Control Point）と呼ばれる位置座標を持つ既知点が複数必要となる。既知点認識にはチェック模様の対空標識等が利用される。自動的に番号を識別する専用の対空標識もあればGNSS機能付き対空標識などもある。取得したGCPはそれぞれSfM処理に利用する評定点とデータを精度確認するための検証点に分ける。対空標識の設置例を図1-2-17に示し、ソフトウェアで認識させた事例を図1-2-18に示す。



図 1-2-17 対空標識設置事例



図 1-2-18 認識された対空標識

UAV 測量において対空標識の設置手間が全体の半分以上占めており，効率化を目的に RTK-GNSS を利用した UAV 測量も利用され，写真測量ではなくドローンにレーザー機器を搭載した UAV レーザー測量も普及されはじめている．また目的に応じてスマホの LiDAR 機能を利用したものや移動体ハンディレーザーといった機器も利用されはじめている．RTK-GNSS 搭載型 UAV を用いた測量で利用する基地局を図 1-2-19 に示す．



図 1-2-19 ドローン専用 RTK 固定局

実際に取得した点群データは図のようになる。UAV 測量の中でもデジタルカメラを利用した空中写真測量と LiDAR スキャナー機器等を搭載したレーザー測量等がある。写真測量では雑草等が繁殖している場合、その表面が点群データとして取得することになる。そのため、事前の伐採等の下準備が必須となる。工程短縮のみを考慮した場合、工事現場の周囲に仮 BM 設置等のトラバース測量に併せて対空標識の設置と測量を行い、併せて UAV 測量を実施しておく方法がある。LiDAR 機器を使用した場合では堆積した落葉等もあり実際の地表より高く出る傾向があるので、現地確認が必須となる。また、LiDAR 機器は高価なため所有業者も限られてくる。LiDAR 機器等を利用した工程短縮方法では伐採前にデータを取得することで地形の大まかな測量ができ、概算数量の把握ができることで伐採期間中に事前計画を立てるなどの効率化ができる。地形の点群データ例を図 1-2-20 に示す。



図 1-2-20 地形の点群データ

UAV 測量はドローン墜落に対する対応が重要になる。墜落の原因としてはバッテリーやセンサー故障などの技術的な課題と過信による人為的なミスそして天候などの環境要因がある。実務経験から部品消耗と電波障害そしてバッテリーの取り扱いが重要と考える。部品消耗についてはプロペラ等目視点検で判断できるものもあるがパッケージ化された機種が多く、モーターやその周辺機器等の点検ができない。モーター関連の故障では突然落下の可能性がある。対策として飛行時間との関連性があるが年数制限などの規制が必要と考える。

電波障害では例えば汎用ドローンに利用する 2.4Ghz はチャンネル数が 14 あるものの 1 つのチャンネル幅が規格上 22Mhz であるため、実際に利用できるのは 3~4 つになる場合がある。市街地など Wi-Fi 電波が錯綜する環境では、電波遮断の危険性がある。対策には電波法による知識習得を奨励する。UAV に限らず ICT 建機等は情報通信技術を利用する。電波の知識不足によりドローンの墜落、ICT 建機等の無線によるトラブル等の事例もある。アンテナ方向に対しても留意する必要がある。図 1-2-21 のようにマニュアルに記載されている。電波に関する資格は趣味利用であればアマチュア無線が該当し、業務利用であれば陸上特殊無線技士 3 級取得を推奨する。

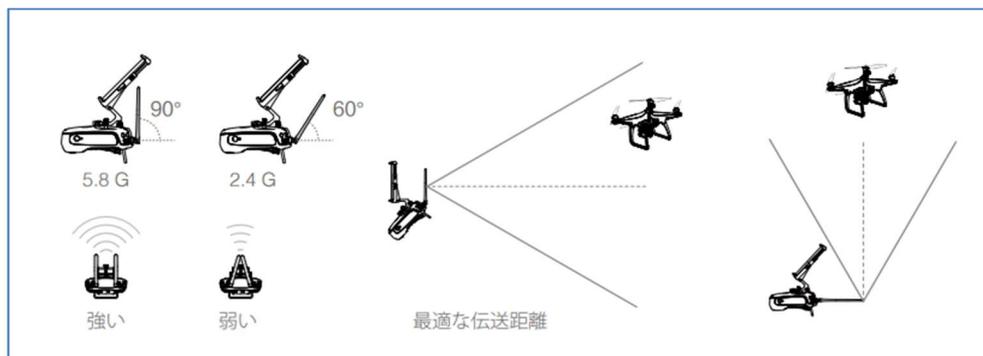


図 1-2-21 参照 DJI Phantom マニュアル

特に注意が必要なのがバッテリーとなる。ドローンに利用されているバッテリーの種類にはリチウムイオンバッテリーとリポバッテリーがあり、リポバッテリーの方が採用率は高い。軽量、高出力といったその特徴があるが取り扱いに注意する必要がある。市販のドローンにはインテリジェントフライトバッテリーが採用されている。

ICT 施工では ICT 建機に搭載する 3 次元データを事前に作成する。データを作成するにはその特徴を理解する必要がある。ICT 施工ではサーフェスデータを利用する。サーフェスデータは主に TIN と呼ばれる不整三角網で表され、主に地理情報システム (GIS) で利用されるための、地表面を三角形の集合で表現するデジタル構造となる。簡易な TIN データ例を図 1-22 に示し、その活用方法を図 1-2-23 に示す。3 次元設計データの作成は平面要素、縦断要素、横断要素をそれぞれ手順に従いコンピュータ上で入力し作成する。3 次元設計データ作成方法はソフトウェアに依存しており、利用するソフトウェアによりデータ作成方法が異なる。

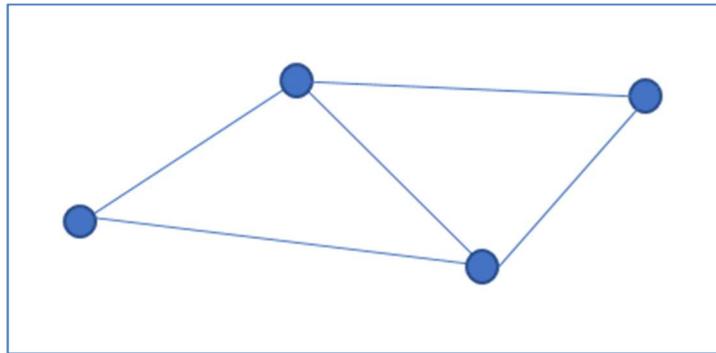
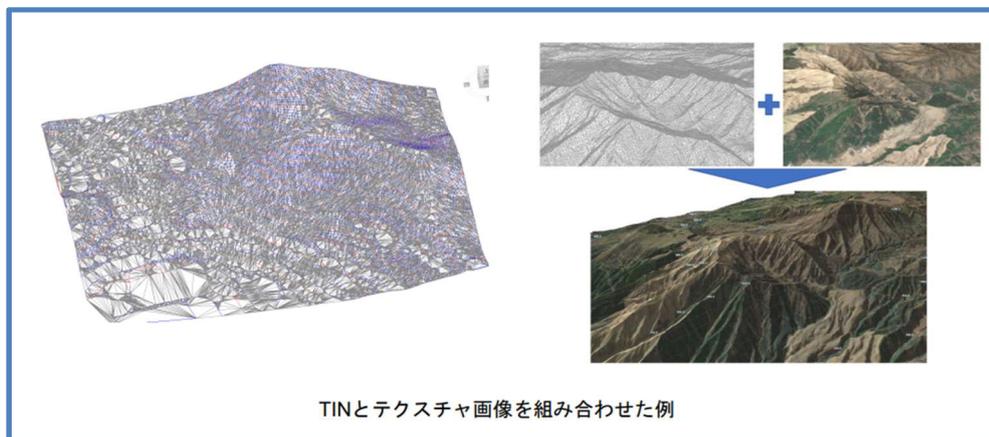


図 1-2-22 TIN データ



TINとテクスチャ画像を組み合わせた例

図 1-2-23 点群データの組合せ例

設計段階から施工段階へ引き継がれる設計図面は 2DCAD データとなる。公共工事では異なる CAD 間対応で利用される中間ファイルには SXF 形式が標準となる。公共工事以外では DXF 形式が多い。SXF 形式は国内基準であり、海外製ソフトを利用する場合にはそのままでは利用できない場合がある。SXF 形式は P21 (STEP ファイル) と SFC (Scadec Feature Comment ファイル) の 2 種類があり、発注者によりどちらかとなる。国土交通省では国際標準に対応できる P21 が標準となり、県市町村ではデータ容量が軽い SXF 利用が多い。またレベル 1 から 4 まで存在し、バージョン管理もされている。2DCAD ではミリ単位が標準となる。3DCAD を含む 3D 関連ソフトは座標値を取り扱うためメートル単位が多く設定時に理解しておく必要がある。

ICT 施工など点群等を扱う業務では、測量座標と数学座標の適切な使い分けが求められる。測量座標系は実際の施工や管理の位置情報に用いられる。一方、数学座標系は、三次元点群データの解析やモデリングにおいて使用される。実務では各種ソフトウェアを活用したデータの統合・管理が不可欠となっており、測量データを解析ソフトウェアに取り込む際、測量座標と数学座標の違いを考慮する。ソフトウェアごとの座標系の違いを理解し、適切に変換・適用することが重要である。3D データの違いを図 1-2-24 に示す。

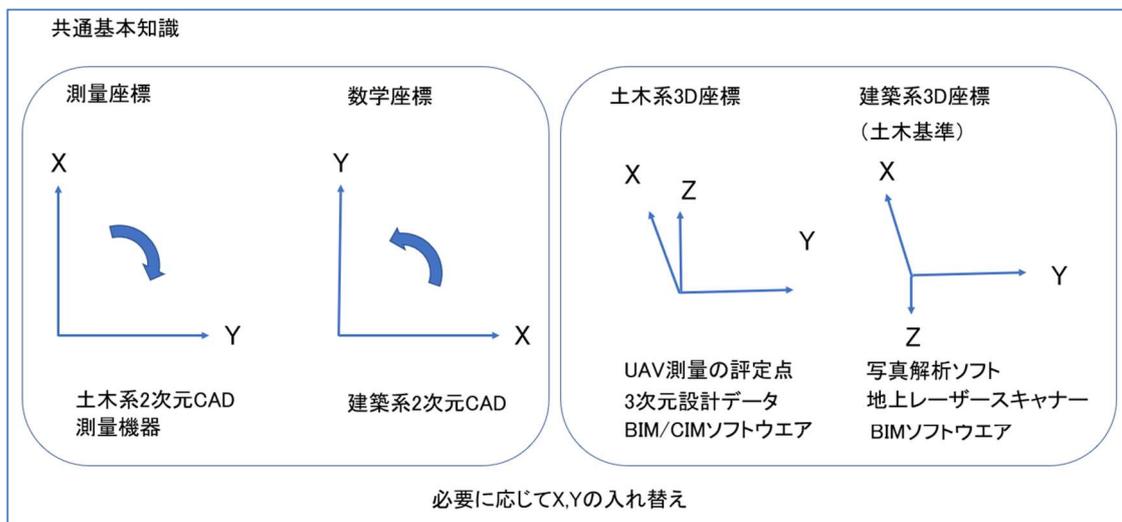


図 1-2-24 3D データの違い

3次元設計データ作成概要

3次元設計データの作成が可能な複数のソフトウェアが市販されている。本研究では福井コンピュータ社製の2次元CAD（武蔵）を使用する。3次元設計データ作成には準備作業が必要となる。平面図，縦断面図，横断面図等の個別2次元CADデータをまとめて図面データとして一つのデータにまとめる。統一データを図1-2-25に示す。それぞれの図面は1つのデータ上でのタブを切り替えることで表示も切り替わる。

タブによる切り替えを図1-2-26に示す。データ作成後，縦断面図，横断面図は図面縮尺が合っているか確認する必要がある。寸法チェック時の確認作業を図1-2-27に示す。



図 1-2-25 図面アイコン



図 1-2-26 とりまとめた図面の選択



図 1-2-27 図面の縮尺確認

3次元設計データの作成方法

通常のCADデータでは平面図，縦断図，横断図を1つのデータとしてまとめることができる。平面要素では平面図を利用し中心線形データを作成する。主要点の座標値は主に線形計算書を利用する。印刷物の場合が多く，手入力によると手間が掛かり，打ち間違い等もある。そこでスキャナーで読み込みOCR機能を使い，ソフトウェアにデータ入力した。一方で主要点座標をCADデータ化した設計図面もあり，ソフトウェアの機能を利用してデータ登録ができるので最も簡素化できる。

エレメント法とIP法の2種類があり利用用途によって使い分ける。実現場例ではエレメント法は主に道路現場で利用し，IP法は河川現場で利用している。

エレメント法とIP法による要素データ入力の違いを図2-2-30に示す。

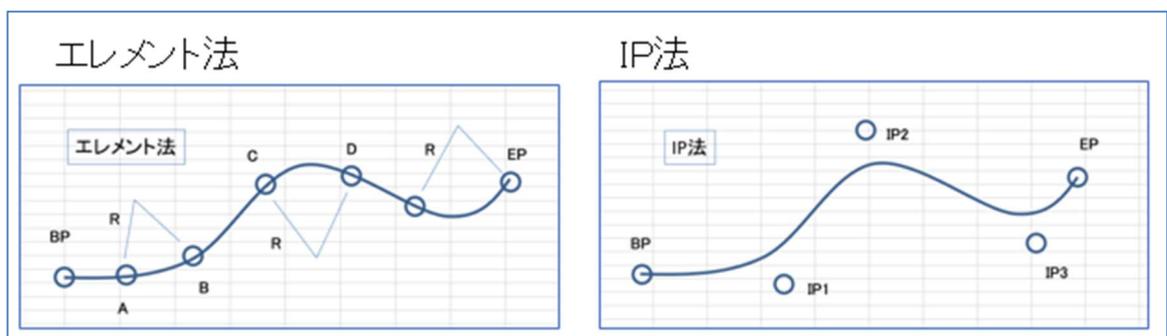


図 1-2-30 エレメント法とIP法の違い

エレメント法は主に主要点座標と曲線要素等をエクセル様式で入力する。入力時の画面を図1-2-31に示す。

No.	IPNo	IP番号	IP点名	主要点番号	主要点点名	X座標	Y座標	タイプ	カーブ	R1
1				6	PCC 14-2	-167647.022252	-72164.434556	IP点		
2	1			7	EC 14-1	-167920.263858	-72494.702246	線曲線	右	1000.000
3				3	KA 14-1	-167008.287227	-72920.327206			
4				4	KE 14-1	-167166.874122	-72941.209212			
5				13	IP.14-1	-167279.562352	-72948.705405			

図 1-2-31 線形要素入力画面

特にバイパス等の現場では様々な曲線を描いて設計されている場合もあり、一部分だけのデータ入力の場合、エレメント法が効率化できる。実現場での線形データを図 1-2-32 に示す。

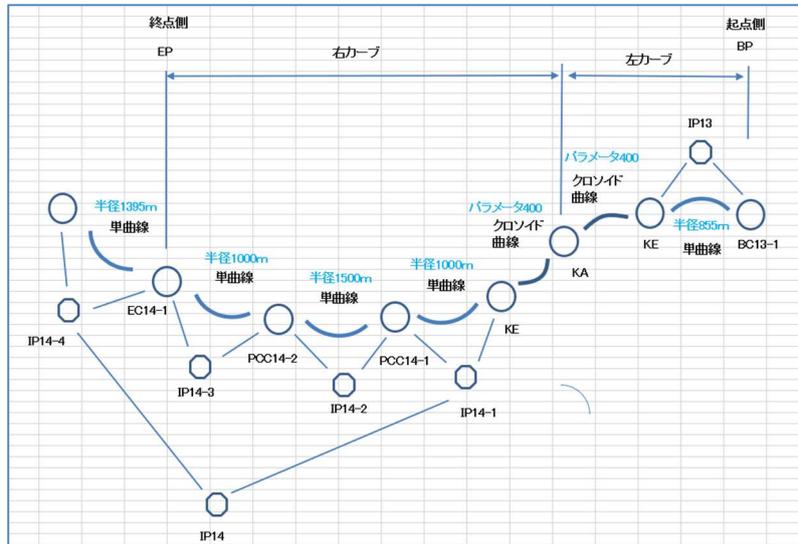


図 1-2-32 実現場での線形要素

IP 法は起点、IP 点、終点を平面図データ上でクリックすると作成できる。

主要測点の座標も自動計算される。一方で改修工事などは主要線形と異なる場合もあり、データ作成が困難となる。実際に作成した平面図を図 1-2-33 に示す。

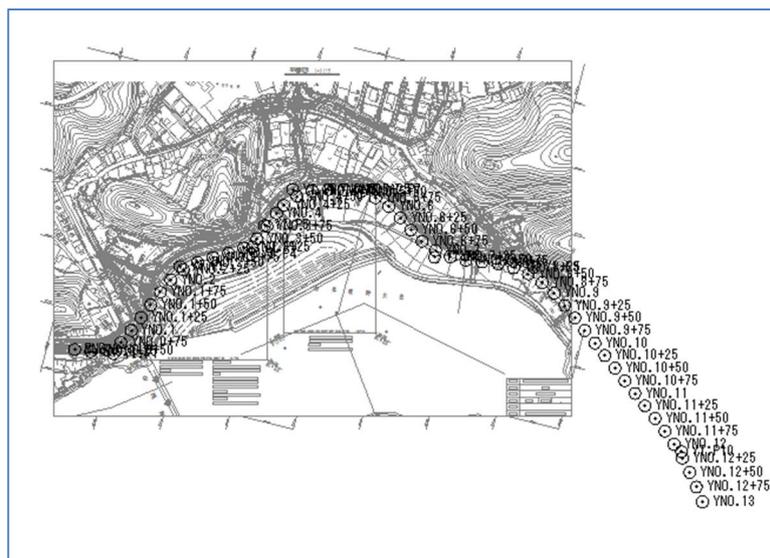


図 1-2-33 線形要素を入力後の平面図

縦断図も同様に縦断要素を入力し作成する。また、横断図については変化点毎に図面上で形状をクリックすることで作成する。例えば横断データは道路工事などでは20m毎の設計データはあるが、現場で利用するには変化点毎のデータ作成が必要となる。一から横断図作成となるため、設計の意図を理解しながらとなり手間が掛かる。施工会社ではCADが導入されているものの、主な目的は図面を見るだけの場合が多く、軽微な変更修正に限られる。設計会社と施工会社で利用するCADが違うのはその目的が異なるからであり、施工会社が利用するCADはCADとしての機能よりも操作の簡易性と測量機能が充実している。

三次元設計データ作成の取組事例

真備緊急治水対策プロジェクトの一部である河川堤防築堤工事での三次元設計データ作成時の取組みを示す。この工事は緊急発注のためデータ作成前より途中変更ありきと聞いていた。そのため、データ作成後の修正が容易になるようにした。

3次元設計データの作成は専用ソフト又はその機能をもったソフトウェアを利用するのが一般的となる。ソフトウェアにより作成機能、作成手順等も違い、ソフトウェア間の互換性も実施後に判明する。ソフトウェアの優劣ではなく、それぞれ長所短所がある。今回の事例では工事現場の配置職員と打合せをしながら本社でデータ作成をした。作成ソフトウェアは武蔵の2次元CAD（福井コンピュータ製）を利用した。作成したデータを図1-2-34に示す。

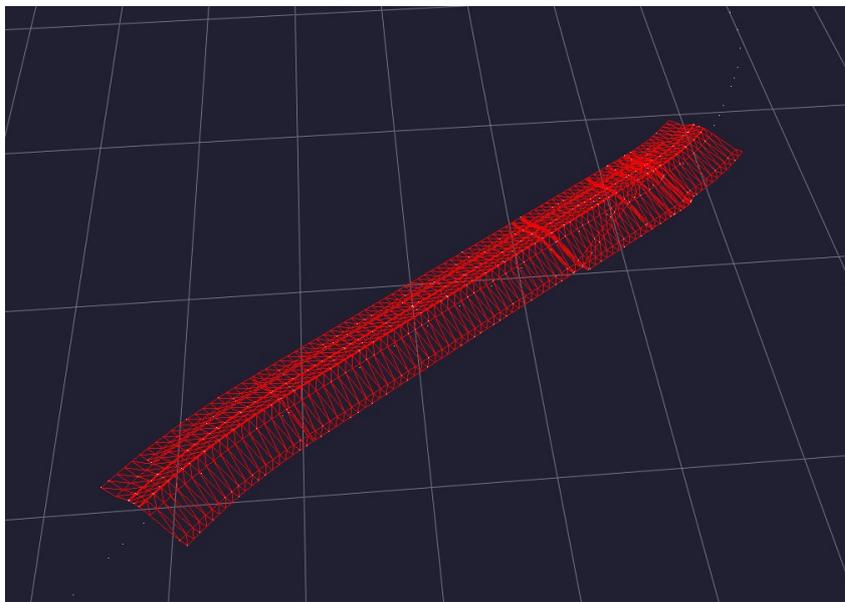


図 1-2-34 三次元設計データ

基本知識と準備作業

今回利用した平面図，縦断面図，横断面図をそれぞれ図 1-2-36，図 1-2-37，図 1-38 に示す。

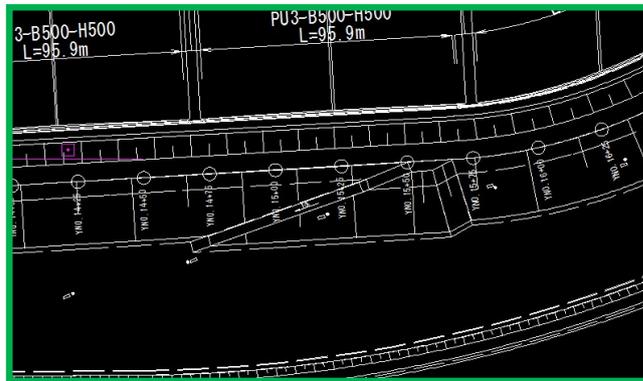


図 1-2-36 平面図

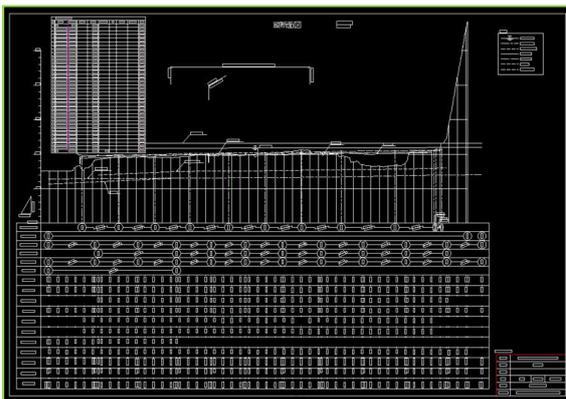


図 1-2-37 縦断面図

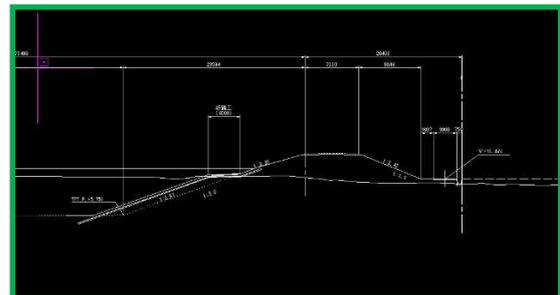


図 1-2-38 横断面図

主要座標データの登録

主要データの登録を図面データに登録する必要がある。図 1-2-39 に示す線形計算書を受領するケースが多く、座標データは紙もしくは PDF が多い。システム上に座標を打ち込むのは手間がかかり、誤入力の原因となり非効率となる。エクセルデータを取り込む機能があるので、一旦エクセルデータ化する。紙ベースのデータからスキャナー等を利用して PDF 化したデータは数値が認識できない場合がある。文字認識が難しい PDF でも OCR 機能の優れたソフトウェア利用により数値データ化可能となる場合が多い。

No.	測点	X座標	Y座標	接続方向角	弦長	弦方向角
1	120+02.2634	-167.484.4544	-73.042.0188	208-04-59.30	17.6318	208-25-07.00
2	120+26.0000	-167.469.9614	-73.050.4100	208-45-19.88	19.9997	209-08-14.98
3	120+40.0000	-167.487.4306	-73.060.1480	209-31-10.08	19.9999	209-54-05.18
4	120+60.0000	-167.504.7682	-73.070.1181	210-17-00.28	19.9999	210-39-55.38
5	120+80.0000	-167.531.4716	-73.080.2183	211-00-20.17	19.9999	211-25-45.57
6	121+00.0000	-167.559.0268	-73.090.7474	211-48-40.07	19.9999	212-11-38.77
7	121+20.0000	-167.555.9618	-73.101.4028	212-34-30.87	19.9999	212-57-25.97
8	121+40.0000	-167.572.7432	-73.112.2830	213-20-21.07	19.9999	213-43-18.17
9	121+60.0000	-167.589.8781	-73.123.8984	214-06-11.24	19.9999	214-29-08.36
10	121+80.0000	-167.605.8634	-73.134.7097	214-52-01.46	19.9999	215-14-56.56
11	122+00.0000	-167.622.1963	-73.146.2523	215-37-51.66	19.9999	216-00-46.76
12	122+20.0000	-167.638.8730	-73.158.0115	216-23-41.84	10.7724	216-36-02.58
13	122+30.7722	-167.647.9222	-73.164.4340	216-48-23.20		

No.	測点	X座標	Y座標	接続方向角	弦長	弦方向角
13	122+30.7722	-167.647.9222	-73.164.4340	216-48-23.20	10.2273	217-04-14.84
14	122+40.0000	-167.654.3846	-73.169.9968	217-20-06.48	19.9997	217-54-29.13
15	122+60.0000	-167.670.1643	-73.182.2843	218-28-51.78	19.9997	219-03-14.42
16	122+80.0000	-167.685.6930	-73.194.8851	219-37-37.07	19.9997	220-11-39.73
17	123+00.0000	-167.700.9708	-73.207.7943	220-46-22.37	10.9997	221-20-45.07
18	123+20.0000	-167.715.9853	-73.221.0061	221-55-07.66	19.9997	222-29-30.01
19	123+40.0000	-167.729.7324	-73.234.3154	223-03-59.24	19.9997	223-38-15.61
8	123+60.0000	-167.745.2066	-73.248.3173	224-12-38.20	19.9997	224-47-00.90
9	123+80.0000	-167.759.4018	-73.262.4056	225-21-23.55	19.9997	225-55-46.20
10	124+00.0000	-167.773.3125	-73.276.7751	226-30-08.85	19.9997	227-04-31.50
11	124+20.0000	-167.788.9330	-73.291.4159	227-38-54.14	19.9997	228-13-16.79
12	124+40.0000	-167.800.2578	-73.306.3341	228-47-39.44	19.9997	229-22-02.09
13	124+60.0000	-167.813.2818	-73.321.5118	229-56-24.74	19.9997	230-30-47.38
14	124+80.0000	-167.825.9996	-73.336.9470	231-05-10.03	19.9997	231-39-32.68
15	125+00.0000	-167.838.4062	-73.352.6334	232-13-55.33	19.9997	232-48-17.98
16	125+20.0000	-167.850.4966	-73.368.5648	233-22-40.62	19.9997	233-57-03.27
17	125+40.0000	-167.862.2659	-73.384.7348	234-31-25.92	19.9997	235-05-48.57
18	125+60.0000	-167.873.7696	-73.401.1369	235-40-11.22	19.9997	236-14-33.86
19	125+80.0000	-167.884.8229	-73.417.7646	236-48-56.51	19.9997	237-23-19.16
20	126+00.0000	-167.895.6915	-73.434.6112	237-57-41.81	19.9997	238-32-04.46
21	126+20.0000	-167.906.0410	-73.451.6701	239-06-27.11	19.9997	239-40-49.75
22	126+40.0000	-167.916.1372	-73.468.8442	240-15-12.40	19.9997	240-49-35.05
23	126+60.0000	-167.925.8862	-73.486.3969	241-23-57.70	9.4355	241-40-10.81
24	126+69.4355	-167.930.3639	-73.494.7022	241-56-23.91		

図 1-2-39 線形計算書

主要座標データ登録時の効率化

今回の3次元設計データ作成を試みた工事では、主要座標点が2次元CADデータ化されていた。CADデータ化された座標データを図1-2-40に示し、拡大図を図1-2-41に示す。座標のシステムの機能を利用し、エクセルデータ化する状況を図1-2-42に示し、エクセル化されたデータを図1-2-43に示す。簡易に座標登録する手法は効率化となる。

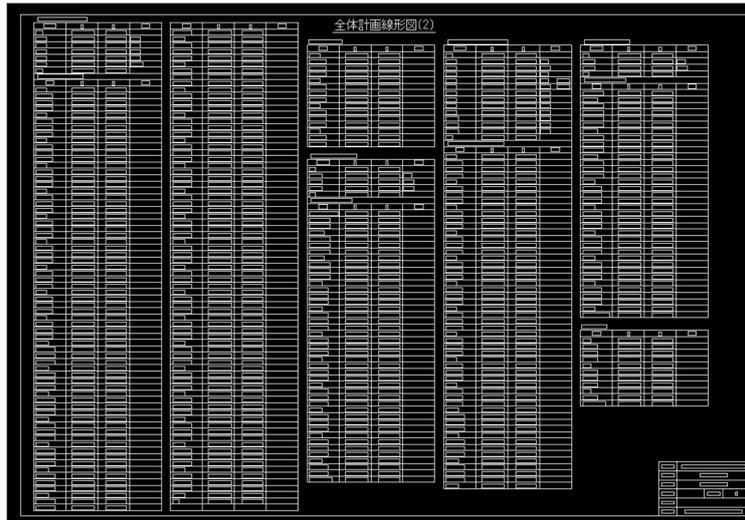


図 1-2-40 CAD 化された主要点及び路線データ

小田川河道法線主要点座標			
主要点	X	Y	備考
B.P	-154812.300	-55242.300	
KI.P1	-154546.600	-55291.300	R=300
KI.P2	-154343.100	-55480.600	R=300
KI.P3	-153406.900	-55800.100	R=350
KI.P4	-152802.700	-54992.500	R=300
KI.P5	-152345.100	-55745.800	R=2000
E.P	-151957.800	-56030.300	
小田川河道法線測点座標			
測点	X	Y	備考
KNO.0	-154812.300	-55242.300	
KNO.0+25	-154787.714	-55246.834	
KNO.0+50	-154763.129	-55251.368	
KNO.0+75	-154738.544	-55255.902	
KNO.1	-154713.958	-55260.436	
KNO.1+25	-154689.373	-55264.970	
KNO.1+50	-154664.787	-55269.504	
KNO.1+75	-154640.202	-55274.038	

図 1-2-41 CAD データの拡大図

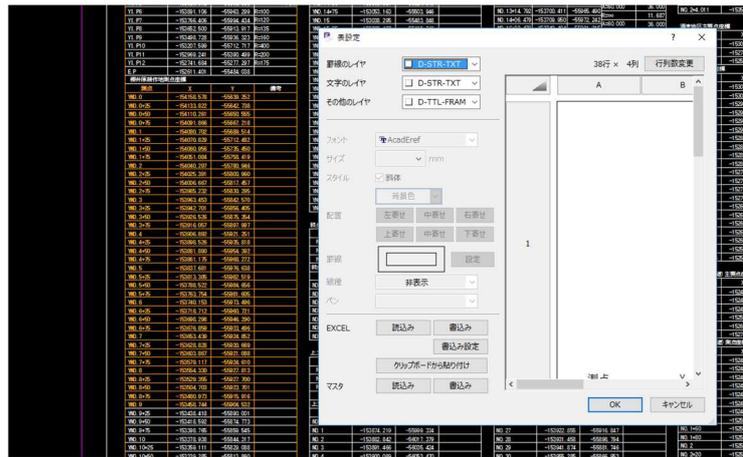


図 1-2-42 CAD 数値データのエクセルデータ作業

	A	B	C
1	1390.0	-15418.879	-55926.255
2	1390.0+25	-15418.822	-55942.738
3	1390.0+50	-15418.761	-55950.555
4	1390.0+75	-15408.886	-55967.218
5	1390.0+100	-15408.792	-55980.814
6	1390.0+125	-15407.829	-55971.462
7	1390.0+150	-15408.826	-55976.450
8	1390.0+175	-15405.884	-55970.418
9	1390.0+200	-15406.927	-55970.868
10	1390.0+225	-15402.931	-55980.868
11	1390.0+250	-15402.867	-55981.457
12	1390.0+275	-15398.922	-55980.268
13	1390.0+300	-15398.629	-55982.570
14	1390.0+325	-15392.791	-55980.402
15	1390.0+350	-15393.526	-55975.354
16	1390.0+375	-15391.607	-55981.997
17	1390.0+400	-15388.892	-55981.251
18	1390.0+425	-15388.526	-55985.818
19	1390.0+450	-15388.160	-55985.392
20	1390.0+475	-15388.175	-55988.272
21	1390.0+500	-15387.681	-55976.838
22	1390.0+525	-15383.385	-55982.518
23	1390.0+550	-15378.852	-55984.858
24	1390.0+575	-15378.754	-55981.603
25	1390.0+600	-15376.153	-55972.488
26	1390.0+625	-15371.712	-55980.721
27	1390.0+650	-15368.528	-55946.590
28	1390.0+675	-15367.828	-55933.488
29	1390.0+700	-15363.628	-55924.852
30	1390.0+725	-15363.828	-55920.868
31	1390.0+750	-15363.867	-55921.088
32	1390.0+775	-15362.117	-55924.610
33	1390.0+800	-15354.528	-55921.812

図 1-2-43 座標のエクセルデータ

変化点データの作成

3次元設計データ作成時には地形の変化点毎を結ぶようにデータを作成する。変化点がある場合、変化点毎の横断データを作成する必要となる。横断面作成には2次元CADの熟練度、図面理解力などが影響する。変化点作成の必要がなければシステムの流れに沿ってデータ作成でき、パソコン操作が得意であれば業界関係者以外でも作成が容易となる。今回は坂路部のデータ作成のため新たに15測点の横断データを作成した。

作成した横断データの位置を図1-2-44に示す。

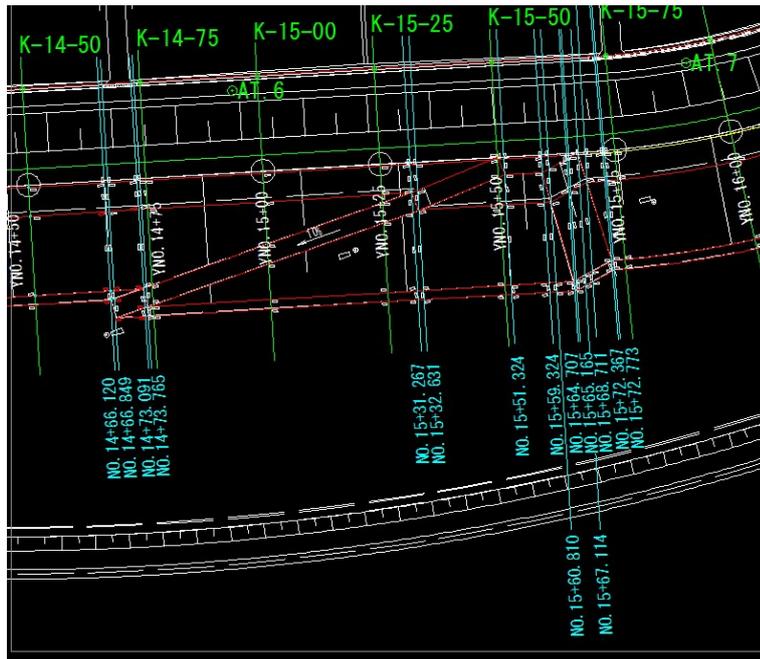


図 1-2-44 追加横断面図位置

変化点の結合

横断面要素登録完了後には自動的にデータ作成される。今回の坂路データのように複雑になると手動接続する必要がある。前後の横断面データと変化点を結ぶ工程を図 1-2-45 に示す。

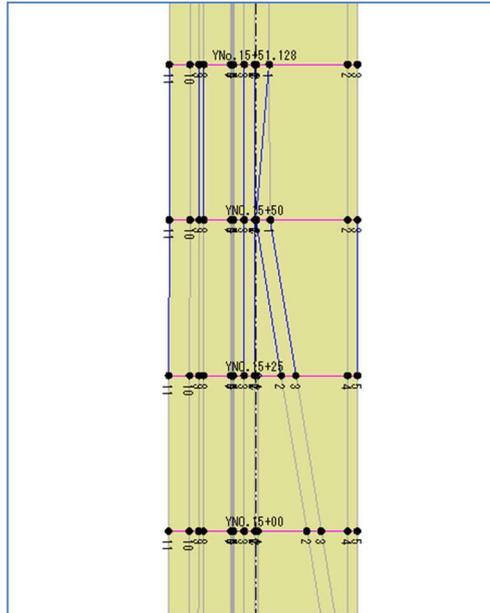


図 1-2-45 横断面毎の接続線

完成データ

完成した 3 次元設計データを図 1-2-46 に示す。設計データを反映したデータ作成はここで完了となるが、ここから施工に合わせたデータ作成に取り掛かる。

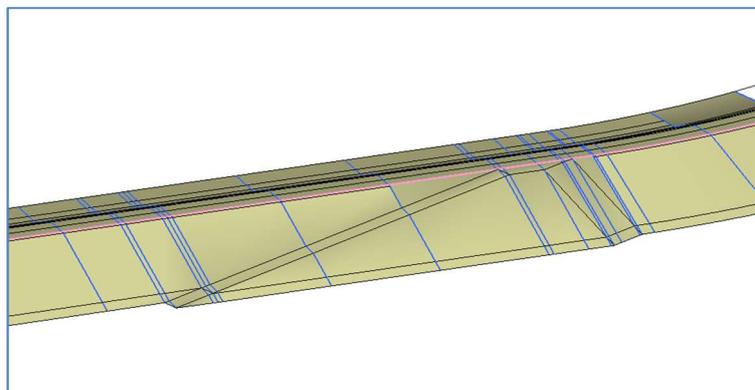


図 1-2-46 完成した 3 次元設計データ

3次元設計データまとめ

実務と同時でのマニュアル作成は感覚的で3倍程度の労力を要した。しかし、今回の作成時においては参照しながら半分程度に時間短縮された。初心者による3次元設計データのようなソフトウェア操作はその複雑性により、試行錯誤を伴う長時間作業になる場合がある。試行錯誤時間の解消により時間短縮の結果となった。

3次元設計データ作成は専門ソフトウェアもしくはオプションで追加された機能を利用して作成される。同じシステムで作成されたデータであればその機能を利用して変更修正が容易となる。設計と施工は異なったソフトウェアを利用している場合が多く、データの読み込みは可能でも変更修正ができない。そのため施工段階では新たに変更可能データを作成する必要がある。

マニュアル作成

近年のデジタル化に伴いソフトウェアも多種多様化している。これらの複数ソフトウェアを使いこなすには講習等と習熟期間が必要となる。中小建設会社では主にOJT (On the Job Training) 教育, すなわち現場にて上司や先輩が直接指導する方法が多い。従来技術ではなく新たな取り組みなどは習得しにくく, OFFJT (Off the Job Training) といった外部講習等を受ける機会もないに等しい。マニュアル等もあるが機能説明に注力されており, 理解しにくい。そこで備忘録として3次元設計データ作成と同時にソフトウェアの操作手順書を作成した。作成した手順書を図1-2-35に示す。

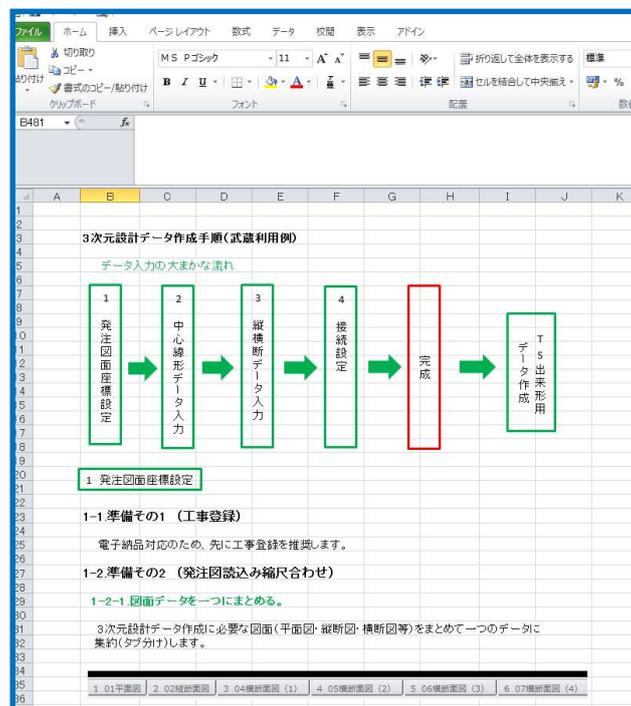


図 1-2-35 データ作成手順書

そこで2回目作成時に修正した手順書を20代の若手職員(現場経験3年以上)8名に渡し、1日だけ講習時間を取り何も説明せずに手順書のみで単純なデータ作成に挑戦した。条件はマイペースで時間を気にしないということだけ伝えた。結果は全員2時間程度で作成できた。若手社員ほど戸惑うことがあったが、ソフトウェアの操作より図面理解の問題であった。

3次元設計データ作成について、その作成法から実務作成においてどのような問題点があるか示した。ソフトウェアにより操作方法等に違いがあるが、施工現場によっても難易度が変わる。

ICT 建機

ICT 建機には施工に応じて様々な種類があり、主な種別を図 1-2-47 に示す。掘削・法面整形作業用機械とはパワーショベル又はユンボ等の商品名が一般的に知られている。主に油圧ショベルを示し下向きにバケットを取り付けるバックホウが利用される。バケットを法面整形用に交換したものが法面整形作業用となる。敷均し作業用機械とはブルドーザやモーターグレーダー等を示す。締固め作業用機械とはタイヤローラ、振動ローラなど転圧作業用に使われる。バックホウ浚渫船は台船と油圧ショベルを向き合わせ、海や河川等の浚渫で利用され、地盤改良機や路面掘削機もある。ICT 機器は測量機器メーカーが開発したもので、測量機器メーカーと建機メーカーとのイノベーションといえる。市場投入が早かったのはコマツで日本では主にコマツがトプコン社のシステムを搭載しており、それ以外の建機メーカーではトリンブル社が多い。作成した 3 次元データは ICT 建機のシステムに建機用のデータに変換してから搭載する。平面図を利用した方法もある。

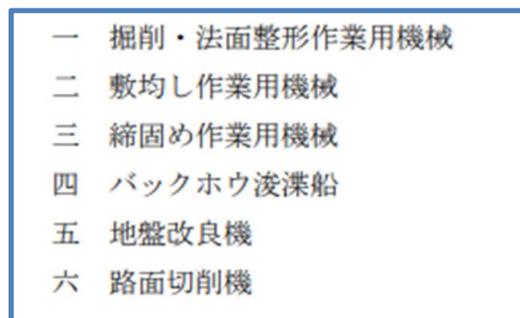
- 
- 一 掘削・法面整形作業用機械
 - 二 敷均し作業用機械
 - 三 締固め作業用機械
 - 四 バックホウ浚渫船
 - 五 地盤改良機
 - 六 路面切削機

図 1-2-47 ICT 建機の種類

衛星測位

ICT 機器は主に RTK-GNSS 測位を利用する。相対測位で建機位置とバケット先端位置を把握する。相対測位のイメージを図 1-2-48 に示す。図 1-2-49 に測量等で利用する RTK-GPS のイメージを示し、図 1-2-50 に ICT 施工での RTK-GNSS のイメージを示す。ICT 施工では観測点が建機に変更している。また、バックホウの場合には 2 台の受信機を取り付けて建機本体位置と姿勢及びアーム方向などを同時に把握する。現場施工では測位精度を上げるために、現場の基準座標に調整する、ローカライゼーションが必須となる。

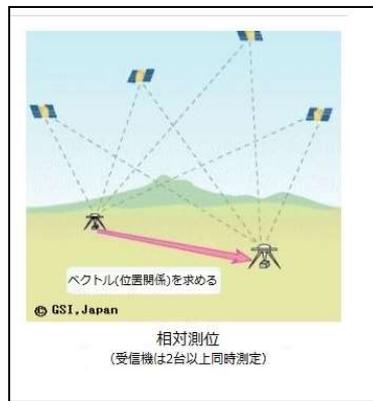


図 1-2-48 相対測位
(参照 国土地理院 HP)

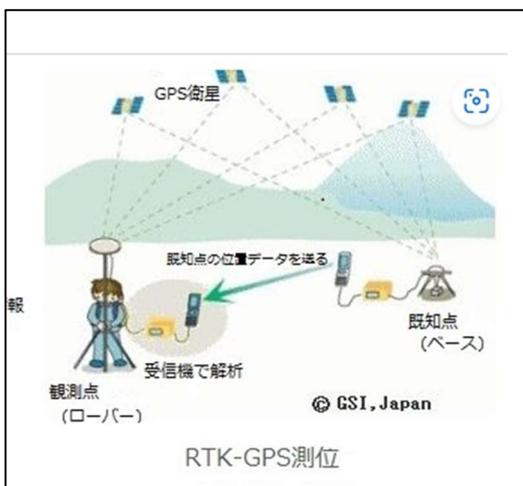


図 1-2-49 RTK-GPS 測量



図 1-2-50 RTK-GNSS イメージ

建機の仕様

バックホウではマシンコントロール（以下MC）やマシンガイダンス（MG）といった機能を搭載する。衛星測位を利用しない2DMGもあり、3DMCと3DMGに区別される。2DMGは現地基準などに0セットし勾配とバケットの位置差を把握しながら利用するが公共工事ではICT建機とは認められない。3DMCと3DMGは共に従来建機にICT機器（GNSS等）を組み込んだものでバケットの先端位置を把握している。アームの油圧を機械制御するなどの有無で区別される。3DMCは3次元設計データとの対比で自動ストップのかかる過掘り防止機能や自動掘削機能がある。しかし、意図しない機械ストップや掘削時のスピードが遅いため、熟練オペレーターによってはその機能を切る場合がある。3DMCスイッチを切ることによって3DMGとして利用できる。3DMCの概要を図1-2-51に示し、3DMGの概要を図1-2-52に示す。

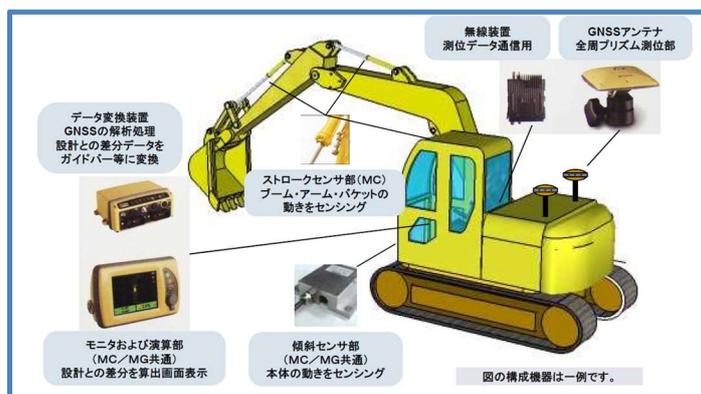


図 1-2-51 マシンコントロールシステム搭載システム



図 1-2-52 マシンガイダンス搭載システム

ブルドーザではバックホウと同様に建機位置を把握し MC と MG の 2 種類がある。MC では排土板の自動制御ができる。MC は作業負担が大幅に軽減されるため、一度利用することによりオペレーターからの ICT 施工要望がある。ICT 施工対象外の部分でも 3 次元設計データ作成依頼が多く、オペレーターへの聞き取りした経験でも熟練オペレーターほど必須という意見が帰ってくる。ICT 仕様のブルドーザを図 1-2-53 に示す。

ローラなどの転圧機械では転圧した場所と転圧回数がモニターに表示される。回数は色分けによって把握される。指定回数転圧でき赤色表示されているモニターを図 1-2-54 に示す。



図 1-2-53 ICT 機器取付ブルドーザ



図 1-2-54 モニターの設計データ

施工管理

出来形管理図等の作成では3次元設計データと点群データの2種類を用意し、そのデータ比較によって計測する。出来形管理用に作成したデータを図1-2-55に示し、UAV測量で取得した出来形管理用点群データを図1-2-56に示す。また、2つのデータからその差分を表したヒートマップを図1-2-57に示し、出来形管理帳票を図1-2-58に示す。

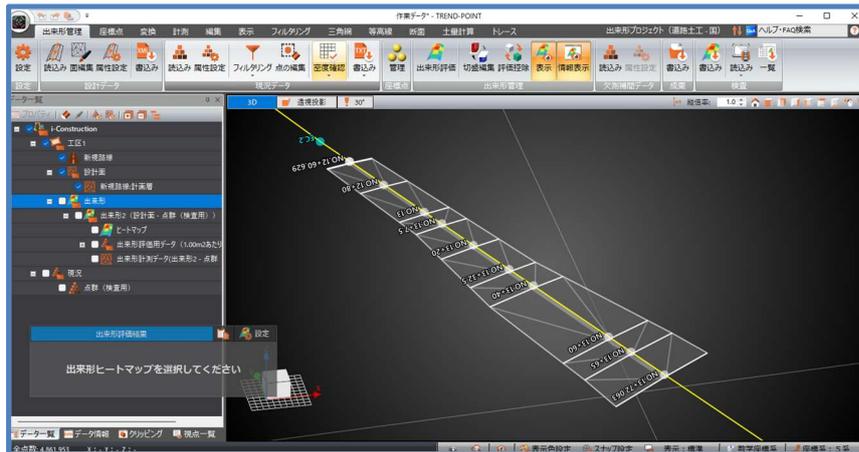


図 1-2-55 3次元設計データ

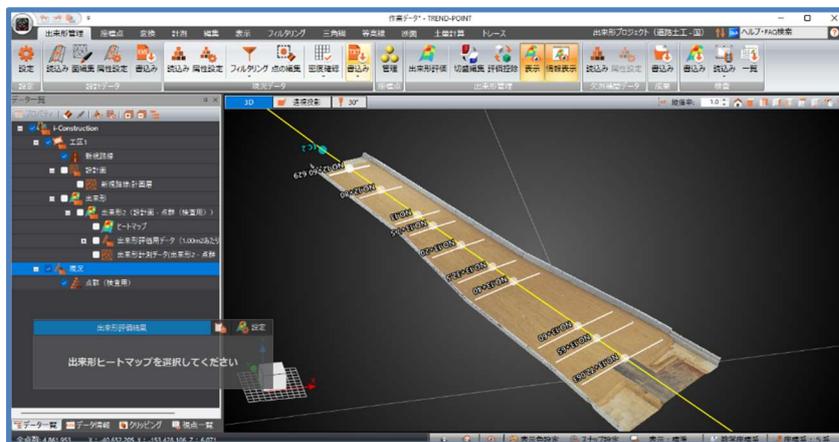


図 1-2-56 出来形管理用点群データ

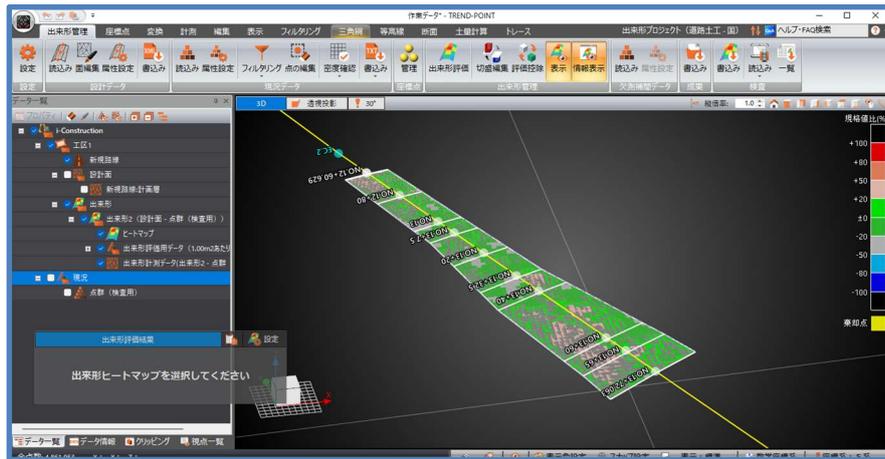


図 1-2-57 出来形管理用ヒートマップ

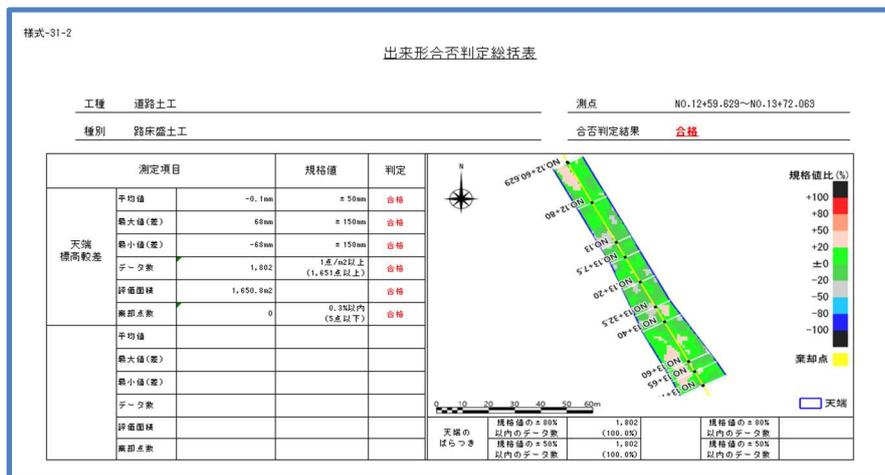


図 1-2-58 出来形管理帳票

電子納品

出来形管理用ヒートマップ作成から電子納品用データを作成する。これらの操作はソフトウェアにシステム依存している。電子納品データ作成時の図 1-2-59 に示し、作成されたフォルダーを図 1-2-60 に示す。

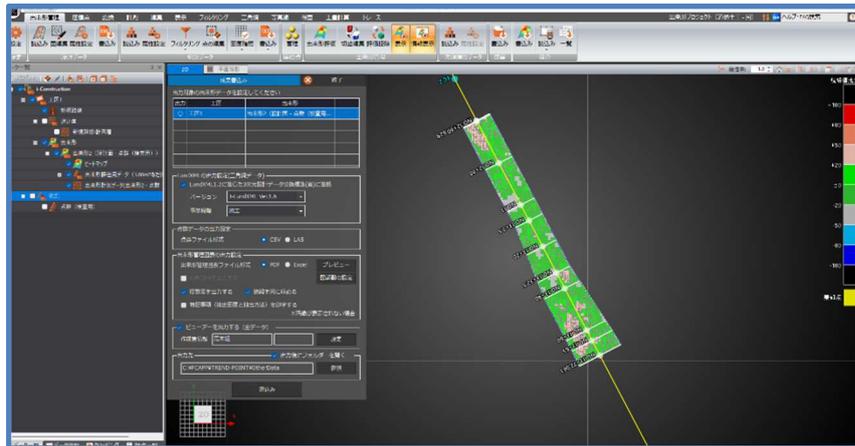


図 1-2-59 電子納品時の作業



図 1-2-60 作成された電子納品データ

1. 3 本研究の目的

インフラの維持管理には、定期的な点検と適切な補修が不可欠であり、点群データを活用した精密なモニタリングやAIを用いた劣化予測技術に期待されている。さらに、近年の豪雨災害や地震による復旧作業においても、迅速かつ効率化が求められている。こうした点検・補修や復旧作業を高精度かつ効率的に実施するためには、ICT 施工技術を活用できる地域の建設会社による一括管理など、新たな施策の導入が必要である。その実現には、国土交通省直轄工事における高い普及率にとどまらず、地方自治体発注工事における ICT 施工の普及拡大が望まれる。本研究では、ICT 施工のさらなる発展を目指し、実務における課題を明確にしたうえで、その解決策を検討する。また、ICT 技術を応用した維持管理データの取得及びモニタリング技術に関する研究を行う。

ICT 施工における課題と対策、維持管理時に必要なデータ取得による検証を以下に示す。

○UAV 測量における課題

調査・設計段階と比較して実現場における UAV 測量では様々な制約があり、現場に適した対応が求められる。例えば、調査・設計段階では測量範囲や条件を比較的自由に設定できるが、施工途中の現場では工事の進捗や重機の稼働状況に影響を受ける。また、再撮影が難しいため、撮影時の環境変化（影の移動や太陽光の影響）を考慮し、最適な時間帯の選定や撮影範囲の工夫が必要となる。さらに、点群データの精度管理も重要であり、評定点の配置やデータの取捨選択を適切に行い、誤差を最小限に抑える対策が求められる。

対空標識設置の効率化では UAV 測量における労力は評定点、検証点に利用される対空標識設置及び撤去が半分以上を占める。内製化し、現場職員で設置すると時間の効率化につながる。作業に協力してもらうためには評定点の設置方法及び重要性を理解してもらう必要がある。評定点の重要性を評価するため、評定点を使用しない実現場条件下で実験が求められる。

○施工時における課題

ICT 建機による施工は、すべての施工条件に対応できない。そのため、施工前に ICT 施工の活用可否を判断する必要がある。また、ICT 施工適用の場合でも、施工対象や現場条件によりデータ修正や調整が必要となる。例えば、法面の勾配変化や既設構造物との取り合いがある場合、3次元設計データでは対応しきれず、オペレーターの経験による施工が求められる。さらに、使用するソフトウェアによっては、複雑な地形ではデータ作成が困難な場合があるため、事前にデータの適用範囲を検討するなど対策が求められる。

○施工管理時における課題

施工管理には、データ取得時期の計画、土質変化により対策、小構造物施工対応、不可抗力による影響への対応、水面の反射による影響への対策、3次元設計データ作成時の対応、ICT 建機運用時の対応、盛土施工時の対応など、現場ごとにさまざまな課題がある。

○撮影時間短縮の必要性

ICT 施工の前進である情報化施工からの普及率増加の要因としてドローンの普及がある。空からの視点により広範囲に把握でき、測量目的だけでなく現況把握写真にも利用されている。土木現場だけでなく建築現場でも採用増となっている。一方で、2015年首相官邸無人機墜落事件以降、航空法等のドローン関連法律及び規制等の必要性が議論され、規制ができて以降年々厳しくなり気軽に利用できない。一日に複数現場での撮影を想定すると1現場あたりの撮影時間短縮が求められる。

○空中写真測量の確実性

施工段階における UAV 測量では撮り直しができない。100%成功が求められる。経験上ガイドライン従った飛行方法では出来形管理に必要な±5cmの成功率は50%程度となる。施工会社はもとより ICT 専門外注企業でも精度を要求される場合に UAV 測量が避けられる原因はその確実性にある。また、従来のセスナ等を利用した航空写真測量と違い、ドローン利用では自由な飛行方法が可能となる。従来の常識にとらわれないノウハウを駆使している。条件の整ったテスト飛行現場だけでなく、様々な条件下での実験データが公表され、確実性をあげることが求められる。

○維持管理手法の効率化

高度経済成長期に整備された交通インフラの法面は、地下水の影響による風化や近年の短時間豪雨の増加により強度が低下し、崩壊のリスクが高まっている。法面崩壊は交通網の寸断や社会的損失を招くため、点検が重要である。現在、日本では近接目視が主流だが、経験に依存し、評価が定性的で一貫性に欠ける。定量的手法として伸縮計や光波観測がある。しかし、局所的な測定に限られ、広域のモニタリングには適さない。

近年、レーザースキャナーによる点群データの取得が可能になり、非接触での法面計測が進んでいる。特に MMS (モバイルマッピングシステム) は広範囲の点群を効率的に取得できる。MMS で取得した2時期の点群を ICP (Iterative Closest Point) アルゴリズムで解析し、変状の抽出・定量化を試みた。また、MMS 測量と ICP 手法の精度を検証し、解析精度に影響を与えるフィルタリングの効果を評価する。

本研究では中小建設業からの視点から、ICT 施工の基礎知識と実際のデータを用いた検証をおこない、また推進するためには技術的な要素だけでなく、施工現場環境といったそれ以外の分野についても考察をおこない、実務者以外の方にも広く知ってもらうことを目的として、この研究を行う。

1. 4 従来の研究

1. 4. 1 UAV 測量の飛行方法に関する研究

「ICTの全面的な活用」では主に地上レーザー測量又はドローン等を利用したUAV測量（空中写真測量）により点群化された地形データを取得する。さらに点群データはBIM/CIMにも応用される。ドローン等を利用したUAV測量は航空測量分野から発展した技術であり、SfM/MVS技術を利用した解析ソフトを利用することで高精度化が可能となる。しかし、早川ら¹⁾は出力したデータの精度管理や解釈を適切におこなうためには、写真測量の原理といったその基礎となる最低限の知識を得た上で実施する必要があると指摘している。公共工事の場合「UAVを用いた公共測量マニュアル」²⁾などの基準をクリアする必要がある。しかし、これらのマニュアルは大型産業用ドローンを用いた高性能カメラで撮影した結果をもとに制定・改正されていると推定される。小型汎用ドローンでは要求精度を満たせない場合がある。また、作業手順等については記されていない。林業では林野庁が「UAV立木調査マニュアル」³⁾を制作し、農業では農研機構が「ドローンを用いたほ場計測マニュアル」⁴⁾を制作している。土木業界においてUAV測量の知識は浸透しておらず、実現場においては再測量などの非効率をさけるための実務スキルが求められる。そのため、起工測量にはドローンが利用される一方で、精度要求される出来形測量等には地上レーザー測量が使われるケースが多い。

1. 4. 2 カメラに関する研究

UAV測量では計測範囲、要求精度によって異なり、1回のフライトで数百枚の写真を撮影する。一枚の写真がデータ作成失敗の原因となるため、カメラの知識が必要となる。施工時期に入った実現場では次工程の予定が決まっており、フライト後にはすぐに対空標識等を撤去するため、100%の成功率が求められる。季節、時間帯、天候等により撮影条件がことなるため、カメラ知識は必須となる。また、通常の三脚で固定されたカメラ撮影と違い空中を移動しながらの撮影となる。蚊野⁵⁾がデジタルカメラの特徴としてメカニカルシャッターと電子シャッターの構造の違いを示し、シャッター動作の種類による違いをローカルプレーン歪みの発生に触れている、シャッターの違いを認識し、飛行方法を検討する必要がある。

1. 4. 3 SfM/MVSに関する研究

ドローン等で空撮した多数の写真をから、SfM/MVS技術を用い3次元モデリング形状のデータを作成することができる。UAV測量では3次元点群データを利用する。技術的な処理については金井⁶⁾がまとめている。ソフトウェアにより特徴があり北村ら⁷⁾は比較している。神野ら⁸⁾はUAV測量の難点として精度の事前予測が難しいとしている。菅井ら⁹⁾はソフトウェアによる作成データの比較検証をし、櫻井ら¹⁰⁾は解析時のパラメータの検証をおこない、条件によってカメラキャリブレーションはソフトウェアで実施することが望ましいとしている。田中ら¹¹⁾は一定の飛行高度より地形との一定距離飛行の方がデータの精度が良くなることを報告している。近藤ら¹²⁾の提案により出来形管理基準がカイゼンされたように、進歩の

段階といえる。また、梶田ら¹³⁾はRTK-GNSSによるデータの特徴を検証している。これは評定点等の対空標識の設置精度に関連する。従来の写真測量（フォトグラメトリ）では異なるカメラや焦点距離で撮影された画像解析では困難であったが、ソフトウェアによっては様々な飛行方法も可能となり違う結果が得られる。

1. 4. 4 実践で使える研究

本研究では大澤ら¹⁴⁾が提案している“現場で使える研究成果”を求めため、実現場の精度検証結果をもとに検討することを提案している。また、斎藤¹⁵⁾は研究成果で重要なのはその情報を受け取る側が重要だと指摘している。

1. 5 本論文の概要

i-con 実現に向けた建設業界の ICT 施工普及とインフラメンテナンスにおける社会問題解決の一つとなる点検技術の確立を目標として、本論文では主に起工測量から出来形書類作成までの ICT 施工全般の概要を詳細説明し、ICT 施工の実務課題に焦点を絞り、主に実践現場のデータを元に対応策を検証した。また、ICT 技術を活用し、維持管理時に有効なデータ取得を試みた。さらに、維持管理の点検に必要なモニタリング手法を研究しその内容をまとめた。本論文はその成果をまとめたものであり、緒論から結論まで6つの章にまとめている。

第1章では、緒論としてインフラの老朽化の現状を認識し、新たな点検技術の必要性を示した。また、インフラ管理における自治体などの現状を示し、持続可能な維持管理体制構築の必要性を示した。施工管理では建設 CALS といった施策が行われ、デジタル化の流れが早期に浸透していた。CALS が浸透すると CIM といった新たな施策が提案され、国際的な流れから BIM/CIM と名称変更する現在までの流れを説明した。一方で施工現場では情報化施工といった情報通信技術を利用した取り組みが研究され、ICT 施工として普及されている。ただし、土木施工に関する研究がもともと少ない上、ICT 施工の実務を全般に説明した書籍、論文も少なく、講習では表面だけが説明されており、外注依存率が高い。そのため、起工測量から3次元設計データの作成、ICT 施工機械による施工、3次元出来形管理等による施工管理、3次元データ納品までの流れを説明する。起工測量では着手前の地形測量で測点ごとの横断測量から UAV 測量等の点群データ取得を説明する。そして設計から施工そして維持管理までの一連の流れを横断する3次元設計データについてもソフトウェアの互換性等の様々な問題により遮断する原因となっているため、その概要と手順を示した。3次元設計データ作成では TIN と呼ばれる不整三角網から構成されるサーフェスデータを ICT 建機に搭載するまでの流れを説明し、出来形管理データ作成から電子納品データ作成まで説明する。

第2章では、ICT 施工における実務上の課題について検証する。国土交通省は2016年に i-Con を提唱し、ICT の活用、全体最適の導入、施工時期の標準化による土木工事の効率化を推進してきた。特に ICT 施工の適用範囲は拡大しており、2025年度からは土工および河川浚渫工において原則適用となる。また、省人化を目的とした「i-Con 2.0」も策定されたが、地方の建設業者では ICT 施工の外注依存が高いのが現状である。ICT 施工の実務では様々な課題が発生するものの、成功事例に比べて問題発生時の課題や対策事例は少ない。そこで本章では、UAV 測量における課題、施工時における課題、施工管理時における課題、土質変化による課題、小構造物施工の課題、不可抗力な状況でのデータ活用の課題、水反射の影響による課題、3次元設計データ作成時の課題、ICT 建機運用時の課題、そして盛り土施工時の課題事例を取り上げ、それぞれの対策事例を示す。

第3章では、実務の工事現場において ICT 技術を活用した高精度化及び効率化の検証に取り組む。ICT 技術の急速な進展により、実務での利用機会が増加し、基礎研究だけでなく実用研究の成果も求められている。実務においては、企業ごとにノウハウが蓄積されているものの、報告される機会は少ないのが現状である。また、これらの技術は設計時や施工時に限らず、維持管理のツールとしても注目されている。そこで、西日本豪雨災害による真備緊急治水対策プロジェクトの一環として実施された河川堤防築堤工事を中心に、国道2号線笠岡

バイパス工事のデータも交えながら、施工段階における維持管理を想定した工事施工中のデータ等の取得に取り組む。主な内容として、UAV 測量を活用して法面管理データを作成し、精度向上方法について検証する。

第4章では、公共工事における公衆災害の一因となる地下埋設物の損傷に着目し、3次元計測による可視化を試みた。従来、埋設物の位置情報は2次元図面で管理され、正確性が低いため、工事中の損傷リスクが高い。近年のICT技術の発展により地上測量の精度は向上しているが、地下では十分に活用されていない。そこで、ICT施工で利用される測量機器を応用して点群データを取得し、地下構造物の3Dデータを作成することで、位置情報の信頼性を向上させ、工事中の事故防止やインフラ維持管理の効率化実現を検証する。

第5章では、維持管理時における点データ取得の効率化に取り組む。法面の崩壊リスク評価のため、車載型センシング装置(MMS)を用いた点群データにより変状の定量化を試みる。従来の法面点検は近接目視が主流であり、技術者の経験に依存するため一貫した評価が困難であり、既存の定量的手法は測定範囲が限定的で、広域モニタリングには不向きとなる。近年、レーザースキャナーによる三次元点群データの活用が進んでおり、MMSを用いた広範囲の点群取得と、ICPアルゴリズムを用いた時系列解析により、法面の変状抽出・定量化を検証する。さらに、測定精度やフィルタリングの影響についても評価を行い、法面モニタリングの効率化に向けた有効性を示す。

第6章では、それぞれの章の結果をまとめ、建設会社視点での考察と今後の展望を示す。

参考文献

- 1) 早川裕式, 小花和宏之, 齋藤仁, 内山庄一郎: SfM 多視点ステレオ写真測量の地形学的応用, 地形 第 37 卷 第 3 号 P321-343, (2016)
- 2) UAV を用いた公共測量マニュアル (案), 国土交通省国土地理院, (2016), (2017 改正)
- 3) UAV 立木調査マニュアル, 林野庁, (2019)
- 4) ドローンを用いたほ場計測マニュアル, 国立研究開発農業・食品産業技術総合研究機構 農業環境変動研究センター, (2021)
- 5) 蚊野浩: デジタルカメラのしくみと画像処理, 画像電子学会誌, Vol. 41, No. 3, pp. 288-295 (2012)
- 6) 金井理: SfM-MVS 技術の動向, 写真測量とリモートセンシング 60. 3, P95-99 (2021)
- 7) 北村悦司, 村木広和, 吉永京平, 山岸潤紀, 津村拓実: UAV 空撮画像における 3 次元モデリング (SfM/MVS) ソフトウェアの形状特性比較に関する研究, 土木学会論文集 F3 (土木情報学), Vol. 74, No. 2, II 143-148 (2018)
- 8) 神野有生, 油谷大樹: UAV 写真測量の上限精度の目安としての多視点三角測量の分散評価式, 土木学会論文集 F3 (土木情報学), Vol. 78, No. 1, 35-42 (2022)
- 9) 菅井秀翔, 宮地邦英, 中村孝之, 南秀和, 橘克巳: UAV を活用した写真測量の精度検証, 国土地理院時報, 国土地理院編 129, P147-157 (2017)
- 10) 櫻井淳, 中村健二, 田中成典: 平常時と災害時における UAV 写真の解析パラメータの決定とその適用に関する研究, 土木学会論文集 F3 (土木情報学), Vol. 73, No. 2, I 268-278 (2017)
- 11) 田中龍児, 外山泉, 長山昭夫: UAV による写真測量技術の精度検証, 第一工業大学研究報告, 第 30 号 P39-44 (2018)
- 12) 近藤弘嗣, 森川博邦, 藤島崇, 椎葉祐士: i-Construction における UAV を用いた土工出来形管理の基準類の策定及びカイゼン, 土木学会論文集 F3 (土木情報学), Vol. 73, No. 2, I_74-I_82, (2017)
- 13) 梶田洋規, 北川順, 平城正隆: 情報化施工に利用する衛星測量技術「RTK-GNSS」で取得したデータの特徴, (財) 土木研究センター土木技術資料, 53-5, (2011)
- 14) 大澤剛士, 赤坂宗光: 現場で使える研究成果とは?, 日本雑草学会, 雑草研究 Vol158(1) PP. 22~27 (2013)
- 15) 齋藤やよい: 使える研究と使えない研究, 日本看護研究学会雑誌, 34(3), 3_110-3_110

第2章 ICT施工の実務課題

2. 1 諸言

国土交通省では2016年にi-conが提唱された。土木工事現場の生産性向上のための効率化施策として「ICTの全面的な活用」、「全体最適の導入」、「施工時期の標準化」がある。特に「ICTの全面的な活用」ではICT土工から始まり、年々工種拡大がされている。国土交通省直轄工事ではICT施工経験業者の割合が高まり2025年度より土工と河川浚渫工においては原則適用となる。また、新たな施策として現場のオートメーション化など省人化への取り組みを目的とし「i-con2.0」が策定された。一方で地方建設業者ではまだICT土工においても外注依存度が高い。UAV測量においては起工測量、出来形測量だけでなく、月間ごとの地形測量による進捗状況の確認、仮置き土量の数量算出など現場要望は多い。3次元設計データについても施工に応じたデータの作成、変更による修正依頼などが発生する。

しかし、新技術には新たな課題が伴う。例えばUAV飛行などドローンを現場利用するには民家近接の場合があり、このような場合、地区役員へ説明し地区住民への回覧を行うなど周知が必要となる。また、樹木がある場合などは精度低下となる、計測前に樹木及び草本植物も全面伐採し地表面を出す必要がある。伐採は事業地内に限られ民地が隣接するなどする場合、背丈の高い樹木の影響で上空からの撮影ができない場合がある。このような場合、現地に合わせて斜め撮影を行うなどの工夫が必要となる。またGCP (Ground Control Point) においても、施工範囲内設置では支障となるため施工区域外に設置し保守する必要がある。構造物付近特に橋梁真下など撮影ができない場合はデータ不備の恐れがあり、地上レーザー等を利用するなど工夫が必要となる。

3次元設計データにおいてはTIN (Triangular Irregular Network) データが利用されるが施工区分別の数量算出に利用できない。曲線部等は分割してデータ作成する必要があるが9面/1平方メートル以上でシステムが機能しなくなる可能性があり、面対象データが入れ替わると位置停止する場合がある。法面整形の場合はバケット幅を考慮して、最低2メートルとし2.5メートル以上の間隔が望ましい。

ICT建機による施工では、曲線半径の小さい箇所の施工は難しい。オペレーターの熟練技術によるカーブ施工が必要な場面がある。そのような場合はICT施工対象外となる。市街地で利用されない0.7立方メートルクラスの大型建機が主流となっており、小旋回に向きで施工スペースの確保できない場所では施工できない。GNSS (Global Navigation Satellite System) 等の衛星測位システムを利用しているため、構造物付近では受信不良が発生する。そのため事前の通信環境の確認が必要となり、従来方法での施工か受信衛星を増やすなどの検討が必要となる。通信環境は時間帯によって悪くなるケースもある。

3次元出来形管理については、3次元設計データと出来形管理用点群データとの比較差分を用い評価する。評価対象範囲を選択できない場合があり、出来形管理用データを作成する必要がある。ICT施工のノウハウなどの技術はその企業ごとに蓄積されてはいるものの、本来の業界発展に必要な産官学連携にはいたっていない。

2. 2 実務における課題と対策

ICT 施工は、建設業界の生産性向上や品質管理の向上が期待できる技術であるが、導入に際してはさまざまな課題が存在する。現場ごとに異なる課題が発生し、その数は枚挙にいとまがないが、施工会社にはその都度適切な判断が求められる。外注に頼らず内製化を目指す建設業者に向けて、ICT 施工の実務における課題とその対策を整理し、スムーズな導入・運用を支援するため、高速道路拡幅工事及び河川築堤工事の施工事例を示す。

2. 2. 1 UAV 測量における課題

施工途中現場における UAV 測量は一度に数十枚から数百枚を空撮するが工程が既に決まっております。測量後に評定点等の撤去を行い再撮影ができない。課題は1枚の失敗画像で解析不可となる可能性があるため100%の成功が求められる。失敗の原因は様々考えられるが、主な原因として影と太陽光の差し込みが考えられた。影は長時間フライトによる伸縮が懸念され、太陽光は低高度によるカメラへの光の影響となる。対策として撮影時間帯を太陽高度の高い10:00~15:00に固定した。また周辺では重機、ダンプトラックなどの稼働もあるため、その場合は昼休憩となる12:00~13:00に撮影する。

撮影データは必要箇所をカバーするため、少し広範囲に撮影する。ドローミング現象といった点群データ作成時の性質を理解するため評定点なしで検証した。その結果、ほぼ水平な土地の条件で約100mの延長につき高さ12m程度の誤差が生じた。課題は囲まれた評定点外のデータが精度不明となる。撮影範囲すべてのデータが第三者に渡った場合、精度の誤差は考慮しないケースが考えられる。対策として精度不明な評定点外のデータは削除する。湾曲した地形点群データを図2-2-1に示す

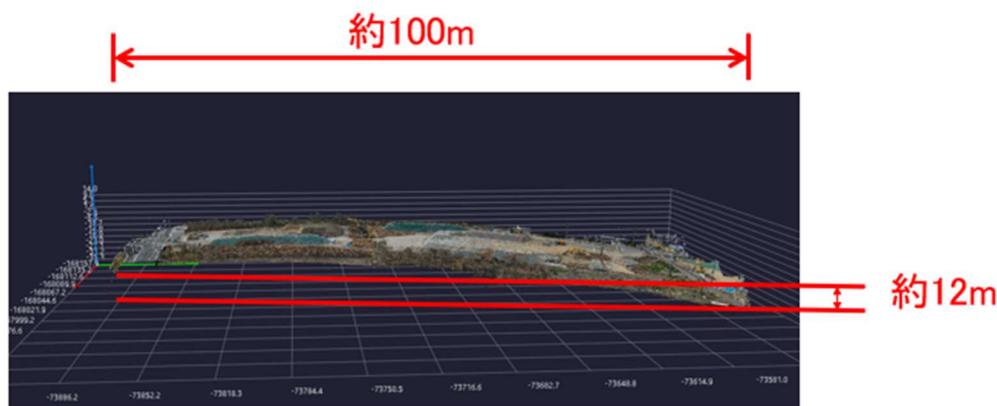


図 2-2-1 湾曲した地形データ

2. 2. 2 施工時における課題

ICT 建機に搭載する 3 次元設計データはすべての施工条件に対応していない。3 次元設計データの特徴として TIN を利用してデータを作成する。TIN データは直線を結んで三角形の面をつくる構造であるため例えば 2 本の直線が平行でない場合はねじれが生じ、平行でない 2 面が作成される。そのため法面等の勾配箇所が変化する場合にはオペレーター任せとなるすりつけ施工となる。

3 次元データの特徴としてねじれといった 3 次元特有の問題が発生する場合がある。2 次元の場合、2 つの平行線であれば片側が変更しても面の作成が可能となるが、3 次元ではねじれが発生し、1 面ではなく 2 面となる。実現場では法面勾配一定の場合が多いが、例えば切土現場の土質変化による勾配変更や既設物へのすりつけが必要となる場合がある。こういった場合、データ作成はするが実際の施工では現地合わせとなる。このような知識は実務で実際に体験してから気が付く。対象工事によってさまざまな課題が発生するため、取組事例をもとに検証する。ねじれ現象のイメージを図 2-2-2 に示す。またソフトウェアにより差があり、交差点等のデータ作成ができない場合がある。そのイメージを図 2-2-3 に示す。

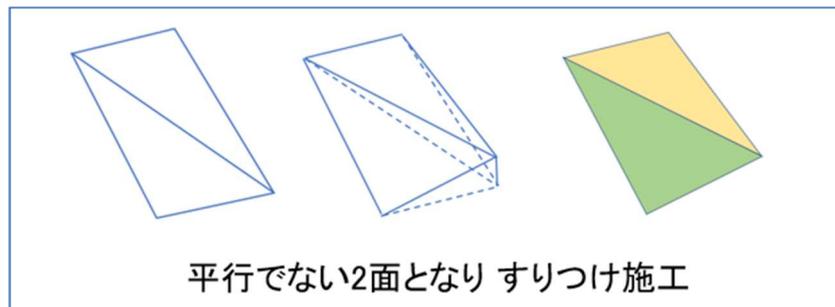


図 2-2-2 平行でない 2 面の TIN データ

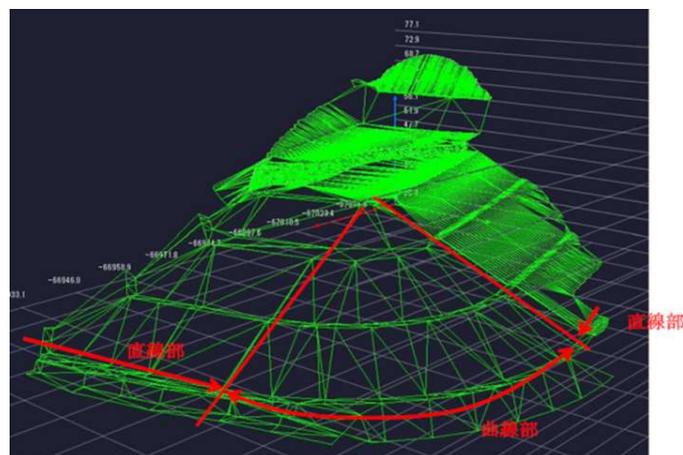


図 2-2-3 急カーブの TIN データ

2. 2. 3 施工管理時における課題

(1) データ取得時期の課題と対策

中規模以上の法面の段階施工では法面整形が終了した後（図 2-2-4）にまとめて出来形測量をする場合がある。地山により大雨等で法面にガリ浸食等の溝浸食の恐れがある場合は速やかに植生する必要がある。植生工後の工事完成時期の法面を図 2-2-5 に示し、取得した点群データを図 2-2-6 に示す。

UAV 測量では植生された表面データが取得されるため、植生前に撮影する必要がある。またレーザー機器を利用した UAV 測量もあるが繁殖が進行すると隙間がないためデータの取得が困難となる。小段毎の測量が望ましいが測定回数が増えコスト面でも負担となり、従来施工を選択する傾向になる。施工完了毎のデータは維持管理時の異常検知などの利用で有効なデータとなるため維持管理を意識した発注形態及び施工管理が重要となる。また切土だけでなく例えば河川堤防のような盛土でも同様となる。



図 2-2-4 法面整形後



図 2-2-5 植生工後育成状況

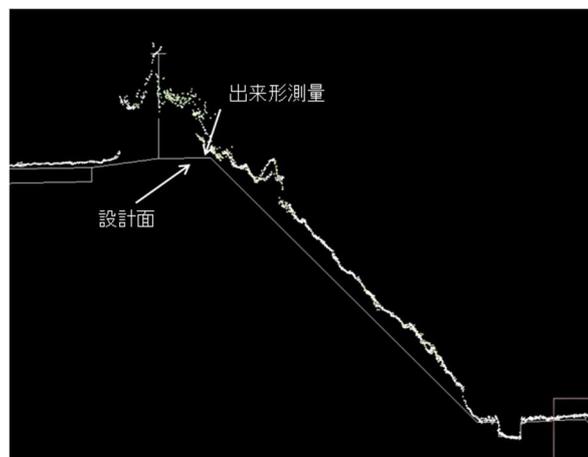


図 2-2-6 出来形管理時における植生データ

(2) 土質変化による課題と対策

切土掘削施工では岩掘削となる場合がある。岩掘削時の状況を図 2-2-7 に示す。岩部掘削では整形が凹凸となる。整形完了後の法面を図 2-2-8 に示す。掘削時には振動が伴うため、使用機械も精密機械である ICT 建機ではなく大型ブレイカーを利用する。法面の仕上げには剥離のリスク対策でモルタル吹付工が多く採用される。吹付完了後の状況を図 2-2-9 に示し、取得した点群データを 2-2-10 に示す。出来形管理は設計面の整形完了を確認するためにデータ取得するが、維持管理利用データは数年後に再計測することで風化や剥離の進行を定期的に比較することができ有効であると考えられる。また目視では分かりにくい微細な変化も数値データで比較できる。



図 2-2-7 大型ブレイカーによる岩掘削状況



図 2-2-8 岩掘削後整形状況



図 2-2-9 モルタル施工完了



図 2-2-10 出来形点群データ

(3) 小構造物施工の課題と対策

ICT 施工では大型建機が主流となる。細かな作業ができないため小型排水路等の小構造物では 3 次元設計データに反映させずに施工する。小段排水の説明を図 2-2-11 に示し、施工完了後の状況を図 2-2-12 に示し、取得した点群データを図 2-2-13 に示す。また出来形簡易要領案でも除外対象となっている。維持管理の視点では排水溝のシールコンクリート面のクラック等の観測により異常の有無を確認できるが高所での作業を伴うため、効率化の観点からは目視点検の方が現実的と考える。BIM/CIM データがあれば異変箇所のデジタル管理が可能となる。

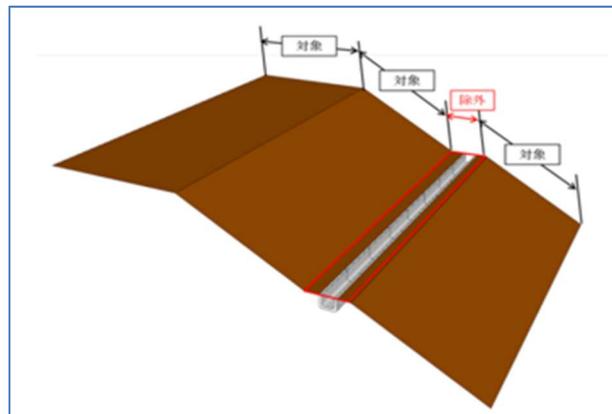


図 2-2-11 小段排水説明図



図 2-2-12 施工後の小段排水

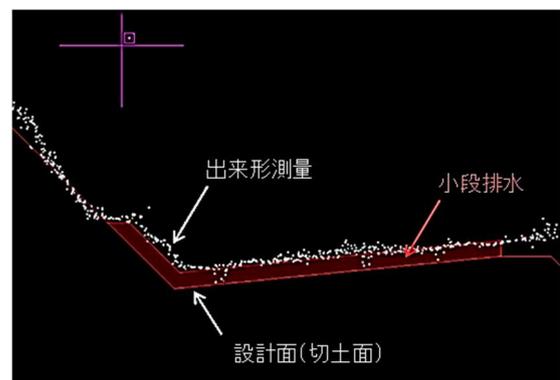


図 2-2-13 取得した点群データ

(4) 不可抗力な状況でのデータ活用の課題と対策

3次元設計データを利用した出来形面管理では現場に対応したデータ作成が求められる。実現場においてはやむなくデータ修正が必要な場合があり，その事例を示す。道路改良工事で主に切土工事であったが側溝工事は次工事業者施工であり素掘り側溝仕上げとなる。掘削完了後を図2-2-14に示し，取得した点群データを図2-2-15に示す。岩掘削のため，掘削範囲設計範囲をクリアするためには広めの掘削となる。設計面との比較を図2-2-16に示す。道路側は路床施工までとなり，ヒートマップ出来形管理では道路幅が狭くなる。対策としては掘削部分を除いたヒートマップを作成した。作成した出来形管理図を図2-2-17に示す。3次元設計データの修正にも手間と時間を要する結果となったため，数値のみでなく見た目のデータ判断が可能となるような対応が求められる。



図 2-2-14 掘削完了後

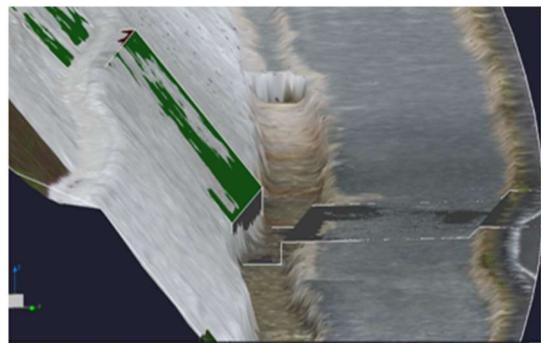


図 2-2-15 掘削完了後

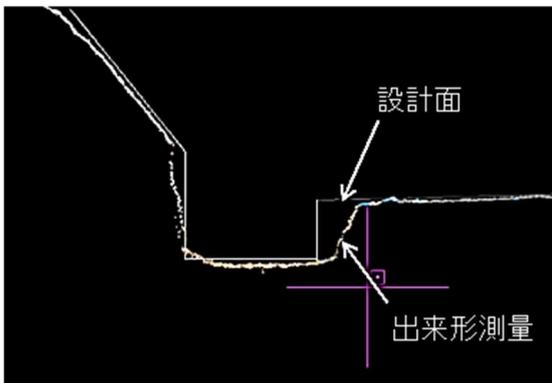


図 2-2-16 側溝掘削後の点群データ

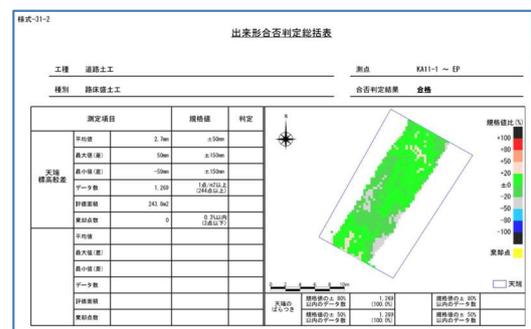


図 2-2-17 掘削部分を除いたヒートマップ

(5) 水反射の影響による課題と対策

点群データ取得時に影響のあった実務例を示す。UAV 測量では水面の反射や透過が画像マッチングエラーを引き起こし、水面の範囲によって正確な点群データの取得が困難となる場合がある。実現場では降雨により水たまりができる場合がある。施工現場内に水が溜まった状況を図 2-2-28 に示す。吸水ポンプによる排水も時間が掛かり、完全に水を抜くのは困難となる。実験として水の溜まった水路で TLS を利用して点群のデータ取得を試みた。TLS でも濡れた路面ではデータ採取が困難とされている。想定通り、はじくような点群データが採取された。取得した点群を図 2-2-29 に示す。全体に分散されているわけではなく、水たまりの影響と判断できる範囲のため、対策としてはデータ取得後に点群処理ソフトウェアを利用して余分な点群の削除となる。作成したヒートマップを図 2-2-30 に示す。



図 2-2-28 降雨後の現場状況



図 2-2-29 取得して点群データ

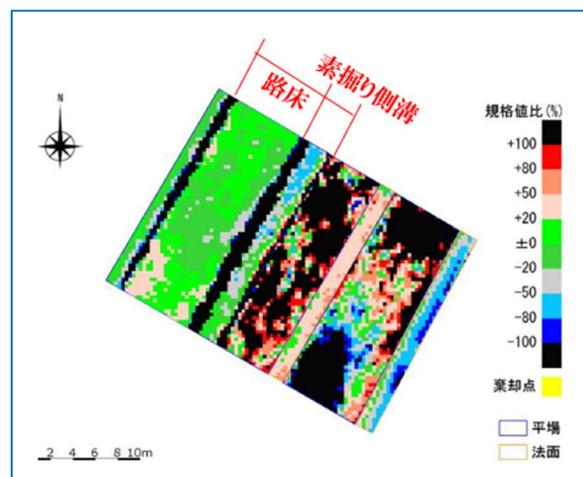


図 2-2-30 ヒートマップ出来形帳票

(6) 3次元設計データ作成時の課題と対策

ICT 施工の出来形管理では出来形管理範囲の3次元設計データと現況の点群データの差分を管理する。基本的に3次元設計データは設計者作成となるが、実務では施工会社作成ケースが多い。一般的には管理測点は道路では@20mとなり河川では@25mとなる。管理測点の横断図があるが変化点の横断図はない場合が多い。追加作成箇所を図2-2-31に示す。新たな横断図作成では平面図，縦断図，前後の横断図の要素を理解しながらの作成となり負担割合が多くなる。デジタルデータは作成者本人が作成しそのまま利用するため間違っただデータであっても気が付かない。対策としては作成者と確認者の2重チェック体制の必要がある。施工時の出来形管理データと維持管理時の点検データを比較し，変化を分析することでより合理的な維持管理手法が提案できると考える。そのためには維持管理時にどのように活用されるかを示す必要がある。

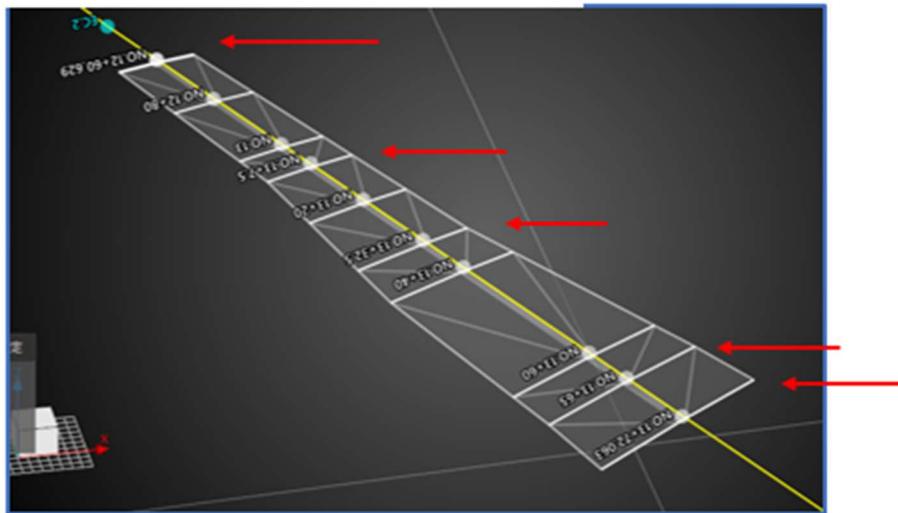


図 2-2-31 追加作成する横断箇所

(7) ICT 建機運用時の課題と対策

ICT 建機は 3 次元設計データと GNSS を活用することで高精度な施工を実現する技術である。主な機能として自動制御、施工履歴の記録、3D 設計データとの連携がある。GNSS には多くの誤差要因が存在し、それが施工精度に影響を及ぼす。主な誤差要因として衛星配置の誤差、電離層・対流圏遅延・マルチパス誤差・受信機の精度・基準局との距離による誤差等がある。また、太陽フレアの極大期による影響、山間部等における衛星視認が狭い場所、気温変化が大きいなど現場環境特有の誤差も影響する。そのため常時高精度を求めるのは不可能といった課題がある。予防対策としては施工前の通信環境調査が重要であり、特に時間帯による誤差の影響も必要となる。時間帯による精度誤差の場合には高精度時間帯に集中利用するなどの工夫が必要となる。施工時には DOP 値の予報値を利用することもあるが、オペレーターに誤差が発生することを事前に認識させておくことで、早期発見につながる。バックホウの場合には定時的なバケット刃先の精度チェックが有効となる。また、衛星測量では人工衛星の追尾性といった特徴もあり、計測時間の経過とともに誤差が拡大する傾向となる。その場合には電源を入れ直し、初期化することで対応できる。維持管理においても ICT 技術を利用した測量手法の活用は今後増加すると見込まれる。施工時の通信環境を把握しておくことは維持管理時の効率化につながると考える。ICT 建機の原理を図 2-2-32 に示す。

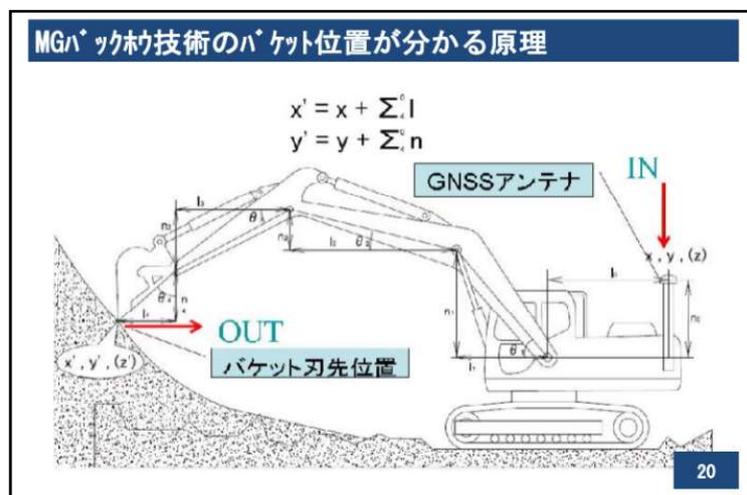


図 2-2-32 ICT 建機の原理

参照 独立行政法人土木研究所 情報化施工説明資料

(8) 盛り土施工時の課題と対策

ICT 建機を活用した切土および盛土工事の施工事例は多く報告されているが、河川築堤工事におけるマシンコントロール（MC）を用いた施工事例の詳細な記述は少ない。施工プロセスや技術的特徴について詳述する。堤防工事における課題として、転圧ローラ使用時の法肩の転圧不足や端部施工に伴う転落リスク、降雨時の法面浸食リスク、および土砂流出による河川環境汚染が挙げられる。また大型重機による小規模作業の困難さに加え、MC 施工では設計面での停止により MC 能力が制約される。これらの課題に対する対策として、法肩の転圧不足については 50 cm～1 m 程度の余盛をすることで転圧幅を広げて施工範囲を確保した。これにより余裕幅が確保され、転落リスクも低減した。また一定の高さ以上で施工時に法面整形することで途中段階での浸食を防止できる。土砂流出による河川汚染対策としては、3次元設計データ作成時に堤防天端に河川と反対方向の勾配を設けた。さらに法面浸食を防ぐため小堤を築き、一定距離ごとに仮排水パイプを設置して沈砂池まで雨水を誘導した。3次元設計データの作成においては施工に合わせたデータ作成が必要であり、バケットの先端に対応するデータを考慮して施工範囲より広めに作成する必要がある。また、余盛を行うことで、盛土施工は切土のように掘削しながらの施工となるため、MC の能力を十分に生かすことが可能となる。さらに ICT 建機は大型が一般的であるため、小規模構造物の掘削には適していない。そのため、3次元設計データにも反映させない方針とした。盛土施工は通常 30 cm ごとの転圧施工となるため、3次元設計データも 1 層ごとに作成するか、また建機システムのオフセット機能を活用するかを選択できる。

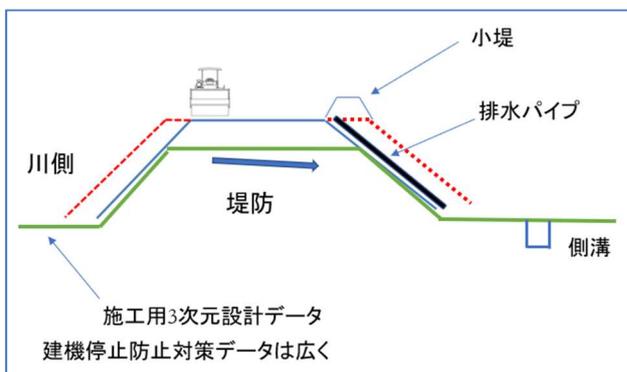


図 2-2-33 河川堤防施工時の説明図



図 2-2-34 施工事例

2. 2. 4 結言

第2章では、高速道路拡幅工事及び河川築堤工事での施工事例を元に、ICT施工の実務における課題と対策を検証した。その結果をまとめ考察する。

・UAV測量における課題と対策

施工途中のUAV測量は再撮影が難しく、影の伸縮や太陽光の影響を防ぐために、撮影時間を10:00~15:00に固定し、重機稼働時は12:00~13:00に撮影した。また評定点なしでの検証では、100mの延長につき12mの高さ誤差が発生した。また、評定点外のデータ精度が不明で、誤差を考慮しないリスクがあるため、精度不明なデータは削除する対策を講じた。

地方建設会社がICT施工を内製化してUAV測量する場合、評定点などの対空標識設置は現場職員が担当することもあるため、標定点及び検証点の重要性を理解する必要がある。また、作成したデータの特性を理解し、そのデータを適切に活用することが求められる。

・施工時における課題と対策

ICY建機に搭載する3次元設計データを構成するTINは、2次元では平行線の一方を変更しても面の作成が可能であるが、3次元においてはねじれが発生し、2面が生成されるという特性を有している。施工現場においては、一定の法面勾配が維持されることが多いものの、土質の変化や既設物とのすりつけ、また急カーブ施工等、すべての施工条件に対応することが困難であるという課題がある。対策として、特に法面の勾配が変化する場面ではオペレーターの技量に依存する「すりつけ施工」が求められる。

TINは直線を結んで作成され、曲線を表現するができないという制約がある。土木工事は自然環境を相手にするため、曲線を多く含むことが一般的である。このため、将来的には曲線に対応可能なデータ構築の必要性が高まると考えられる。

・データ取得時期の課題と対策

中規模以上の法面の段階施工では、法面整形後にまとめて出来形測量を行うことがある。大雨による浸食の恐れがある場合は速やかに植生を行う必要がある。UAV測量では、植生後のデータ取得が困難になるため、植生前の撮影が重要であり、レーザー機器を使用した測量も繁殖が進むと難しくなるといった課題がある。対策として、小段ごとの測量が望ましいが、出来形管理データの取得に関する費用は通常、当初工事費に含まれているため、測量回数の増加はコスト面で負担となり、通常の方法が選択されやすい。施工後のデータは維持管理や異常検知に有効であり、維持管理を意識した発注形態や施工管理が重要である。

・土質変化による課題と対策

切土掘削施工では岩掘削が発生し、整形後の法面は凹凸が生じる。掘削時には大型ブレイカーを使用し、法面の仕上げには剥離リスク対策としてモルタル吹付工が多く採用される。このような施工はICT建機に適しておらず、設計データと異なるデータが取得されるため、ICT施工に不向きといった課題がある。対策として、出来形管理は設計面の整形完了を確認するためにデータ取得する。維持管理では、数年後に再計測することで風化や剥離の進行を比較することが可能となり、目視では確認しにくい微細な変化も数値データにより把握できる。これにより維持管理において有効な手段となる。そのため、ICT建機未使用現場でも建機を除いたICT施工管理を行うことが望ましいと考える。

・小構造物施工の課題と対策

ICT 施工では大型建機が主流となるため、小型排水路などの小構造物に対応できないといった課題がある。対策として、3次元設計データに反映させずに施工するケースが多い。維持管理の観点では、通常の道路側溝といった場合は点検量も膨大であるため、従来の点検間隔でも簡易補修による対応が可能であり、特段の問題は生じないと考えられる。一方で、法面の小段排水などの斜面崩壊予防を目的とした点検については、定期的な管理点検が必要であり、施工完了時のデータ確保も重要となる。点検方法としては、排水溝のクラック等を目視点検で確認することが現実的であるが、iPhone の LiDAR 機能のような移動型スキャンツールを活用することで作業の効率化が図れると考える。さらに、BIM/CIM データを用いることで異常箇所をデジタル管理でき、点検業務の効率化が期待できる。

・不可抗力な状況でのデータ活用の課題と対策

3次元設計データを活用した出来形面管理においては、現場の状況に応じたデータ作成が求められる。実際の施工では、設計データの修正が必要となる場合があり、本事例では道路改良工事における切土および素掘り側溝施工において、設計範囲を満たすために掘削範囲を広げる対応が取られた。特にヒートマップを用いた出来形管理では、掘削部分の影響により道路幅が狭く表示される課題が生じたため、掘削部分を除外したヒートマップを作成することで対応した。結果として、3次元設計データの修正には手間と時間を要し、数値だけでなく視覚的なデータ判断が可能な管理手法の導入が求められることが明らかとなった。

・水反射の影響による課題と対策

点群データの取得は環境条件の影響を受けやすく、UAV 測量では水面の反射や透過によりマッチングエラーが発生し、正確なデータ取得が困難となる場合がある。施工現場でも降雨による水たまりが影響を及ぼし、TLS を用いた測定では濡れた路面でデータのばらつきが確認された。対策として、取得後に点群処理ソフトで不要な点群を除去することで、データ精度の向上が可能であることが示された。UAV 測量やレーザー機器を利用した測量は気象条件の影響を受けやすい。降雨時又は降雪時にはドローン墜落の危険性は大きくなり、地上型レーザー測量でも雨粒を拾うため向いていない。気象条件の確認などが重要となる。

・3次元設計データ作成時の課題と対策

ICT 施工の出来形管理では、3次元設計データと現況の点群データの差分を管理する。設計データは施工会社が作成することが多く、変化点の横断図が不足し、新たに作成する負担が大きい。また、デジタルデータの誤りに気づきにくい課題があり、対策として二重チェックが必要である。施工時の出来形管理データと維持管理時の点検データを比較・分析し、合理的な維持管理手法の提案に活用することが重要である。

・ICT 建機運用時の課題と対策

ICT 建機は、3次元設計データと GNSS を活用し、高精度な施工を実現する技術である。一方で、ICT 建機で利用する GNSS の誤差要因には衛星配置や電離層遅延などがあり、施工精度に影響を及ぼすといった課題がある。対策として、施工前の通信環境調査や高精度な時間帯の活用、定期的な機器の初期化が有効である。さらに、施工時の通信状況把握は地域の通信環境の理解にもつながり、維持管理時の通信環境の把握にも役立つ。

・盛り土施工時の課題と対策

ICT 建機を活用した河川築堤工事では、マシンコントロール (MC) の活用に制約があり、転圧不足や施工端部のリスク、降雨時の浸食・土砂流出などの課題がある。対策として、法肩の転圧不足には余盛を行い、施工幅を確保し、浸食防止のために法面整形や小堤、仮排水パイプを設置。河川汚染防止策として、堤防天端に逆勾配を設けた。3D 設計データは施工に適した範囲で作成し、MC を活かすために余盛を考慮。小規模構造物は ICT 建機に適さず、設計データには反映しない方針とした。盛土施工は 30cm ごとの転圧を考慮し、1 層ごとのデータ作成やオフセット機能を活用する方法を選択した。さらに、災害発生時などの迅速な対応が求められる場合、施工時に使用した 3 次元設計データを再利用することで、施工にかかる準備時間を大幅に短縮できる可能性がある。施工時に作成する 3 次元設計データは施工用に加工するため、工事完了後には破棄される。施工会社が維持管理を意識することによって、効率化が実現可能であることが示される。

第3章 UAV 測定の検討

3. 1 諸言

ICT 技術の急速な進展により実務でも利用機会が増え、基礎研究だけでなく実用研究結果も求められている。実務においてはそれぞれ利用する企業によってノウハウが蓄積されているが報告される機会は少ない。

また、これらの技術は設計時期または施工時期だけでなく維持管理に利用できるツールとしても注目されている。そのため、実務工事現場で ICT 技術を利用した効率化の検証に取り組んだ。河川堤防築堤工事での UAV 測定の実用化を目的に、実際の現場でデータ収集を行い、同時にスキルを身に付けるための実験を試みた。UAV 測定による法面管理データを作成し、複数データを利用することで、精度が飛躍的に向上し、その成果をまとめた。しかし、UAV の測定精度を達成するためにはさらに様々な条件のデータが求められる。今回は主に西日本豪雨災害による真備緊急治水対策プロジェクトの一部である河川堤防築堤工事での UAV 測定等を中心に、国道 2 号線笠岡バイパス工事、岡山環状南バイパス工事等のデータを交えて検証した。

3. 2 自動定点撮影

ドローンを利用した高高度からの撮影は地上撮影に比べて撮影範囲が広く、現場関係者以外にもわかりやすい。施工現場でのドローン利用は測量に限らず、工事の進捗状況確認写真でも利用する。土木現場に限らず建築現場においても同程度の要望がある。撮影頻度は毎月1回程度が多い。毎月撮影する場合、前回撮影した写真と同じ構図の定点写真となる。従来の自動操縦アプリではウェイポイント飛行経路指定をすることで撮影箇所付近毎にドローンを停止させることができたが、撮影は手動であった。前回写真と見比べながらの撮影は時間を要する。今回はドローンの離陸から空中での撮影そして着陸までの一連の流れを自動化し効率化できるか実験した。毎回同じアングルの写真にするためにはドローンの位置を正確にする必要がある。ドローンにRTKモジュールを搭載し、測位通信には「ichimill」を採用した。「ichimill」は準天頂衛星「みちびき」など、GNSSからの信号受信ができる独自の固定局と電子基準点を利用している。また付属操縦アプリのPilot2は撮影した場所だけでなくカメラの撮影方向などの条件も記録させることができる。定点撮影は現場の状況確認以外にも維持管理において有効となる。広範囲にわたる複数の写真記録を効率的に撮影するには必須の技術となる。また撮影を自動的に行うことで撮影者が変更となっても同じ撮影ができる。自動飛行撮影計画を図3-2-1に示し、1か月違いの撮影した画像を図3-2-2, 図3-2-3に示す。

仕様機材

ドローン本体：DJI MAVIC3E RTKモジュール

自動操縦アプリ：付属 DJI Pilot2

測位通信：ソフトバンク 高精度測位サービス「ichimill」



図3-2-1 自動飛行撮影計画



図 3-2-2 定点自動撮影画像 (2024 年 3 月撮影)



図 3-2-3 定点自動撮影画像 (2024 年 4 月撮影)

3. 3 法面データ取得のための UAV 測量

一般的に高精度な測量には専用の高価な UAV（高精度カメラと積載可能なドローン）が必要とされ、利用頻度の多いコンサルタント企業などが使用している。小型で扱いやすい汎用ドローンは低コストで導入可能であり、施工業者に普及している。様々な測量条件の異なる建設現場では、小型汎用ドローンでの精度確保はノウハウが必要となる場合がある。また、河川堤防法面のような高低差のある場所では地上レーザー測量が適しているが、機械を据替する手間に労力を必要とする。河川維持管理を想定し、河川法面における UAV 測量の精度検証を実施する。

河川築堤後の盛土地形は高低差が発生する。実現場では様々な地形となるため、その都度に飛行方法の検討が必要であり、ノウハウや経験といったものが必要となる。ドローンの飛行高度に対して高度差があるため、通常 UAV 測量では精度結果がでない。今回は築堤後の法面部分の精度を検証する。

計測対象となる河川法面を図 3-3-1 に示し、堤防断面を図 3-3-2 に示す。



図 3-3-1 河川堤防法面の 3 次元設計データ

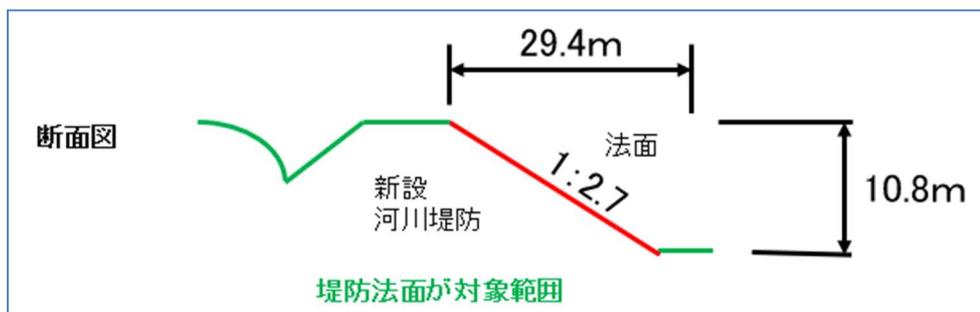


図 3-3-2 河川堤防法面の断面

検討内容

計測範囲は河川堤防法面のみを対象とする。撮影幅は約 30m で高低差は 10.8m となる。1 回目は通常通りの UAV 測量をおこなう。2 回目に低高度撮影を行い比較検討する。3 回目に堤防法面に対して斜め撮影を行う。三つ目に低高度撮影写真と斜め撮影の写真のデータ合成を行う。河川堤防法面の断面図を図 3-3-7 に示す。

評定点設置

「UAV を用いた公共測量マニュアル」では外側評定点の間隔が 100m で設定されている。これまでの経験により、大型産業ドローンに搭載した性能のよいカメラ利用時には飛行高度を高く設定できるが、小型汎用ドローン利用時には高度が低くなるため、評定点間隔が長すぎると判断し 100m から 80m に置き換え精度向上する。ガイドラインによる対空標識の配置を図 3-3-3 に示す。外部評定点は最も高い位置と低い位置に設定した。法面上部と下部に設置した。また、内部評定点は外部評定点とのバランスが重要となる。検証点は評定点の半数以上となるように均等設定した。



図 3-3-3 マニュアル記載の評定点の設置間隔

ドローンのカメラ設定

小型汎用ドローンでの飛行高度は撮影目的によって変更する。0.05 cmの出来形精度を目標とした。ドローンの飛行地点を堤防天端に設定した。カメラの撮影設定はマニュアルモードかF値固定が望ましいが、課題は飛行高度43mに対して堤防高度約10mは高低差がありピント調整が困難となる。カメラの適正露出はシャッタースピード、F値、ISO値のバランスが重要となる。空中飛行中のドローンは地上に固定されたカメラと違い常に手振れ状態となるためシャッタースピードは速く設定する必要がある。F値は8前後をよく利用する。ISO値はノイズが発生するため100固定とする。最適な設定では黒つぶれが発生するため、対策としてAUTO撮影することにより写真撮影することとした。ドローンによる撮影時のイメージを図3-3-4に示す。

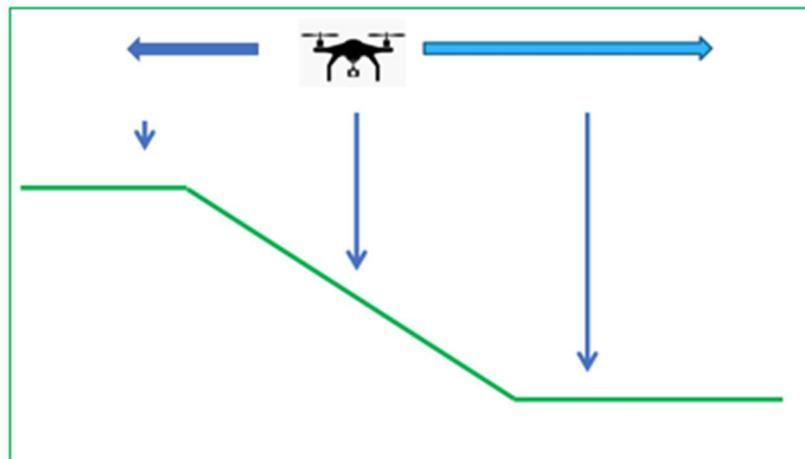


図 3-3-4 ドローン撮影における高低差のイメージ

飛行モード検証

ドローンの飛行撮影モードには飛行しながら連続撮影する方法と毎回撮影ポイントで一旦静止する方法がある。小型ドローンでも測量専用機の場合、小型カメラにメカシャッター搭載が多く影響は少ないが、電子シャッターの場合、写真データの記録に時間を要するため、写真が斜めにゆがむローリングシャッター現象が発生する。そのため毎回撮影ポイントで一旦停止するホバリング撮影が必須となる。DJIMAVIC2PROは電子シャッターのためホバリング撮影とした。

今回の実験後に DJIMAVIC3 を入手し比較した。JDIMAVIC2 のホバリング撮影では飛行時間 15 分で予備電池を 3 本使用する。電池の入れ替えを含む総飛行時間は 1 時間程度の撮影時間となる。JDIMAVIC3 の飛行しながらの撮影だと 15 分のフライトとなり 4 分の 1 の時間短縮となる。UAV 測量ではメカニカルシャッターは推奨機能となる。

飛行高度検証

「UAV を用いた公共測量マニュアル」では位置精度 0.05m にするためには地上画素寸法 (GSD) を 0.01m 以内に計画する。逆説的に言えば地上画素寸法を 0.01 で設定すると位置精度が 0.05m 程度としかならない。撮影対象に高低差があれば失敗の可能性もある。そこで地上画素寸法 1cm では飛行高度 43m となるため、飛行高度を 30m に設定して地上画素寸法の平均値を 0.7cm として飛行させた。UAV を用いた公共測量 (案) 記載内容を図 3-3-5 に示し、低高度撮影による工夫内容を図 3-3-6 に示す。

1 撮影する空中写真の地上画素寸法は、作成する三次元点群の位置精度に応じて、次表を標準とする。

位置精度	地上画素寸法
0.05m 以内	0.01m 以内
0.10m 以内	0.02m 以内
0.20m 以内	0.03m 以内

図 3-3-5 UAV を用いた公共測量 (案) 参照

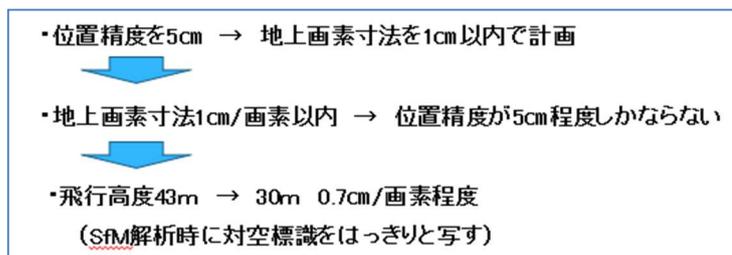


図 3-3-6 低高度撮影による工夫

通常高度飛行の検証結果

通常高度での検証点結果を図 3-3-7 に示す。ドローンは堤防天端から 43m の高度で飛行させており、高低差の影響を受けて平均撮影高度は 48.0m の結果となっている。また Y 値で 5 cm、Z 値においては 10 cm 程度の誤差が出ている。起工測量での精度要求は 10 cm であるが、出来形基準では 5 cm のため、精度が出ていないと判断する。

低高度飛行の検証結果

低高度での検証結果を図 3-3-7 に示す。ドローンは堤防天端から 20m の高度で飛行させた。平均撮影高度は 31m となり数値はかなり改善された。X, Y 値は大幅に改善されたが Z 値に対しては精度を満していない。

高度比較データ

通常高度 (表1- A2)

・地上画素寸法 0.01m 平均撮影高度48.0m

ラベル	X 誤差 (cm)	Y 誤差 (cm)	Z 誤差 (cm)	合計 (cm)	画像 (pix)
111016	-1.94315	0.562102	-2.20202	2.9901	0.327 (8)
111003	0.760845	-0.203666	10.423	10.4527	0.371 (8)
111007	2.68331	-5.26081	10.3993	11.9592	0.302 (5)
111018	-2.66686	3.86842	-5.24397	7.04103	0.512 (5)
合計	2.16027	3.27865	7.89196	8.81473	0.378

テーブル 6. 検証点.
X - 東経, Y - 北緯, Z - 高度.

低高度 (表1- B3)

・高度 堤防天端 ~ 20m に設定
 地上解像度 0.0071m = 7.1mm/PIX
 平均撮影高度31.0m

ラベル	X 誤差 (cm)	Y 誤差 (cm)	Z 誤差 (cm)	合計 (cm)	画像 (pix)
111018	-0.272729	2.73474	6.90191	7.42897	0.401 (48)
111016	2.20449	1.23757	-1.09965	2.75692	0.756 (44)
111003	0.727257	-2.35744	-5.73267	6.24099	0.671 (38)
追加 111005	-2.01136	-1.65283	-5.14119	5.76274	0.416 (37)
追加 111007	1.35274	-1.11159	-0.959459	1.99652	0.417 (21)
追加 111013	0.766134	-0.350657	8.15023	8.19366	0.432 (10)
合計	1.40982	1.76344	5.40814	5.86048	0.559

テーブル 6. 検証点.
X - 東経, Y - 北緯, Z - 高度.

図 3-3-7 飛行高度比較データ

斜め撮影の検証結果

市販のドローンを計画飛行させるソフトウェアには地形追従モードがあり、緩い勾配には高度一定飛行が可能となる。しかし堤防法面勾配ほど急な斜面には向いていない。河川堤防法面が斜面であるため、カメラの向きを斜め撮影することにより斜面に対して直角に近い角度ほど精度がよくなると考え実験した。カメラ角度は単純に 45° とした。

斜め撮影した結果を図 3-3-8 に示し、ドローンは地上から斜めに撮影した。そのイメージを図 3-3-9 に示す。

斜め撮影 (表1-B5)

・高度 堤防天端~20m に設定 平均撮影高度41.4m
地上解像度 0.0089m = 8.9mm/PIX

ラベル	X 誤差 (cm)	Y 誤差 (cm)	Z 誤差 (cm)	合計 (cm)	画像 (pix)
111003	1.35862	2.75061	5.58504	6.37215	0.771 (52)
111016	4.71145	1.94136	1.35107	5.27181	0.471 (31)
111018	-2.32439	-0.583005	-4.77537	5.34292	0.284 (21)
111005	0.145827	-6.14345	-1.96944	6.45306	0.355 (17)
111007	-1.39099	4.27823	5.81286	7.35034	0.420 (13)
合計	2.50609	3.68021	4.32412	6.20665	0.573

テーブル 6. 検証点。
X - 東経, Y - 北緯, Z - 高度。

図 3-3-8 斜め撮影時データ

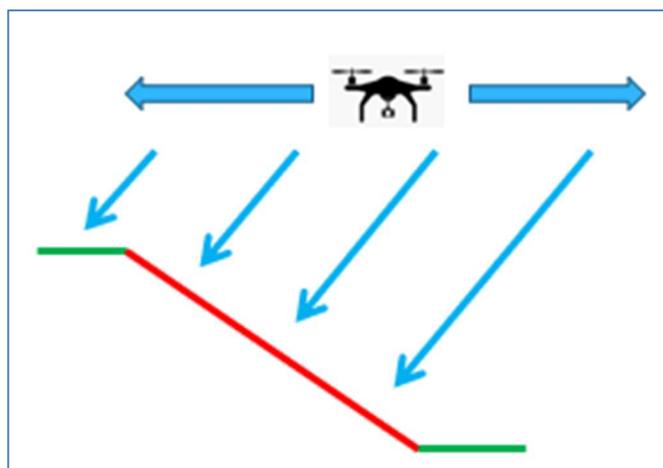


図 3-3-9 斜め撮影イメージ

3. 4 飛行方向の違いによる影響

測量対象が河川堤防のように細長い領域の場合、飛行方向の影響による違いの影響を検証した。飛行方向は図 3-3-10 に示す。

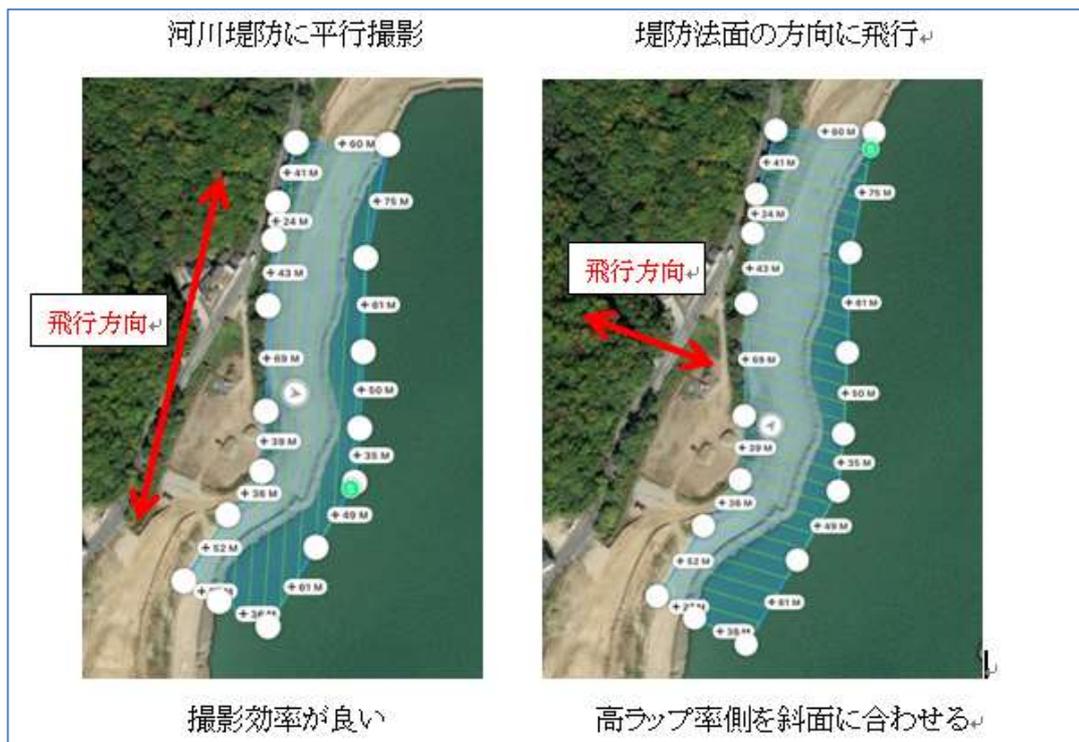


図 3-3-10 撮影コースの違い

結果

測量の結果次のデータが得られた。飛行方向を変えて測量した結果は予想したものと逆の結果となった。高ラップ率側を計画斜面側に合わせるよりも堤防に平行飛行させた方が良結果となった。数値は数ミリであり、誤差の範囲といえるが、A、Bの写真データを合算し解析をした結果、さらにデータ改善がされた。今回のデータは堤防築堤前の比較的フラットな状況での実験となる。RMSEの比較を図3-3-11に示し、元のデータを図3-3-12に示す。

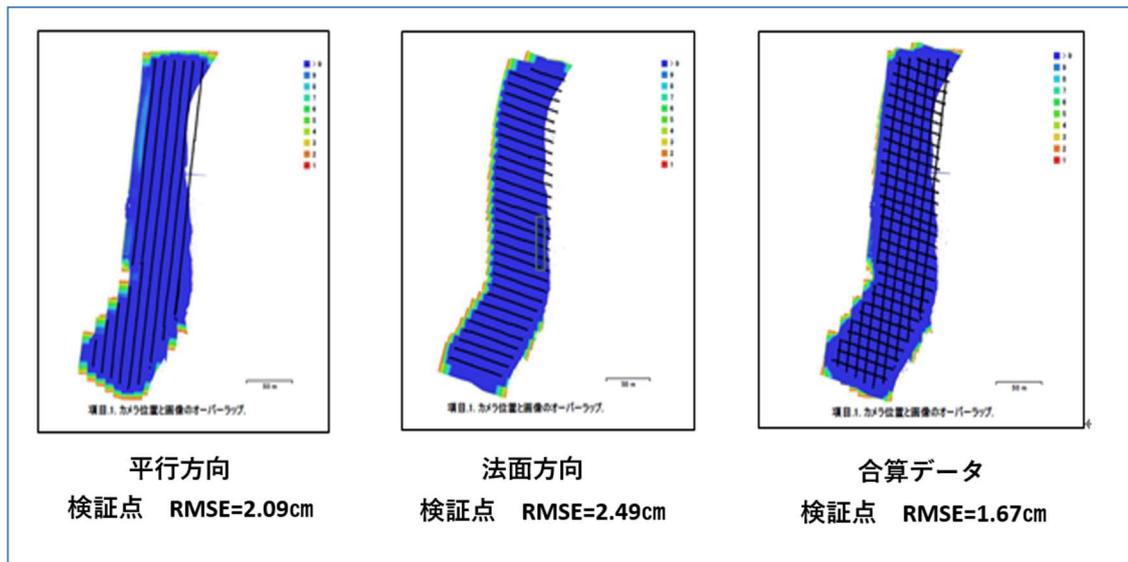


図 3-3-11 検証点精度比較結果

① 河川法面に並行				② 河川法面と直角				③ 合算データ			
基準点データ				基準点データ(0.4mm以下は0を記入)				基準点データ			
ラベル	X誤差(mm)	Y誤差(mm)	Z誤差(mm)	ラベル	X誤差(mm)	Y誤差(mm)	Z誤差(mm)	ラベル	X誤差(mm)	Y誤差(mm)	Z誤差(mm)
1123-7	10	-3	-9	1123-7	-23	14	-35	1123-7	-1	14	-20
1123-15	1	-22	-8	1123-15	-8	20	18	1123-15	-5	-2	8
1123-6	0	-2	-2	1123-6	-4	-7	-3	1123-6	-1	-3	-2
1123-19	27	-7	-4	1123-19	-32	13	-1	1123-19	-15	21	-4
1123-5	7	-26	-6	1123-5	0	18	4	1123-5	-4	20	-4
1123-9	8	10	3	1123-9	-3	6	-14	1123-9	8	5	-5
1123-16	-3	2	-4	1123-16	0	1	3	1123-16	-5	-1	-1
1123-10	5	-9	15	1123-10	-10	21	4	1123-10	2	8	13
1123-14	1	-1	-7	1123-14	15	5	18	1123-14	10	-7	5
1123-21	-15	14	10	1123-21	4	-31	-18	1123-21	-2	1	-3
1123-3	-18	10	7	1123-3	16	-12	16	1123-3	-10	-7	10
1123-17	-8	8	0	1123-17	23	-5	5	1123-17	8	-12	2
1123-1	-8	13	9	1123-1	7	-20	0	1123-1	4	-14	3
1123-12	-7	14	-4	1123-12	15	-23	4	1123-12	10	-21	-2
検証点データ				検証点データ				検証点データ			
ラベル	X誤差(mm)	Y誤差(mm)	Z誤差(mm)	ラベル	X誤差(mm)	Y誤差(mm)	Z誤差(mm)	ラベル	X誤差(mm)	Y誤差(mm)	Z誤差(mm)
1123-8	12	-6	10	1123-8	-22	15	-18	1123-8	1	10	-1
1123-11	14	7	-4	1123-11	15	12	4	1123-11	19	4	-1
1123-18	18	-9	-20	1123-18	-18	12	6	1123-18	-8	9	-9
1123-4	-2	-8	14	1123-4	9	2	12	1123-4	-8	6	10
1123-2	-14	14	3	1123-2	12	-12	-7	1123-2	0	-7	-3
1123-13	-11	16	12	1123-13	23	-3	20	1123-13	8	-10	18
1123-20	-1	11	20	1123-20	-19	-7	-22	1123-20	-13	16	5

図 3-3-12 検証点結果データ

3. 5 データを利用した精度向上の検証

合算データ結果

低高度で撮影したデータと斜め撮影したデータを合算して解析した結果を図 3-3-13 に示す。結果は最大誤差が 1.6 cm となり、飛躍的に精度向上させることができた。

ラベル	X 誤差 (cm)	Y 誤差 (cm)	Z 誤差 (cm)	合計 (cm)	画素 (pix)
120906	-0.133562	0.865281	0.998656	1.3281	0.448 (84)
120914	0.362641	-0.808742	0.599223	1.06988	0.682 (69)
120912	0.577711	-0.464454	1.07366	1.30469	0.641 (63)
120907	0.86669	0.235545	0.465207	1.01146	0.598 (31)
120903	-1.52618	1.25388	0.228172	1.98834	0.450 (29)
120910	1.63387	0.60045	0.663586	1.8629	1.462 (17)
合計	1.01923	0.775321	0.732342	1.47522	0.661

テーブル 6. 検証点.
X - 東経, Y - 北緯, Z - 高度.

図 3-3-13 合算データ

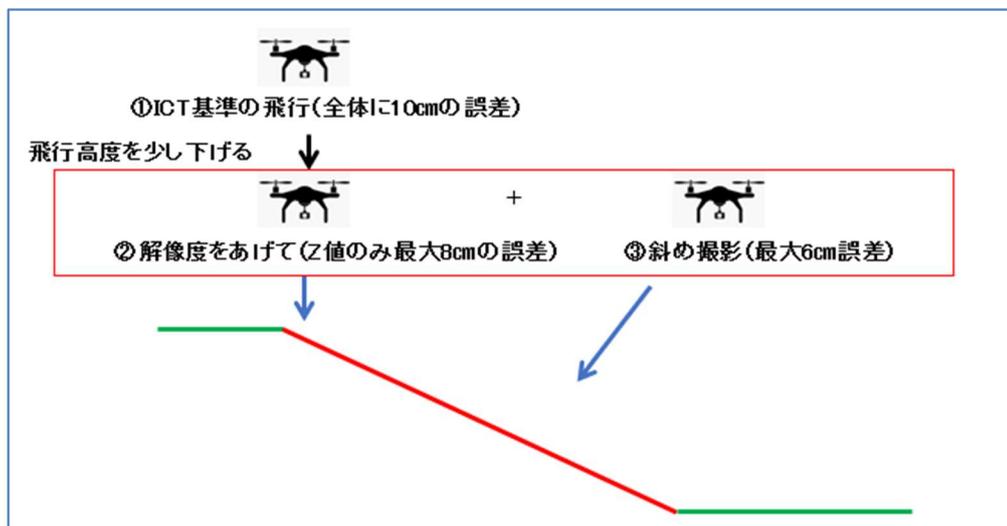


図 3-3-14 検証結果のまとめイメージ

まとめと考察

河川堤防構築後の堤防法面を対象とし、いくつかの撮影パターンで出来形測量を想定した精度検証の実験をおこなった。その結果、平行撮影データと斜め撮影データを利用することにより、精度を飛躍的に向上させることができた。その概略を図 3-3-14 に示す。

一方で、UAV 測量においては2重データをとると解析に失敗する可能性も高くなるので推奨はできない。実務においては手動でラップ率を10%程度で法面に対して直角に撮影をして通常撮影に追加することで写真枚数を減らしている。今回は斜め撮影の効果を検証するためにおこなった。現場でドローンを2回飛行させるには非効率となる。

UAV 測量の工程は見込まれず、現場稼働日に飛行させるため、安全性を考慮し昼休憩の12:00~13:00 までの1時間限定となる。今回はMavic2Pro を利用したが電子シャッターのため毎回撮影箇所ですまるホバリング撮影とした。河川現場は風が強く、一度のフライトは10分が限界で予備バッテリーを3回交換し、1時間程度かかっている。

今回の実験後に入手したMavic3E だとメカニカルシャッターで飛行しながらの撮影ができ、飛行速度も速いので1時間の撮影時間もバッテリー交換することなく15分で撮影できる。1時間も飛行させると影の影響もあると想定されるのでより精度向上が見込まれる。Mavic3E の飛行計画を図 3-3-15 に示す。



図 3-3-15 Mavic3E の飛行計画例

3. 6 キャリブレーションの違いによる影響

カメラのレンズ歪みは同機種であっても個体レンズごとにパラメータ値が異なる。また、レンズの熱膨張等によっても若干歪が発生する。航空写真測量ではレンズキャリブレーションが必要であったが、SfM/MVS ソフトでは画像から各種パラメータを自動補正する機能がある。また、小型 UAV 測量では SfM/MVS ソフト等でパソコンのモニターを使用して簡易キャリブレーションが可能となる。従来の飛行方法では簡易キャリブレーションを実施した場合、若干精度が良くなることが多いとされておりその検証をおこなった。モニター利用のキャリブレーション時の画面を図 3-3-16 に示す。



図 3-3-16 モニター利用によるキャリブレーション

結果

解析結果は垂直写真のみの場合の場合は図 3-3-17 の結果となり、垂直+斜め撮影での

結果は図 3-3-18 となった。垂直写真のみの場合、数ミリ程度の精度向上結果となった。垂直+斜めデータの場合、数値の変更あるものの全体精度としては同程度という結果となった。それぞれのキャリブレーション結果を図 3-3-17 と図 3-3-18 に示す。

①垂直写真のみ キャリブレーションなし				②垂直写真のみ キャリブレーション(1年前)				③垂直写真のみ キャリブレーション(直前)			
基準点データ(0.4mm以下は0を記入)				基準点データ				基準点データ			
ラベル	X誤差(mm)	Y誤差(mm)	Z誤差(mm)	ラベル	X誤差(mm)	Y誤差(mm)	Z誤差(mm)	ラベル	X誤差(mm)	Y誤差(mm)	Z誤差(mm)
1203-4	-67	-38	27	1203-4	-62	5	24	1203-4	-61	-1	24
1203-7	22	0	7	1203-7	21	-1	12	1203-7	21	0	9
1203-1	-9	-70	-1	1203-1	-13	-65	0	1203-1	-10	-66	-1
1203-5	-13	81	-6	1203-5	-5	73	-1	1203-5	-11	74	-7
1203-8	67	-7	-27	1203-8	59	-11	-26	1203-8	62	-7	-25
検証点データ				検証点データ				検証点データ			
ラベル	X誤差(mm)	Y誤差(mm)	Z誤差(mm)	ラベル	X誤差(mm)	Y誤差(mm)	Z誤差(mm)	ラベル	X誤差(mm)	Y誤差(mm)	Z誤差(mm)
1203-3	-19	13	17	1203-3	-15	14	21	1203-3	-16	13	18
1203-2	-10	-32	15	1203-2	-10	-29	19	1203-2	-9	-29	15
1203-6	3	44	-3	1203-6	8	39	-2	1203-6	4	41	-2

図 3-3-17 通常のキャリブレーション比較結果

④垂直+斜めの写真 キャリブレーションなし				⑤垂直+斜めの写真 キャリブレーション(1年前)				⑥垂直+斜めの写真 キャリブレーション			
基準点データ				基準点データ				基準点データ			
ラベル	X誤差(mm)	Y誤差(mm)	Z誤差(mm)	ラベル	X誤差(mm)	Y誤差(mm)	Z誤差(mm)	ラベル	X誤差(mm)	Y誤差(mm)	Z誤差(mm)
1203-4	-2	1	2	1203-4	-3	10	2	1203-4	6	10	-1
1203-7	2	4	1	1203-7	2	2	1	1203-7	0	2	2
1203-1	0	-8	-2	1203-1	-10	-9	2	1203-1	-9	1	1
1203-5	-4	0	0	1203-5	5	2	-4	1203-5	5	-7	-4
1203-8	4	3	-1	1203-8	6	-6	-1	1203-8	-2	-5	2
*1203-5と1203-8を比較しやすいように上下入れ替え				*1203-5と1203-8を比較しやすいように上下入れ替え				*1203-5と1203-8を比較しやすいように上下入れ替え			
検証点データ				検証点データ				検証点データ			
ラベル	X誤差(mm)	Y誤差(mm)	Z誤差(mm)	ラベル	X誤差(mm)	Y誤差(mm)	Z誤差(mm)	ラベル	X誤差(mm)	Y誤差(mm)	Z誤差(mm)
1203-3	-2	3	-6	1203-3	-2	7	-6	1203-3	1	5	-7
1203-2	-2	-2	-3	1203-2	-7	-2	-1	1203-2	-5	3	-2
1203-6	-1	0	0	1203-6	4	0	-3	1203-6	3	-6	-2

図 3-3-18 合算データのキャリブレーション比較結果

キャリブレーションによる影響のまとめ

簡易キャリブレーションを行うことで、垂直写真のみの場合に若干の精度向上はみられたが誤差の範囲といえる。実務においては実行する必要性はないと判断した。また合算データでは精度に違いはみられなかった。これは写真枚数の増加により、ソフトウェアが自動修正した結果と考えられる。ドローンの進化が早いのに同様に写真解析等のソフトウェアも毎年のように進化している。

UAV 測量時の注意事項

現場においての従来施工では発注者より基準点 2 点の指示があり、その基準点を元に現場を囲むようにトラバース測量を実施し、現場施工に必要な KBM を設置する。工事現場ではその座標値を利用し施工に必要な丁張等の位置出しを行う。日本測地系座標、世界測地系座標の区別はない。ただし、ICT 施工を行う時には注意が必要なる。公共工事においては基本設計の段階から年数が経っている場合、利用しているのが日本測地系の場合がある。今回の実験対象である河川築堤工事でも日本測地系が利用されており、その他の岡山県内の対応してきた国土交通省直轄工事は全て日本測地系であった。ドローンに搭載している位置を表す数値は緯度、経度であり、SfM/MVS では緯度経度の値を世界座標系に変換するのが一般的であり、注意が必要となる。

3. 7 結言

第3章では維持管理の効率化につながる工事完成後のデータ取得を、UAV測量で利用する小型汎用ドローンを用いて試みた。まず、自動定点撮影を実践し、ネットワーク型RTKを利用することで、ドローンが正確な位置情報を取得し、撮影時間等の短縮などの効率化が可能であることを証明した。毎回複数の写真を同じ位置・同じアングルから撮影することで、施工現場では工事の進捗を正確に比較・把握でき、維持管理時の点検業務においても、写真データを時系列に並べることで問題点を早期に発見しやすくなる。

次に、河川堤防築堤工事で維持管理を想定し、河川法面の点群データの精度検証を実施した。その結果、低高度撮影データと斜め写真データを利用することで精度向上することが確認された。また、適切なキャリブレーションを実施することでも若干の精度向上結果が得られた。

通常UAV測量では、出来形管理などにおいて ± 5 cm以内の精度が要求される。起工測量では、 ± 10 cmの精度で許容されるため、飛行高度を上げ、写真枚数を減らすことが可能となる。しかし、その場合、対空標識の解像度が低下し、写真解析に失敗リスクが高まる。実務において、精度が満たされない場合の再撮影は手戻りとなり、相当なロスが発生する。そのため、毎回3 cm以内の精度を目指し、現場の地形に応じてさまざまな工夫を行ってきた。UAV測量の基本的な撮影方法は決まっているが、通常の方法に加えて工夫した写真を撮影することで精度が向上することを現場の実務を通じて経験していた。例えば、評定点の解像度を向上させるため、評定点の箇所のみを別途低高度で撮影し、複数の対空標識が1枚の写真に収まるようにした。その結果、図1-2-57のデータのように平坦な地形の点群データの検証点精度は0.7 cmとなっている。また、写真の撮影方法だけでなく、SfMソフトウェアの処理方法によっても違う結果が得られる。このような経験に基づくノウハウや技術は維持管理点検業務においても非常に有効であると考えられる。

第4章 推進工事における3次元測量技術を応用した見えるかの実証

4.1 諸言

公共工事においては、公衆災害の一因として埋設物の損傷が頻繁に挙げられ、問題となっている。本研究では、地下埋設物の3次元計測を行い、地下構造物の3次元データを取得することで、埋設物の可視化を実現した。今後、インフラ設備の維持管理や改修工事においても活用し、作業の効率化を推進するために実証する。

4.2 概要

公共工事における公衆災害の事例としては、架空線や埋設物の損傷が頻繁に挙げられる。これらの損傷は広範囲に影響を及ぼし、多額の損害賠償が発生する重大事故に発展する可能性がある。また、事故後には再発防止対策が講じられるものの、時間の経過とともに意識が薄れ、根本的な対策の実施は難しいのが現状である。架空線については目視が可能であり、ヒューマンエラーによる事故が多い。一方、埋設物の場合は作業が不可視領域で行われるため、十分注意していても損傷を避けられないことがある。埋設物には水道管やガス管など、生活インフラの大部分が含まれるが、埋設情報は2次元の図面で管理されている。しかし、実際には図面上のルートはおおよそ一致していても、正確な位置情報としての信頼性は低い。そのため、工事の際には関係機関への問い合わせ、試掘、または地下探査を実施するのが一般的である。近年、建設業界ではICT技術の発展が加速し、計測機器も進化している。ICT土工をはじめ、GNSSを活用した測量技術は急速に発展し、地上での利用は広がりつつある、しかし、衛星通信が利用できない地下では、これらの技術の活用がほとんど進んでいない。そこで、本研究では、地下埋設物に位置情報を持たせたデータを作成することで、その信頼性を高め、維持管理の効率化を図ることを検討した。測量機器を応用して点群データを作成し、不可視領域である地下の可視化を試みた。また、取得したデータを活用し、工事中の事故防止や維持管理の効率化に必要な情報の取得が可能かどうかを検証した。建設工事における公衆災害の割合を図4-1に示す。

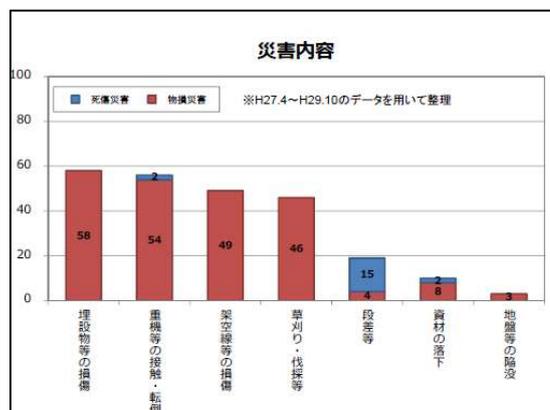


図4-1 建設工事における公衆災害内容
参照 建設工事公衆災害防止対策要綱

4. 3 実験内容と検証

(1) 計測範囲

今回は、工業用水の設置工事に伴う推進工事にて実施した。概要については図 4-2 に示す。
推進延長 L=412m 推進用鉄筋コンクリート管 ϕ 1100 土被り 平均 H=7.0m

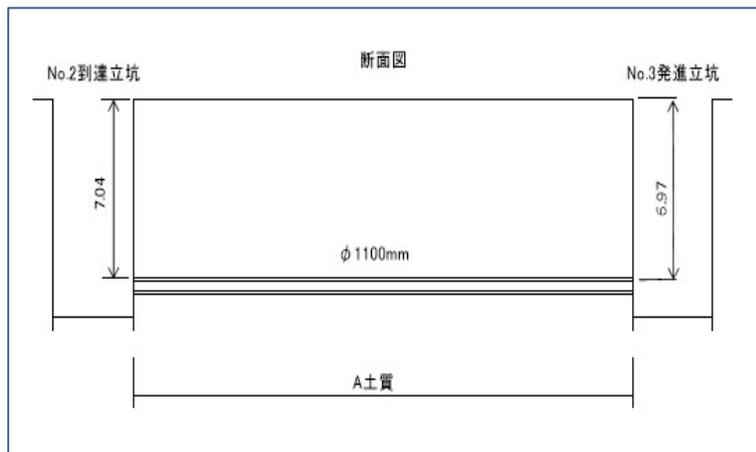


図 4-2 断面図

(2) 測量機器

測量機器には、建設業で最も一般的に使用されている汎用の地上設置型レーザースキャナー（図 4-3）を採用した。この機器は、ターゲット（図 4-4）を利用して位置情報を取得できるほか、高密度・高精度のレーザーを照射することで、対象を面として測量できる特徴を持つ。測量機器の設置間隔は 20m とした。



図 4-3 地上設置型レーザースキャナー



図 4-4 ターゲットプリズム

(3) 結果

埋設物の調査では、過去の工事時の写真を参考にし、位置情報の推測に活用する。これは、周辺の建物との位置関係からおおよその埋設位置を判断するためである。また、配管データのみでは状況を把握しにくいいため、可視化を目的として地上のデータ（図 4-5）も同時に取得した。地上部の計測には、地上設置型レーザースキャナーを使用した。さらに、取得した地上部と地下部のデータを統合し、全体データを作成した（図 4-6）。視認性を向上させるため、一部を拡大して示す（図 4-7）。

平面図(地上部分)

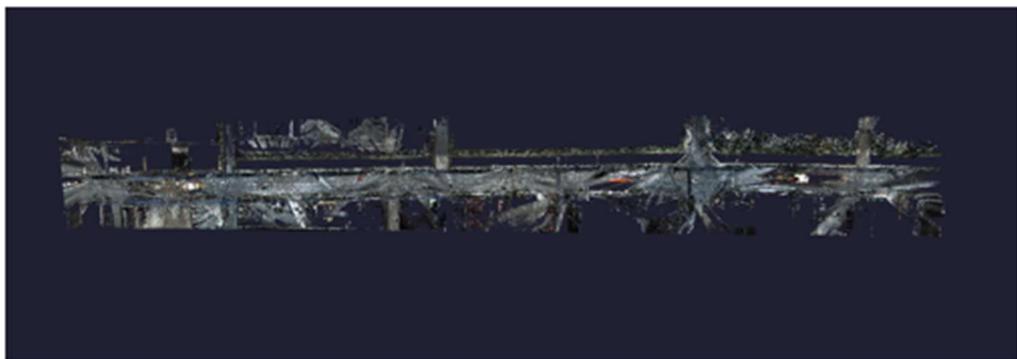


図 4-5 全体平面図 地上部の平面点群データ

断面図

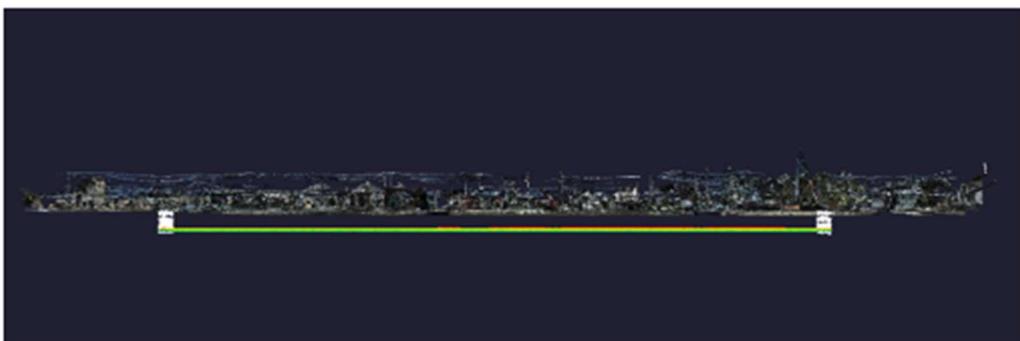


図 4-6 全体断面図 配管データと地上データを併せた統合データ

一部拡大図



図 4-7 断面の拡大図

(4) データの取得方法

点群データを取得する方法には、写真測量とレーザー測量がある。写真測量では、太陽光が届かない地下は真っ暗な状態となるため、適していない。また、衛星からの位置情報も取得できない。一方、地上レーザー測量では、ミラーを利用することで測量によって座標を持つ点群データを取得できる。さらに、配管内の計測においては、管の内径を計測している点を考慮する必要がある（図 4-8）。



図 4-8 推進管断面 計測箇所

4. 4 考察

データの互換性

図面データは、ほとんどの業種で CAD が利用されている。同じ土木業者間であれば、2次元データには互換性のある共通フォーマットが存在する。しかし、異なる業種では、全く異なる CAD ソフトが使用されている可能性が高く、互換性が低い場合、データを作成しても活用が困難となる。

さらに、3次元で管理する場合は3次元 CAD を利用する必要があるが、操作の難易度が高く、普及のハードルも上がる。一方で、点群データを活用すれば、業界の垣根を越えて利用することが可能となる。そのため、本研究では、あえて CAD 化せずに点群データとして保存することが重要であると判断した。

点群データは、各点に座標値と色情報を保持しており、維持管理の分野でも点群測量の活用が進みつつある。取り扱いのしやすさから、インフラ維持管理にも適している。さらに、深さによって視認性を向上させたデータを作成した (図 4-9)。

斜め後方からの視点

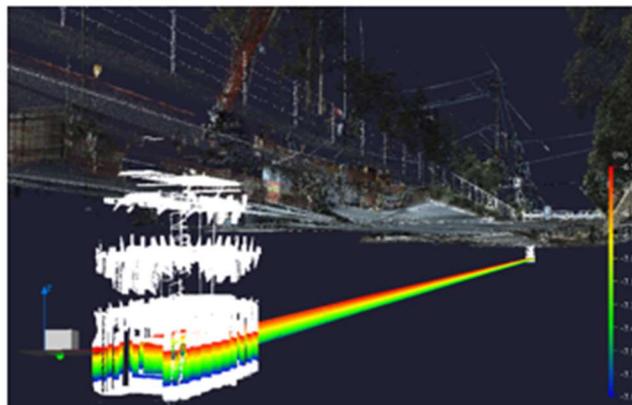


図 4-9 斜め後方からの地下視点

データを取得するにあたり、作業員が管内に入って作業を行う必要があるため、これ以上管径を小さくすることは困難である。また、地上から掘削して作業を行う場合、GNSS などを利用して位置情報を取得する方法が最も効率的であると考えられる。

今回の試行では、通信技術が使用できない地中の埋設管の管理においても工夫次第でデータを取得できる可能性が示唆された。さらに、3次元 CAD を活用すれば、設計データを事前に作成し、出来形管理への応用も可能となる。

今回の試行対象は直線区間であったが、曲線部分に適用するためには計測箇所をさらに増やす必要がある。

4. 4 結言

今回の研究により，工事施工完了後に点群データを作成することができた．その知見を以下にまとめる．

- ・ 地上型レーザースキャナーでは設置作業のため，管内径 ϕ 1100 mm以上が必要
- ・ 非 GPS 環境下の地下でも正確な点データ作成が可能
- ・ 光の届かない地下環境でも正確な点群データを作成できる
(写真測量だと一定以上の明るさが必要)

第5章 維持管理手法の効率化

5.1 諸言

高度経済成長期に交通インフラの整備が進められ、多くの山地や丘陵地を開削し、法面保護工を施した道路が増設された。しかし、これらの法面は地下水の影響による風化・劣化により強度が低下している。さらに、近年の地球温暖化に伴う短時間豪雨の増加により、法面内部への地下水侵入が進み、崩壊のリスクが高まっている。法面の崩壊は交通網の寸断を引き起こし、社会的・経済的損失をもたらすため、崩壊の予兆を捉える点検が重要である。現在、日本における法面点検の主流は近接目視であり、技術者が現場に接近して変状を観察する手法が用いられている。しかし、この方法は技術者の経験や技量に依存するため、定性的な結果にとどまり、一様な評価が困難である。定量的な点検手法として、伸縮計や光波観測が用いられることがあるが、これらは点や線での測定に限られ、法面全体のモニタリングには適していない。そのため、広範囲にわたる定量的な法面点検手法の確立が求められている。近年、レーザースキャナー機能を用いた測量技術が普及し、構造物の形状を定量的に評価可能な点群データ（点群）の取得が可能となっている。点群は三次元座標（X, Y, Z）に加え、色（RGB）やレーザ反射強度などの情報を持ち、非接触で測定できるため、デジタルデータとして保存・加工が可能である。従来の地上型レーザースキャナーは設置箇所周辺の点群しか取得できず、広域計測には複数回の設置が必要となる。本研究では、広域かつ効率的に点群を取得できる車載型センシング装置（MMS）を用いて法面の点群を取得し、2時期のデータをICPアルゴリズムに基づき解析することで、変状の抽出・定量化を試みた。また、MMS測量とICP手法の精度を検証し、解析の妨げとなる点群を除去するフィルタリングの影響についても評価を行った。これらの手法によって2時期間の法面の変状が抽出・定量化できるかを検証する。

5. 2 計測機器

(1) Mobile Mapping System

本研究では、法面の点群取得に車載型センシング装置（MMS）を使用した。MMSは、車両が走行しながら高精度の点群を迅速に取得できるシステムであり、GNSS/IMU/オドメトリ複合航法システムによる自己位置測定と、レーザースキャナー・カメラによる周辺情報取得の2つの要素から構成される。自己位置の精度がレーザ一点群の精度に大きく影響を与えるため、GNSS測位を活用して高精度な位置情報を取得する。現在、MMSは道路施設の3次元地形図作成や道路維持管理などに活用されている。

MMSを採用した理由は、地上型レーザースキャナーやドローンによる計測と比較し、より効率的に法面の全面点群を取得できるためである。地上型レーザースキャナーは障害物の影響を受けやすく、計測には何度も設置変更が必要となる。一方、MMSは走行しながら計測でき、法面に対して垂直な点群を取得できるため、本研究の目的に適している。

MMS車両には、車外にレーザースキャナー、GNSSアンテナ2機、400万画素スポットカメラ8台、走行距離計、慣性計測装置を搭載し、車内には解析ソフト（InertialExplorer、Radmin、AutoP）を備えた。レーザースキャナーは位相差式であり、1秒間に100万点のスキャンが可能である。

(2) TOTAL STATION

本研究では、MMS計測の精度検証および取得点群の位置補正のため、トータルステーション（TS）を使用した。TSは、電子セオドライトと光波測距儀を一体化した電子式測距角儀であり、法面に設置したターゲットの中心座標を測定する。MMSが移動しながら複数の点を取得するのに対し、TSは固定された状態で1点の座標を測定するため、TSの測定データを真値として点群精度の検証を行った。

TS計測の手順として、まず法面の両端付近にGNSS測量機を設置し、2時間のスタティック測量を実施して基準点の座標値を取得した。その後、後方交会法を用いてTSの設置位置を測定し、放射法および対回観測により誤差の低減を図った。TSの設置位置測定は1時期目と2時期目の両方で行い、2時期目の基準点には1時期目に作成したものを使用した。

5.3 解析手法

本研究では、変位の抽出・定量化に Iterative Closest Point (ICP) アルゴリズムを使用した。ICP は、SLAM (自己位置推定と地図構築) 技術に応用したスキャンマッチング手法であり、2つの点群の位置を最適化しながらマッチングを繰り返すことで、点群の整合性を向上させる。ICP のマッチング過程は、データの対応付け、最適化位置の推定、繰り返し計算の3段階に分けられる。繰り返し計算の回数を k とし、 k 回目の最適化位置を x_t^k で表す。データの対応付けでは、前回の繰り返し結果をもとに現在スキャンと参照スキャンの点を対応させ、現在の各スキャン点の位置を回転ベクトル R^k と並進ベクトル t^k を用いて計算する。ICPはこのプロセスを繰り返すことで、点群の位置姿勢を徐々に最適化していく。

$$p_i^k = R^k p_i + t^k \quad (1)$$

次に p_i^k から最も近い参照スキャン S_{t-1} の点 q_{ji}^k を次の式で求める。

$$q_{ji}^k = \operatorname{argmin} \|p_i^k - q_{ji}^k\| \quad (2)$$

ICP アルゴリズムでは、データの対応付けにユークリッド距離を使用し、最も距離が近い点同士をマッチングする。点 p_i^k に対し、ユークリッド距離が最小となる点を q_{ji}^k とし、スキャン間の点の対応関係をペアの集合として表現する。

次に、最適化位置の推定を行う。ここでは、コスト関数 (各点間の距離の二乗平均) が最小となる位置 x_t^k を求める。ICPにおけるコスト関数 $G_1(x_t^k)$ は、位置誤差の平均を評価し、誤差が最小となる位置を最適なものと判断する。このように、2つのスキャンのズレを最小化することで、より整合性の高い点群マッチングを実現する。

$$G_1(x_t^k) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \|(R^k p_i + t^k) - q_{j_1}^{k-1}\|^2 \quad (3)$$

ICP アルゴリズムの繰り返し処理では、データの対応付けと最適化位置の推定を繰り返す。位置合わせのスコアが変化しなくなり、現在のコスト関数 $G_1(x_t^k)$ と前回の $G_1(x_t^{k-1})$ との差が閾値以下になると、処理を終了する。ICP アルゴリズムによる変状算出の仕組みを図 5-1 に示す。

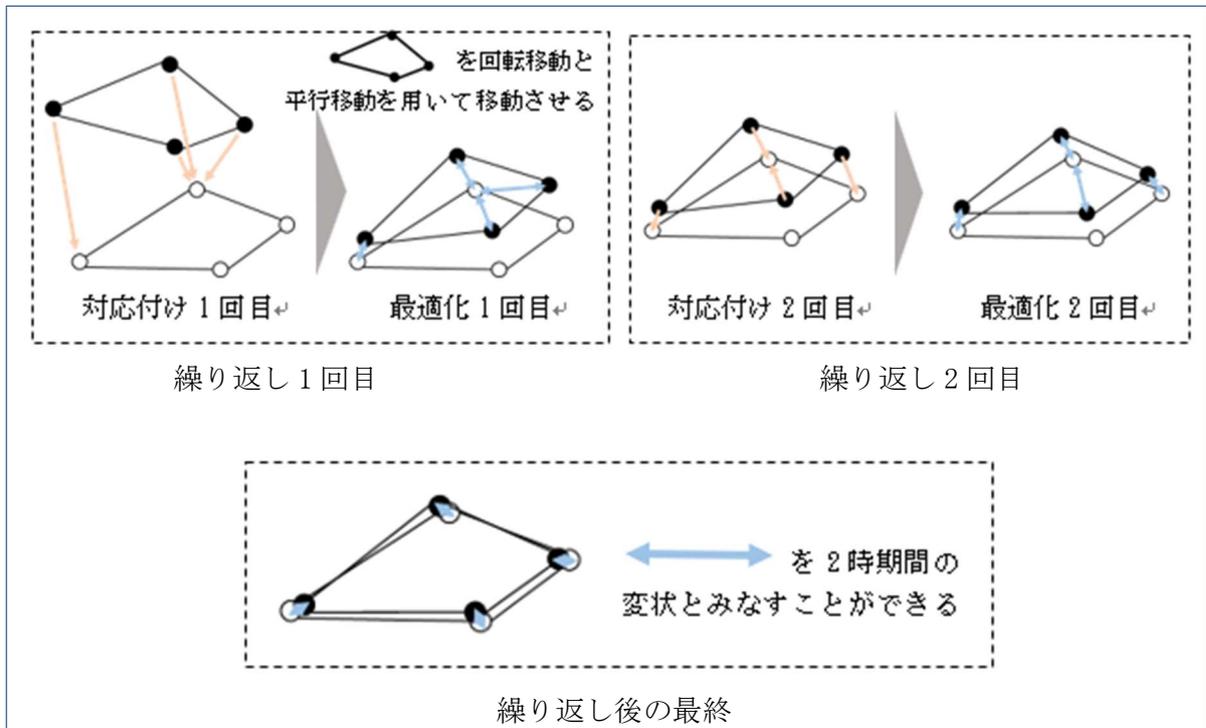


図 5-1 ICP アルゴリズムによる変状算出のしくみ

ICP アルゴリズムを用いて MMS で取得した 2 時期の点群データを比較し、移動した点の変位量をベクトルで算出する。解析は全点群ではなく、正方形のメッシュごとに行い、各メッシュ内の移動量と向きの平均を変位ベクトルとして算出する。メッシュサイズと解析対象範囲（ブロックレンジ）を定義することで、点群の変化量を効果的に検出できる。

5. 4 対象法面と計測概要

本研究では、国道9号沿いの全長約70m、高さ約10mの法枠付き法面を対象にMMS計測を実施した。法面には1辺0.7mのターゲットを14点設置し、8点を調整用基準点(TG)、6点を検証点(KS)とした。TGは点群全体のずれを補正するために使用し、KSはMMSとTSの座標差を比較し精度を検証するために設置した。また、道路上の特徴点4点を調整用基準点(C)として選定し、法面上のTGと補正精度を比較した。ターゲットは強風などで脱落しないよう固定した。計測対象を図5-2に示す。

MMS計測は、1時期目を1月13日、2時期目を5月28日とし、約4か月の間隔で実施した。MMS車両は法面から12m離れた走行車線②を走行し、点群を取得した。画像データの視認性向上のため、撮影は太陽高度を考慮し、逆光やハレーションを低減するように実施した。また、斜面変動方向の法面付近の植生を除去し、データ取得環境を最適化した。計測時の関係を図5-3、図5-4に示す。



図5-2 計測対象とした法枠付き法面

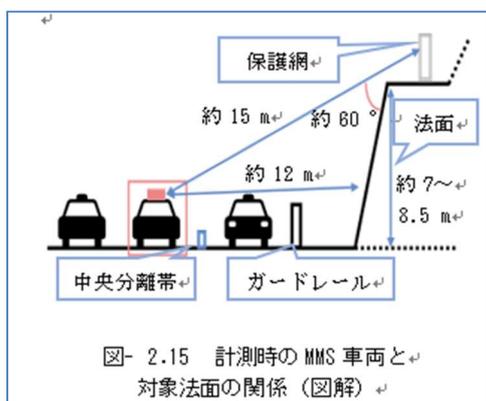


図5-3 計測時の関係(図)



図5-4 計測時の関係(写真)

5. 5 Mobile Mapping System に関する検証

本章では、MMS 計測で取得される点群の特徴について検証を行う。着目するのは、点群の精度、点群の密度、および変状の再現性の3点である。これらについて、合計5つの検証を実施する。

(1) MMS 走行速度変化による点群の精度変化

MMS 計測で取得される点群の精度を検証する。MMS 計測で取得された点群には、大きく分けて2種類の誤差が存在する。1つは、MMS に搭載されたレーザースキャナーや走行距離計などの機器による誤差であり、もう1つは、計測時の気象条件や衛星配置などの外的要因による誤差である。本章では、MMS 車両のみを使用して点群を取得するため、後者の誤差について検証を行う。

本検証では、MMS の走行速度による点群の精度変化、調整用基準点の数量による点群の精度変化、衛星配置による点群の精度検証の3つを行なう。その後、MMS 計測の点群取得精度はどの条件の場合、最も向上するかを考察する。

MMS 計測で取得した点群のターゲット中心座標は、フリーソフトである CloudCompare を用いて取得した。MMS 計測および TS 計測で取得した X, Y, Z の座標値は、平面直角座標系の IV 系で表す。

MMS 計測と TS 計測の比較結果は、平均較差および RMS 誤差（平均二乗誤差）によって評価する。平均較差は、MMS 計測と TS 計測で得られた座標の差を示し、RMS 誤差は、点群の X, Y, Z 方向それぞれにおける差分のばらつきを最確値として表す。また、MMS の平均較差および RMS 誤差は、地面と水平な XY 平面および法面の高さ方向である Z 方向について比較し、それぞれ以下の式で表す。

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

$$\overline{DIS} = \frac{\sum DIS}{n} \quad (5)$$

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum DIS^2}{n-1}} \quad (6)$$

ここで、DIS を較差、OBS を観測値、TV を真値、 \overline{DIS} を較差の平均値、 n を検証点数、RMS を平均二乗誤差とし、RMS 誤差を MMS 計測の誤差とする。本研究では、MMS 計測の精度検証において、式(4)、(5)、(6)を使用する。各要素の検証を行う前に、2 時期分のスタティック測量および TS 計測による座標値を示す。表 3.1 には、スタティック測量によって取得した 2 時期の C4 点、GNSS 基準点 4 点、TS 設置点の座標値およびその較差を示す。表 3.2 には、TS 計測によって取得された 2 時期の TG8 点および KS6 点のターゲット中心座標とその較差を示す。

TS 計測による 2 時期の較差は、X・Y 方向で 3mm 以下、高さ方向 (Z 方向) で 2mm 以下であった。本検証で用いる TS の機械精度は、観測距離が 30~100m の場合 ± 2.2 mm であるため、2 時期間の較差は TS の機械精度程度であり、変状に対応する有意な変化は生じていないと評価できる。以上の点を踏まえ、検証を行う。

(1) MMS車両の走行速度変化による点群の精度検証

MMS車両の走行速度を変化させることで、取得される点群の精度に変化が生じるかを検証する。MMS車両の走行速度は、40 km/hおよび50 km/hの2パターンで実施する。

計測値の呼称について、MMS計測結果の2時期目の座標から1時期目の座標を引いた値を相対較差、各時期においてMMS計測結果からTS計測結果を引いた値を絶対較差とする。較差の結果から、平均値、RMS誤差、最大値を求める。最大値は、較差の中で絶対値が最も大きい値を採用する。図5-5、図5-7はMMS車両が40、50 km/hで走行し、取得したKS中心座標とTS計測の結果、その較差を示し、その結果を図5-6、図5-8に示す。 ΔXY は地面に対して水平方向との誤差、 ΔZ は標高の誤差を示す。またそれぞれの結果をグラフ化し、図5-9、図5-10に示す。

	MMS計測 (40 km/h) 1時期目			MMS計測 (40 km/h) 2時期目			相対較差 (2時期目-1時期目)		
	X	Y	Z	X	Y	Z	ΔX	ΔY	ΔZ
KS1	-75570.438	-81758.341	52.229	-75570.424	-81758.339	52.277	0.014	0.003	0.048
KS2	-75565.153	-81760.037	57.343	-75565.174	-81760.017	57.363	-0.021	0.021	0.020
KS3	-75562.675	-81760.503	57.520	-75562.691	-81760.424	57.540	-0.016	0.079	0.020
KS4	-75560.100	-81760.852	57.445	-75560.108	-81760.842	57.484	-0.008	0.009	0.039
KS5	-75557.627	-81761.157	57.345	-75557.633	-81761.134	57.353	-0.007	0.022	0.008
KS6	-75555.046	-81761.409	56.938	-75555.037	-81761.411	56.945	0.009	-0.003	0.007
	TS計測 1時期目			MMS計測 (40 km/h) 1時期目			絶対較差 (MMS-TS) 1時期目		
	X	Y	Z	X	Y	Z	ΔX	ΔY	ΔZ
KS1	-75570.418	-81758.332	52.236	-75570.438	-81758.341	52.229	-0.020	-0.009	-0.007
KS2	-75565.143	-81760.042	57.327	-75565.153	-81760.037	57.343	-0.010	0.005	0.016
KS3	-75562.682	-81760.481	57.500	-75562.675	-81760.503	57.520	0.007	-0.022	0.020
KS4	-75560.092	-81760.852	57.429	-75560.100	-81760.852	57.445	-0.008	0.000	0.016
KS5	-75557.592	-81761.159	57.314	-75557.627	-81761.157	57.345	-0.035	0.002	0.031
KS6	-75555.039	-81761.428	56.932	-75555.046	-81761.409	56.938	-0.007	0.019	0.006
	TS計測 2時期目			MMS計測 (40 km/h) 2時期目			絶対較差 (MMS-TS) 2時期目		
	X	Y	Z	X	Y	Z	ΔX	ΔY	ΔZ
KS1	-75570.419	-81758.333	52.234	-75570.424	-81758.339	52.277	-0.005	-0.006	0.043
KS2	-75565.144	-81760.043	57.325	-75565.174	-81760.017	57.363	-0.030	0.026	0.038
KS3	-75562.684	-81760.480	57.500	-75562.691	-81760.424	57.540	-0.007	0.056	0.040
KS4	-75560.094	-81760.851	57.429	-75560.108	-81760.842	57.484	-0.014	0.009	0.055
KS5	-75557.594	-81761.158	57.315	-75557.633	-81761.134	57.353	-0.039	0.024	0.038
KS6	-75555.040	-81761.428	56.931	-75555.037	-81761.411	56.945	0.003	0.017	0.014

図 5-5 40 km/h 走行時の MMS 計測と TS 計測の較差 (単位はm)

* 較差の欄には絶対値の最大値である ± 0.079 に近い値ほど色濃く表示

	40 km/h の MMS 計測の相対較差 (2時期目-1時期目)		40 km/h の MMS 計測の絶対較差 (1時期目と2時期目)	
	ΔXY	ΔZ	ΔXY	ΔZ
平均値	0.028	0.024	0.025	0.026
絶対値の最大値	0.081	0.048	0.057	0.055
RMS 誤差	0.027	0.017	0.016	0.018

図 5-6 40 km/h 走行時の MMS 計測の較差の平均値, 絶対値の最大値, RMS 誤差 (単位はm)

	MMS計測 (50 km/h) 1時期目			MMS計測 (50 km/h) 2時期目			相対較差 (2時期目-1時期目)		
	X	Y	Z	X	Y	Z	ΔX	ΔY	ΔZ
KS1	-75570.452	-81758.341	52.264	-75570.419	-81758.377	52.210	0.033	-0.037	-0.053
KS2	-75565.162	-81760.029	57.361	-75565.146	-81760.062	57.293	0.016	-0.033	-0.067
KS3	-75562.677	-81760.468	57.519	-75562.690	-81760.480	57.463	-0.014	-0.012	-0.056
KS4	-75560.097	-81760.836	57.451	-75560.078	-81760.883	57.399	0.019	-0.048	-0.052
KS5	-75557.609	-81761.129	57.333	-75557.584	-81761.170	57.265	0.025	-0.041	-0.068
KS6	-75555.066	-81761.404	56.952	-75555.040	-81761.451	56.895	0.026	-0.047	-0.057
	TS計測 1時期目			MMS計測 (50 km/h) 1時期目			絶対較差 (MMS-TS) 1時期目		
	X	Y	Z	X	Y	Z	ΔX	ΔY	ΔZ
KS1	-75570.418	-81758.332	52.236	-75570.452	-81758.341	52.264	-0.034	-0.009	0.028
KS2	-75565.143	-81760.042	57.327	-75565.162	-81760.029	57.361	-0.019	0.013	0.034
KS3	-75562.682	-81760.481	57.500	-75562.677	-81760.468	57.519	0.005	0.013	0.019
KS4	-75560.092	-81760.852	57.429	-75560.097	-81760.836	57.451	-0.005	0.016	0.021
KS5	-75557.592	-81761.159	57.314	-75557.609	-81761.129	57.333	-0.017	0.030	0.019
KS6	-75555.039	-81761.428	56.932	-75555.066	-81761.404	56.952	-0.027	0.024	0.020
	TS計測 2時期目			MMS計測 (50 km/h) 2時期目			絶対較差 (MMS-TS) 2時期目		
	X	Y	Z	X	Y	Z	ΔX	ΔY	ΔZ
KS1	-75570.419	-81758.333	52.234	-75570.419	-81758.377	52.210	0.000	-0.044	-0.024
KS2	-75565.144	-81760.043	57.325	-75565.146	-81760.062	57.293	-0.002	-0.019	-0.032
KS3	-75562.684	-81760.480	57.500	-75562.690	-81760.480	57.463	-0.006	0.000	-0.037
KS4	-75560.094	-81760.851	57.429	-75560.078	-81760.883	57.399	0.016	-0.032	-0.030
KS5	-75557.594	-81761.158	57.315	-75557.584	-81761.170	57.265	0.010	-0.012	-0.050
KS6	-75555.040	-81761.428	56.931	-75555.040	-81761.451	56.895	0.000	-0.023	-0.036

図 5-7 50 km/h 走行時の MMS 計測と TS 計測の較差 (単位はm)
 * 較差の欄には絶対値の最大値である±0.068に近い値ほど色を濃く表示

	50 km/h の MMS 計測の相対較差 (2時期目-1時期目)		50 km/h の MMS 計測の絶対較差 (1時期目と2時期目)	
	ΔXY	ΔZ	ΔXY	ΔZ
平均値	0.043	-0.059	0.020	-0.006
絶対値の最大値	0.053	0.052	0.036	0.050
RMS 誤差	0.014	0.007	0.014	0.031

図 5-8 50 km/h 走行時の MMS 計測の較差の平均値, 絶対値の最大値, RMS 誤差 (単位は m)

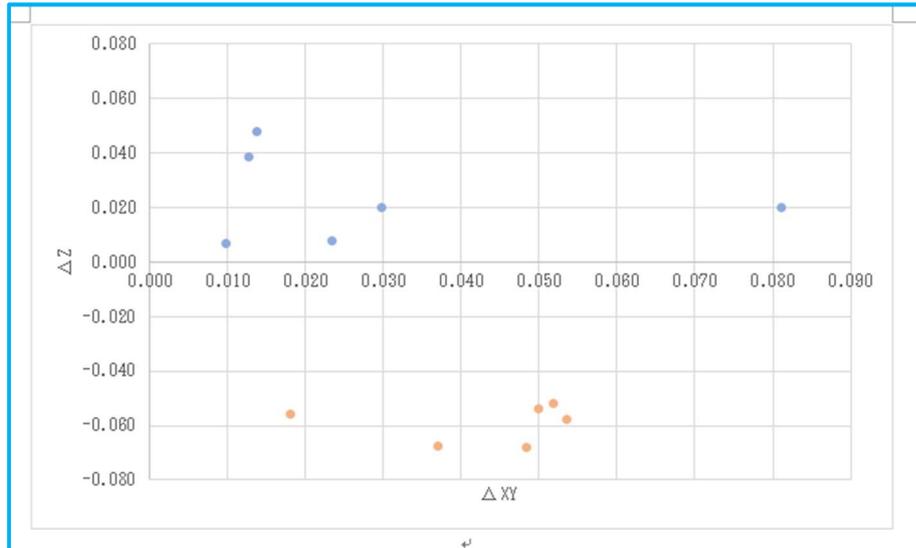


図 5-9 MMS 計測の相対誤差

* 青色点が 40 km, 橙色点が 50 km 走行時の較差 (単位は m)

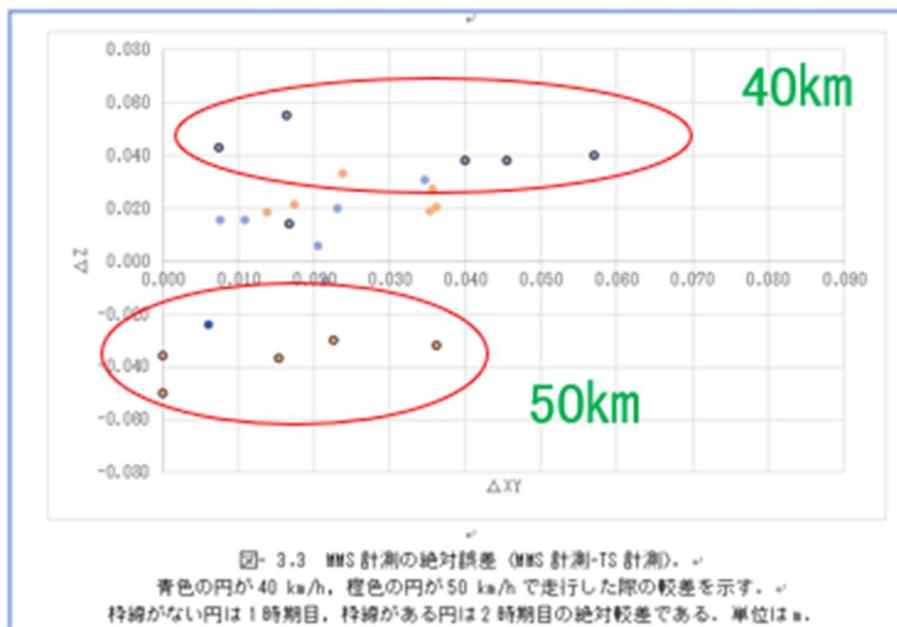


図- 3.3 MMS 計測の絶対誤差 (MMS 計測-TS 計測).

青色の円が 40 km/h, 橙色の円が 50 km/h で走行した際の較差を示す.

枠線がない円は 1 時期目, 枠線がある円は 2 時期目の絶対較差である. 単位は m.

図 5-10 MMS 計測の絶対誤差

* 青色点が 40 km, 橙色点が 50 km/h 走行時の較差 (単位は m)

枠線がない点は 1 時期目, 枠線ありは 2 時期目の絶対誤差 (単位は m)

結果

40 km/h で走行して取得した MMS 計測結果について

相対較差は ΔXY で 27 mm, ΔZ で 17 mm, 絶対較差は ΔXY で 16 mm, ΔZ で 18 mm であった.

また, ΔX , ΔZ の較差の値から, MMS 計測で取得した点群全体は一定の方向への誤差が含まれていることが分かる.

50 km/h で走行して取得した MMS 計測結果について

相対較差は ΔXY で 14 mm, ΔZ で 7 mm, 絶対較差は ΔXY で 14 mm, ΔZ で 31 mm であった. 40 km/h で走行した場合と同様に, MMS 計測で取得した点群には一定方向に誤差が含まれており, 系統誤差の影響を受けていることが分かる.

(2) 調整用基準点の有無による点群の精度検証

法面上に設置したTG8点、および地表面上に設置したC4点を用いて、MMS計測で取得した点群の座標補正を行った場合に、点群の精度がどのように変化するかを検証する。MMS計測による点群の取得条件は、第2章の計測概要で述べた通りである。MMSが取得する点群には、ずれが生じるため、調整用基準点を用いた補正が必要となる。本研究では、調整用基準点の数を変更し、補正計算を行った点群の精度を比較する。ただし、調整用基準点であるTG2は法面の陰に位置し、かつ上部にあるため、十分な点群データが取得できていなかった。したがって、補正計算には使用していない。図5-11および図5-12には、1時期および2時期のKS中心座標を示している。これらの表内の①～⑤の座標値は、それぞれ異なるターゲットを用いて補正を行った結果であり、⑥の座標値は補正計算を行う前の値である。これらのKS座標値とTS計測によるKS座標値を比較し、1時期および2時期の絶対較差を図5-13および図5-14にまとめた。較差の絶対値の最大値は±0.111および±0.069であり、それに近い値ほど濃い色でセルを塗りつぶしている。さらに、図5-13の結果を図5-14に、図5-15の結果を図3.16に、それぞれグラフとしてプロットしている。

まず、補正前の⑥の結果について述べる。MMS計測で取得した点群は、全体的に一定の方向へずれが生じていることが確認された。具体的には、1時期目ではX方向に+22 mm、2時期目ではY方向に+23 mm、Z方向に-20 mmのずれが発生していた。このずれに対し、ターゲットを用いた補正を行った結果、全体的な系統誤差が減少したことが、図5-14および図5-16に示す絶対較差のプロットから確認できる。次に、ターゲット (TG) を使用して補正を行った①～④の結果について述べる。ターゲットを最も多く使用した①では、RMS誤差が26 mm以内に収まり、プロット図からも補正の効果が確認できた。一方、法面周辺の地物(C)を用いた補正方法(⑥)の結果について検討する。本方法では、1時期目のKS3およびKS4において、0.1 mを超える大きな較差が生じることが分かった。これにより、対象とした4つの地物周辺では、法面上のずれを十分に補正できないことが確認された。

1 時期目 KS 座標値									
	TG1-3-4-5-6-7-8 使用 (①)			TG1-4-5-7-8 使用 (②)			TG1-4-7-8 使用 (③)		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
KS1	-75570.459	-81758.353	52.250	-75570.476	-81758.346	52.233	-75570.476	-81758.346	52.233
KS2	-75565.144	-81760.071	57.380	-75565.189	-81760.029	57.332	-75565.142	-81760.029	57.314
KS3	-75562.697	-81760.485	57.534	-75562.669	-81760.484	57.489	-75562.728	-81760.459	57.500
KS4	-75560.087	-81760.875	57.481	-75560.083	-81760.848	57.411	-75560.134	-81760.838	57.430
KS5	-75557.580	-81761.160	57.300	-75557.592	-81761.140	57.286	-75557.592	-81761.140	57.286
KS6	-75555.042	-81761.439	56.944	-75555.042	-81761.439	56.944	-75555.049	-81761.422	56.935
	TG1-7-8 使用 (④)			C1-2-3-4 使用 (⑤)			補正計算前 (⑥)		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
KS1	-75570.459	-81758.353	52.250	-75570.344	-81758.384	52.198	-75570.430	-81758.336	52.231
KS2	-75565.141	-81760.029	57.310	-75565.090	-81760.071	57.329	-75565.159	-81760.034	57.380
KS3	-75562.680	-81760.504	57.493	-75562.571	-81760.525	57.484	-75562.663	-81760.460	57.507
KS4	-75560.134	-81760.838	57.422	-75559.986	-81760.838	57.405	-75560.069	-81760.844	57.439
KS5	-75557.612	-81761.159	57.334	-75557.496	-81761.179	57.278	-75557.614	-81761.145	57.353
KS6	-75555.062	-81761.405	56.907	-75554.967	-81761.444	56.908	-75555.034	-81761.419	56.958

図 5-11 調整用基準点を用いて補正した中心座標 (1 時期目)

2 時期目 KS 座標値									
	TG1-3-4-5-6-7-8 使用 (①)			TG1-4-5-7-8 使用 (②)			TG1-4-7-8 使用 (③)		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
KS1	-75570.440	-81758.349	52.254	-75570.440	-81758.349	52.254	-75570.470	-81758.337	52.223
KS2	-75565.137	-81760.042	57.333	-75565.193	-81760.020	57.327	-75565.193	-81760.020	57.327
KS3	-75562.674	-81760.489	57.514	-75562.674	-81760.489	57.514	-75562.693	-81760.447	57.489
KS4	-75560.078	-81760.875	57.485	-75560.163	-81760.837	57.436	-75560.077	-81760.838	57.401
KS5	-75557.591	-81761.179	57.354	-75557.586	-81761.132	57.296	-75557.586	-81761.132	57.296
KS6	-75555.021	-81761.424	56.915	-75555.021	-81761.424	56.915	-75555.067	-81761.399	56.925
	TG1-7-8 使用 (④)			C1-2-3-4 使用 (⑤)			補正計算前 (⑥)		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
KS1	-75570.441	-81758.330	52.197	-75570.437	-81758.332	52.187	-75570.458	-81758.336	52.213
KS2	-75565.194	-81760.017	57.321	-75565.192	-81760.018	57.311	-75565.182	-81760.018	57.315
KS3	-75562.695	-81760.444	57.482	-75562.693	-81760.445	57.472	-75562.683	-81760.445	57.476
KS4	-75560.165	-81760.833	57.427	-75560.163	-81760.833	57.417	-75560.159	-81760.834	57.422
KS5	-75557.577	-81761.173	57.302	-75557.620	-81761.150	57.304	-75557.577	-81761.127	57.280
KS6	-75555.069	-81761.394	56.912	-75555.068	-81761.394	56.902	-75555.058	-81761.395	56.908

図 5-12 調整用基準点を用いて補正した中心座標 (2 時期目)

1 時期目 (MMS 計測-TS 計測) 絶対較差									
	TG1-3-4-5-6-7-8 使用 (①)			TG1-4-5-7-8 使用 (②)			TG1-4-7-8 使用 (③)		
	ΔX	ΔY	ΔZ	ΔX	ΔY	ΔZ	ΔX	ΔY	ΔZ
KS1	-0.041	-0.021	0.014	-0.058	-0.014	-0.003	-0.058	-0.014	-0.003
KS2	-0.001	-0.029	0.053	-0.046	0.013	0.005	0.001	0.013	-0.013
KS3	-0.015	-0.004	0.034	0.013	-0.003	-0.011	-0.046	0.022	0.000
KS4	0.005	-0.023	0.052	0.009	0.004	-0.018	-0.042	0.014	0.001
KS5	0.012	-0.001	-0.014	0.000	0.019	-0.028	0.000	0.019	-0.028
KS6	-0.003	-0.011	0.012	-0.003	-0.011	0.012	-0.010	0.006	0.003
平均値	-0.007	-0.015	0.025	-0.014	0.001	-0.007	-0.026	0.010	-0.007
最大値	0.041	0.029	0.053	0.058	0.019	0.028	0.058	0.022	0.028
RMS 誤差	0.019	0.011	0.026	0.030	0.013	0.015	0.026	0.013	0.012
	TG1-7-8 使用 (④)			C1-2-3-4 使用 (⑤)			補正計算前 (⑥)		
	ΔX	ΔY	ΔZ	ΔX	ΔY	ΔZ	ΔX	ΔY	ΔZ
KS1	-0.041	-0.021	0.014	0.074	-0.052	-0.038	-0.012	-0.004	-0.005
KS2	0.002	0.013	-0.017	0.053	-0.029	0.002	-0.016	0.008	0.053
KS3	0.022	-0.023	-0.007	0.111	-0.044	-0.016	0.019	0.021	0.007
KS4	-0.042	0.014	-0.007	0.106	-0.036	-0.024	0.023	0.008	0.010
KS5	-0.020	0.000	0.020	0.096	-0.020	-0.036	-0.022	0.014	0.039
KS6	-0.023	0.023	-0.025	0.072	-0.016	-0.024	0.005	0.009	0.027
平均値	-0.017	0.001	-0.004	0.085	-0.033	-0.023	0.000	0.009	0.022
最大値	0.042	0.023	0.025	0.111	0.052	0.038	0.023	0.021	0.053
RMS 誤差	0.025	0.019	0.017	0.023	0.014	0.015	0.019	0.008	0.021

図 5-13 補正後の MS 計測および TS 計測の KS 座標値の較差 (1 時期目)

*較差の絶対値の最大値である±0.111 に近い値ほど色濃く表示。(単位はm) .

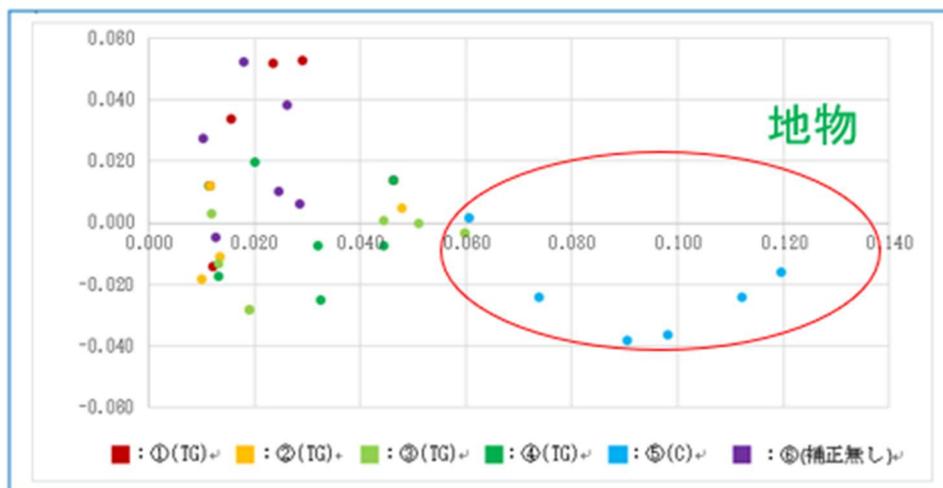


図 5-14 絶対較差のプロット図 (図 5-13 に対応)

2 時期目 (MMS 計測-TS 計測) 絶対較差									
	TG1-3-4-5-6-7-8 使用 (①)			TG1-4-5-7-8 使用 (②)			TG1-4-7-8 使用 (③)		
	ΔX	ΔY	ΔZ	ΔX	ΔY	ΔZ	ΔX	ΔY	ΔZ
KS1	-0.021	-0.016	0.020	-0.021	-0.016	0.020	-0.051	-0.004	-0.011
KS2	0.007	0.001	0.008	-0.049	0.023	0.002	-0.049	0.023	0.002
KS3	0.010	-0.009	0.014	0.010	-0.009	0.014	-0.009	0.033	-0.011
KS4	0.016	-0.024	0.036	-0.069	0.014	0.007	0.017	0.013	-0.028
KS5	0.003	-0.021	0.039	0.008	0.026	-0.019	0.008	0.026	-0.019
KS6	0.019	0.004	-0.016	0.019	0.004	-0.016	-0.027	0.029	-0.006
平均値	0.006	-0.011	0.017	-0.017	0.007	0.001	-0.018	0.020	-0.012
最大値	0.021	0.024	0.039	0.069	0.026	0.020	0.051	0.033	0.028
RMS 誤差	0.014	0.012	0.020	0.036	0.017	0.016	0.029	0.014	0.010
	TG1-7-8 使用 (④)			C1-2-3-4 使用 (⑤)			補正計算前 (⑥)		
	ΔX	ΔY	ΔZ	ΔX	ΔY	ΔZ	ΔX	ΔY	ΔZ
KS1	-0.022	0.003	-0.037	-0.018	0.001	-0.047	-0.039	-0.003	-0.021
KS2	-0.050	0.026	-0.004	-0.048	0.025	-0.014	-0.038	0.025	-0.010
KS3	-0.011	0.036	-0.018	-0.009	0.035	-0.028	0.001	0.035	-0.024
KS4	-0.071	0.018	-0.002	-0.069	0.018	-0.012	-0.059	0.018	-0.007
KS5	0.017	-0.015	-0.013	-0.026	0.008	-0.011	0.017	0.031	-0.035
KS6	-0.029	0.034	-0.019	-0.028	0.034	-0.029	-0.018	0.033	-0.023
平均値	-0.028	0.017	-0.016	-0.033	0.020	-0.023	-0.023	0.023	-0.020
最大値	0.071	0.036	0.037	0.069	0.035	0.047	0.059	0.035	0.035
RMS 誤差	0.031	0.020	0.013	0.022	0.014	0.014	0.028	0.015	0.010

図 5-15 補正後の MMS 計測および TS 計測の KS 座標値の較差 (2 時期目)
 * 較差の絶対値の最大値である±0.069 に近い値ほど色を濃く表示。(単位はm)

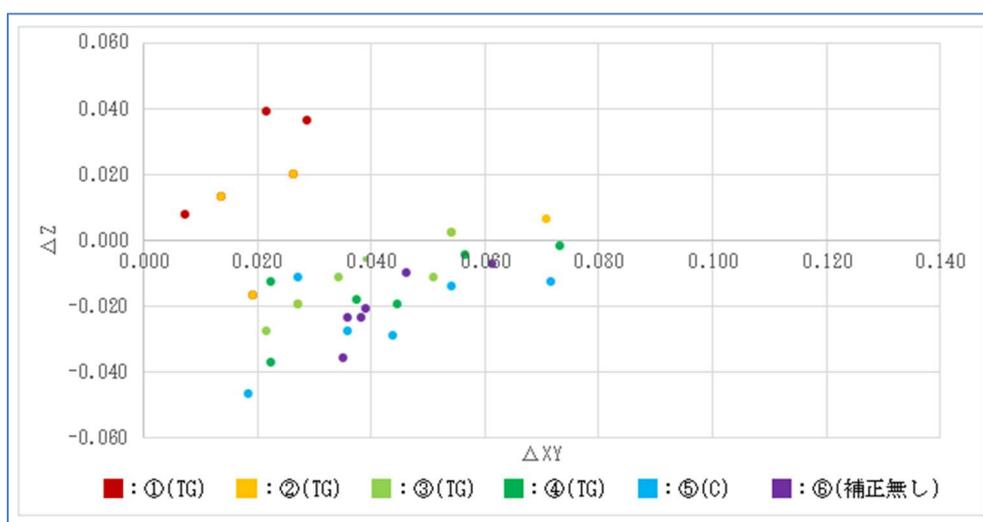


図 5-16 図 5-1 の絶対較差のプロット図 (図 5-15 対応)

(3) 衛星配置による点群の精度検証

MMS計測は、GNSSアンテナを用いて自己位置を測定しながら点群を取得するため、その精度はGNSS衛星の受信状況に左右されると考えられる。本研究では、衛星状況が点群の精度に与える影響を検証する。

MMS車両に搭載されているGNSSアンテナは、GNSS衛星から情報を受信し、自己位置を計算している。GNSS衛星は、①衛星の位置情報（軌道情報）および②衛星が電波を発信した時刻の2つの情報を常に送信している。受信機は、衛星が電波を発信した時刻と受信した時刻の差から電波の伝播時間を算出し、その値に電波の速度を掛けることで、衛星から測量機までの距離を求めることができる。理論上、3つの衛星の情報を受信することで自己位置の座標を算出できるが、GNSS衛星の内蔵時計にはわずかな誤差があるため、その影響を補正する必要がある。この補正には、最低4つの衛星情報の受信が必要となる。したがって、衛星の配置状態が自己位置の精度に影響を与えることになる。山やビルの陰に自己位置がある場合、受信できる衛星の数が減少し、測位精度が低下する。この衛星の配置状態を指標化したものがDOP（Dilution Of Precision：精度低下率）である。DOP値は測位精度と相関関係があり、値が小さいほど測位精度が高く、大きいほど精度が低い傾向を示す。

本研究では、GNSS衛星の位置精度に関わるPDOP（Position DOP：位置精度低下率）を用い、衛星配置の状態が良い時間帯と悪い時間帯で取得された点群の精度を比較する。PDOPとは、現在位置の誤差と衛星の位置誤差の関係を示す単位のない指標であり、一般にPDOPが3以下の時間帯が良好な測位状態とされる。本検証では、5月28日（2時期目）の9:00～16:00に受信した衛星数を図5-17に示し、それを基に得られたPDOP値を図5-18に示す。この際に使用した衛星はGPS（Global Positioning System）およびGLONASS（Global Navigation Satellite System）であり、これらを総称してGNSS衛星とし、合計数として記載している。その結果、DOP値が悪化した時間帯は5月28日の9:30～9:32、および13:08～13:15であった。これらの時間帯に取得したPDOP値の悪い（高い）点群と、PDOP値の良い（低い）点群の精度を比較する。各データの詳細は、図5-19に示す。

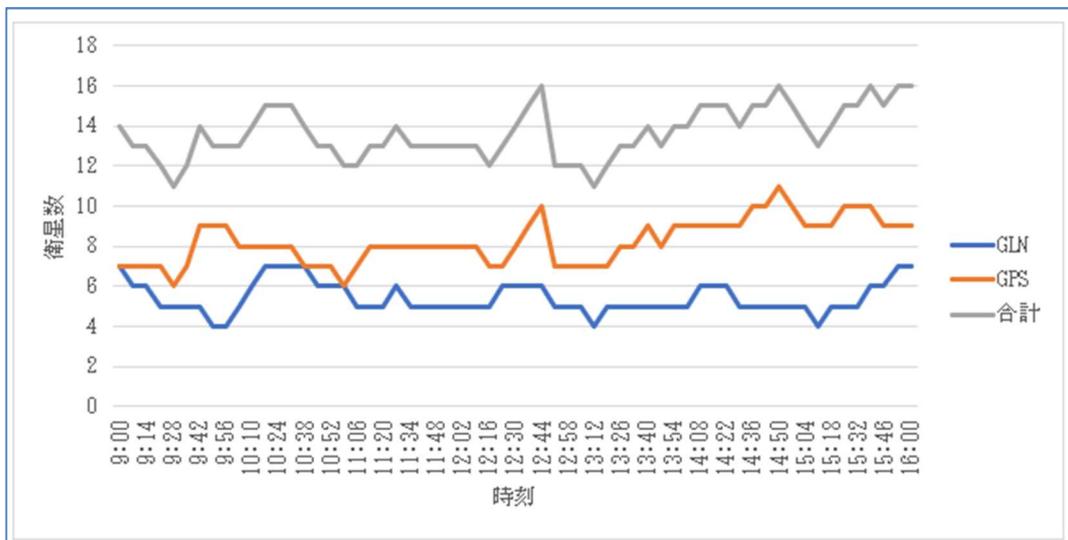


図 5-17 5月28日 9:00~16:00 のGPS, GRONASS の衛星数

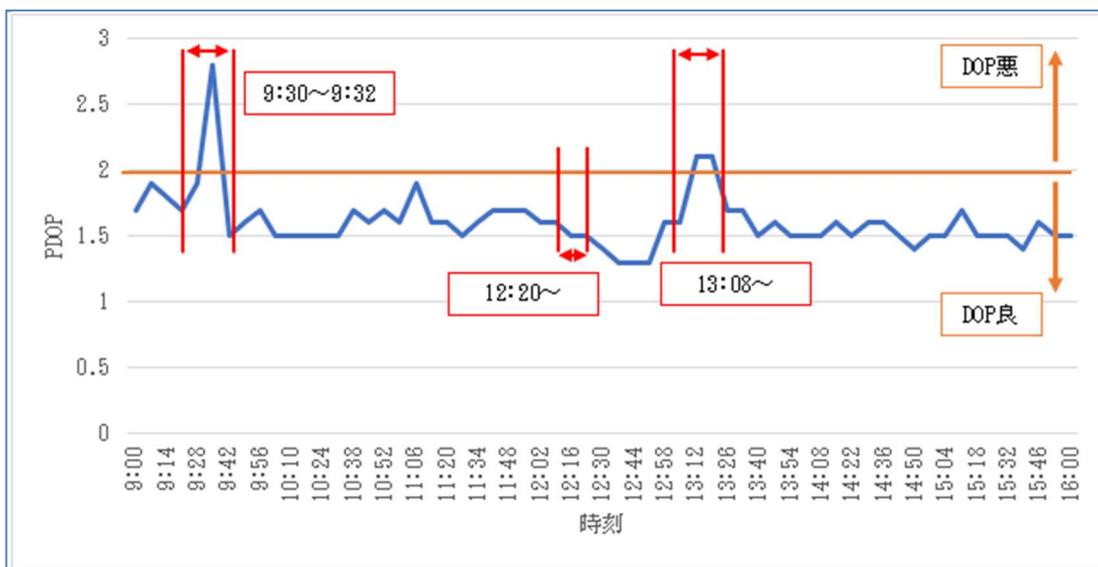


図 5-18 5月28日 9:00~16:00 のPDOP 値

		PDOP 悪	PDOP 良
点群取得時期		5月28日(2時期目)	5月28日(2時期目)
計測	開始時刻	9:30	12:20
	終了時刻	9:32	12:22
点群取得速度		50 km/h	50 km/h
車線		車線②(追い越し車線)	車線②(追い越し車線)

図 5-19 比較検証を 2 つの点群データの条件

DOP 値の良否によって分類し、MMS 計測結果から TS 計測結果を引いた絶対較差を図 5-20、図 5-21 に示す。これらをまとめたものが、図 5-22 であり、較差をプロットしたものが図 5-23 である。MMS 計測結果は補正を行っていないオリジナルデータを使用した。

これらの結果から、DOP 値の条件が悪い場合の誤差が ΔXY 方向で 0.021 m、 ΔZ 方向で 0.021 m、DOP 値の条件が良い場合の誤差が ΔXY 方向で 0.016 m、 ΔZ 方向で 0.010 m であったことが分かった。以上より、DOP の良否によって MMS 計測による誤差に ΔXY で 0.005 m、 ΔZ で 0.011 m の差が生じることが確認できた。

	MMS 計測 (DOP 悪)			TS 計測			絶対較差 (MMS-TS)		
	X	Y	Z	X	Y	Z	ΔX	ΔY	ΔZ
KS1	-75570.448	-81758.327	52.166	-75570.419	-81758.333	52.234	0.029	-0.007	0.068
KS2	-75565.208	-81760.009	57.287	-75565.144	-81760.043	57.325	0.064	-0.034	0.038
KS3	-75562.677	-81760.450	57.435	-75562.684	-81760.480	57.500	-0.007	-0.030	0.065
KS4	-75560.127	-81760.814	57.369	-75560.094	-81760.851	57.429	0.033	-0.037	0.060
KS5	-75557.622	-81761.134	57.272	-75557.594	-81761.158	57.315	0.028	-0.024	0.043
KS6	-75555.116	-81761.412	56.919	-75555.040	-81761.428	56.931	0.076	-0.016	0.012

図 5-20 DOP 悪の MMS 計測結果と TS 計測結果の絶対較差 (単位は m)

	MMS 計測 (DOP 良)			TS 計測			絶対較差 (MMS-TS)		
	X	Y	Z	X	Y	Z	ΔX	ΔY	ΔZ
KS1	-75570.452	-81758.371	52.177	-75570.419	-81758.333	52.234	0.033	0.038	0.057
KS2	-75565.146	-81760.062	57.293	-75565.144	-81760.043	57.325	0.002	0.019	0.032
KS3	-75562.690	-81760.481	57.463	-75562.684	-81760.480	57.500	0.006	0.001	0.037
KS4	-75560.078	-81760.884	57.399	-75560.094	-81760.851	57.429	-0.016	0.033	0.030
KS5	-75557.574	-81761.188	57.277	-75557.594	-81761.158	57.315	-0.020	0.030	0.038
KS6	-75555.040	-81761.451	56.895	-75555.040	-81761.428	56.931	0.000	0.023	0.036

図 5-21 DOP 良の MMS 計測結果と TS 計測結果の絶対較差 (単位は m)

	絶対較差 (MMS-TS) (DOP 悪)			絶対較差 (MMS-TS) (DOP 良)		
	ΔX	ΔY	ΔZ	ΔX	ΔY	ΔZ
平均値	0.037	-0.024	0.048	0.001	0.024	0.038
最大値	0.076	0.037	0.068	0.033	0.038	0.057
RMS 誤差	0.029	0.012	0.021	0.019	0.013	0.010
		0.021	0.021		0.016	0.010

図 5-22 図 5-20 と図 5-21 のまとめ (単位は m)

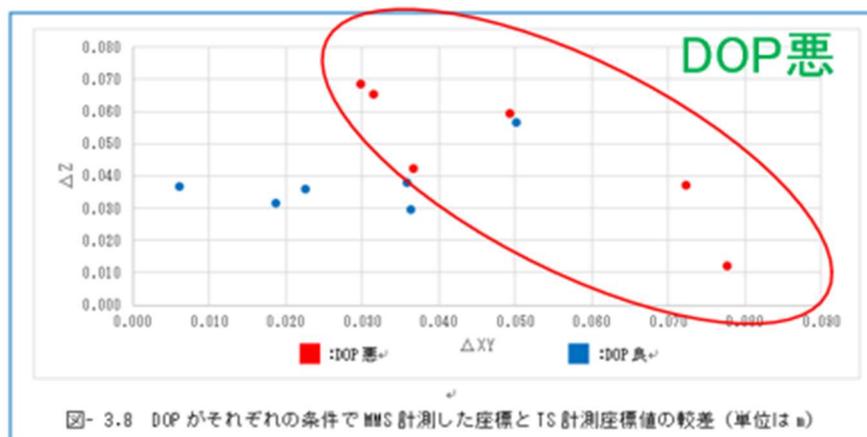


図 5-23 DOP 値の各条件における MMS 計測座標と TS 計測座標の較差 (単位 : m)

(4) MMS 計測で取得した点群密度の検証

本項では、MMS 計測で取得した点群の密度を確認する。本研究で使用したレーザースキャナーは、1 秒間に 100 万点のスキャンが可能な機器である。この機器を MMS 車両に搭載し、時速 40 km/h および 50 km/h で走行した際に取得された点群の密度を検証する。また、点群密度の測定には、法面上に設置した TG および KS のターゲットを使用する。ターゲット上に存在する点群数をターゲットの面積 (0.49 m²) で割ることで、点群密度 (点/m²) を算出する。図 5-24 に、計測結果をまとめる。

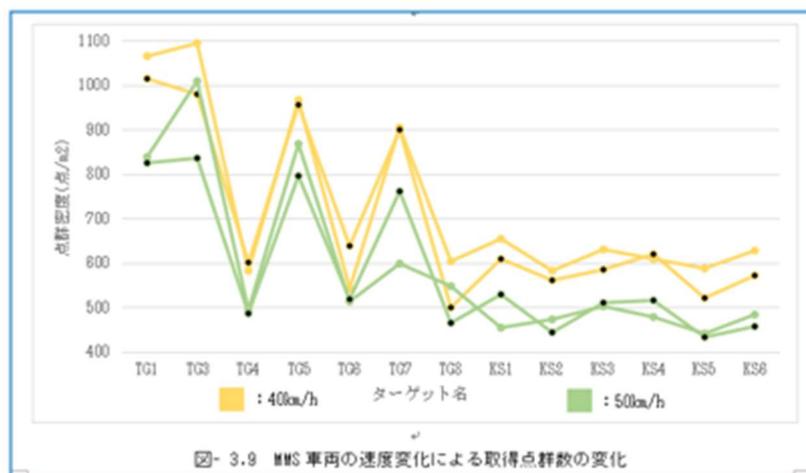


図 5-24 MMS 車両の速度変化に伴う取得点群数の変化

MMS 車両の走行速度の変化による点群取得数の減少を示すため、以下の式 (7) を用いる。

$$\text{Rate of decrease (\%)} = \left(1 - \frac{\text{Points}(50\text{km/h})}{\text{Points}(40\text{km/h})}\right) \times 100 \quad (7)$$

この点群減少率の式は、MMS 車両の走行速度を変化させた際に、点群の取得数がどの程度変化するかを数値化したものである。Points (50 km/h) は、MMS 車両が 50 km/h で走行した際にターゲット上で取得した点群の数を示す。同様に、Points (40 km/h) は、MMS 車両が 40 km/h で走行した際にターゲット上で取得した点群の数を示す。この点群減少率を用いることで、MMS 車両が 40 km/h で走行した際の点群数は、50 km/h で走行した際と比べて減少したことが分かる。さらに、法面上の点群は約 20%減少していることが確認できた。一般に、点群数が多いほど地物をより精密に表現できるため、MMS 車両の走行速度が遅いほど、対象物のひび割れなどの微細な変化をより詳細に捉えられると考えられる。以上の結果から、MMS 車両の走行速度がレーザ一点群の精度に大きな影響を及ぼすことは確認されなかったが、取得される点群の数には影響を与えることが分かった。

5. 6 MMS 計測で取得した点群の変状精度の検証

本節では、MMS 計測で取得した点群が変状をどの程度再現できるかを検証する。

計測精度の確認のため、クラック（亀裂）とはらみ出しを模した模擬供試体を設置した（図 5-25）。設置場所は、TG 8 付近の上段と TG 7 付近の下段の 2 か所である。各供試体には、以下の変状を再現するための要素を設置した。

1. クラックを模した変状

- ・横型亀裂と縦型亀裂の 2 種類
- ・5、10、20、30、50、100 mm の隙間を空けて供試体を設置（図 3.12）
- ・各供試体の寸法：横 0.5 m、縦 50 mm、奥行き 50 mm
- ・点群データでこれらの隙間を再現できるかを検証

2. はらみ出しを模した変状

- ・厚さ 2、5、10、20、30、50 mm の板を設置
- ・点群データでこの厚さの違いを再現できるかを検証

以上の設定のもと、MMS 計測で取得した点群の再現性を評価する。

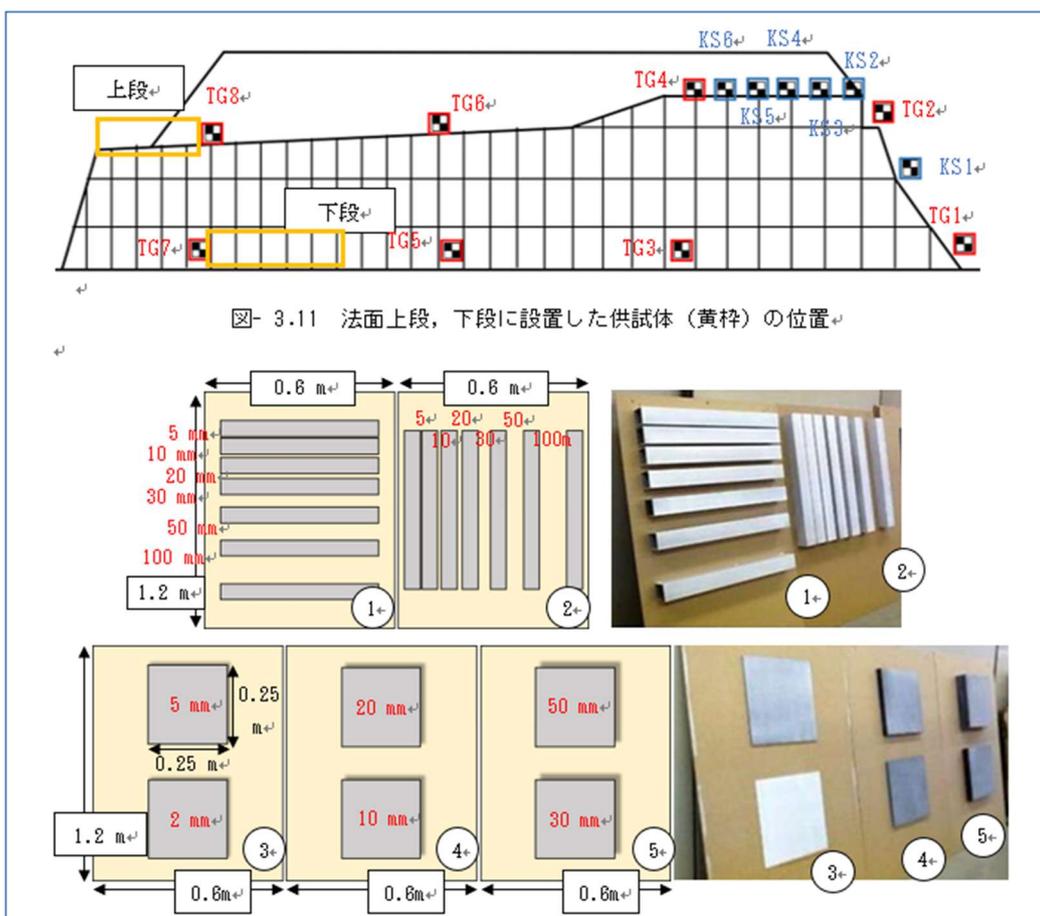


図- 3.11 法面上段、下段に設置した供試体（黄枠）の位置

図 5-25 法面上に設置した供試体の図解と写真

*①, ②はひび割れを模した変状, ③, ④, ⑤ははらみ出しを模した変状

まず、MMS 車両が時速 40 km で走行した際に取得した供試体の点群を評価する。
法面下部の点群は図 5-26、法面上部の点群は図 5-27 に示す。

(1) 法面下部の点群について

法面の表面は地面と垂直ではなく、緩やかに傾斜しており、その上に供試体を立てかけたため、実際の点群は斜めに取得されている。ただし、図では地面と垂直方向に表示している。

クラックを模した供試体 (①・②)

供試体① (横方向のクラック)

- ・斜めに立てかけた影響で、クラック後方の点群を垂直に取得できていない。
- ・クラックは緩やかに確認できるが、明確な形状を捉えられていない。
- ・20 mm 程度の隙間からクラックを確認できるが、この時点で 50 mm の深さがあるはずのクラックが約 1/3 の深さしか確認できない。

供試体② (横方向のクラック)

- ・5 mm 幅のクラックまで確認可能。
- ・50 mm の深さを正確に検出することはできなかった。

はらみ出しを模した供試体 (③・④・⑤)

- ・供試体①・②と同様に、法面上に斜めに立てかけている。
- ・10 mm の厚さではっきりと検出できる。

点群密度の確認

供試体付近に設置していた TG 7 には 470 点の点群が取得されていた。

(2) 法面上部で取得した点群について

法面上部の供試体は保護網上に設置したため、地面と垂直に配置されている。

クラックを模した供試体 (①・②)

供試体① (横方向のクラック)

- ・下部の点群と同様に、20 mm のクラックまで検出可能
- ・ただし、上部の供試体は MMS 車両との距離・角度の影響で、四角形として表示されるはずの点群が丸く表示されている。

供試体② (縦方向のクラック)

- ・下部では 5 mm のクラックが検出できたが、上部では 20 mm までしか検出できなかった。

はらみ出しを模した供試体 (③・④・⑤)

- ・10 mm の供試体は検出可能であることが確認された。

点群密度の確認

- ・供試体付近の TG 8 には 320 点の点群が取得されていた。

時速 50 km で走行した場合の点群評価

続いて、MMS 車両が時速 50 km で走行した際の供試体のレーザー点群を評価する。法面下部の点群は図 5-26、法面上部の点群は図 5-27 に示す。

(1) 法面下部で取得した点群について

クラックを模した供試体①および②について、横方向のクラックを模した供試体①では 20 mm、供試体②では 5 mm の変状を識別することができた。この結果は、時速 40 km で走行した際の結果と一致する。次に、はらみ出しを模した変状の供試体③、④、⑤について述べる。2 mm の供試体の下部には、わずかではあるが供試体の角の点群を確認できるため、検出できる可能性がある。一方で、10 mm のはらみ出しであれば確実に検出できることが分かった。なお、供試体付近に設置していた TG 7 には、385 点の点群が確認された。

(2) 法面上部で取得した点群について

横方向のクラックを模した供試体①では、20 mm のクラックを検出できた。ただし、断面で確認した際に、点群によるクラックの形状の再現度は十分ではなかった。供試体②では、時速 40 km で走行した際と同様に、20 mm のクラックを確認することができた。続いて、供試体③、④、⑤について述べる。はらみ出しを模した供試体は、10 mm の変状で検出可能であることが分かった。供試体付近に設置した TG 8 には、合計 292 点の点群が確認された。

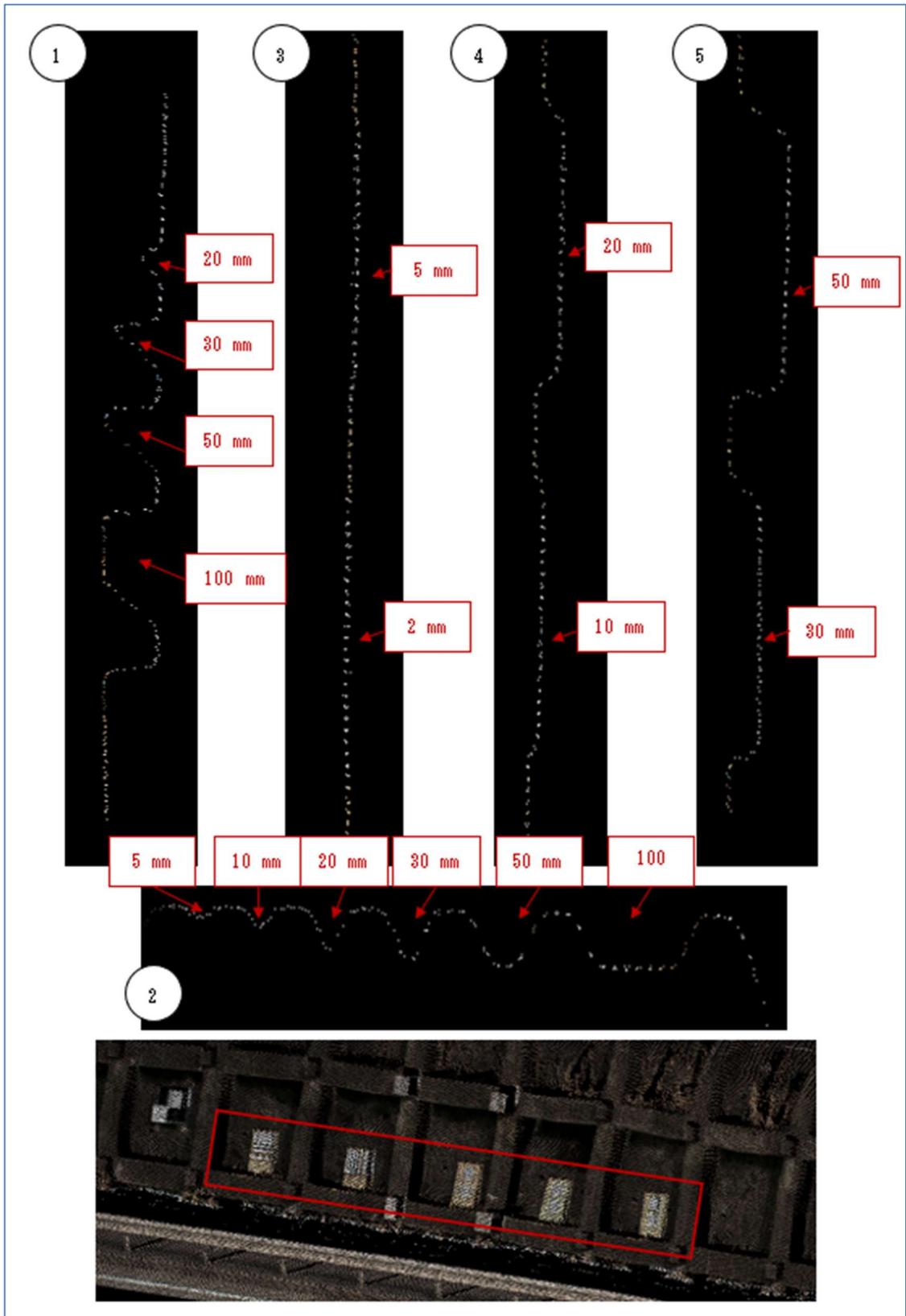


図 5-26 MMS 車両が 40 km/h で走行した際に取得した下段の供試体の点群

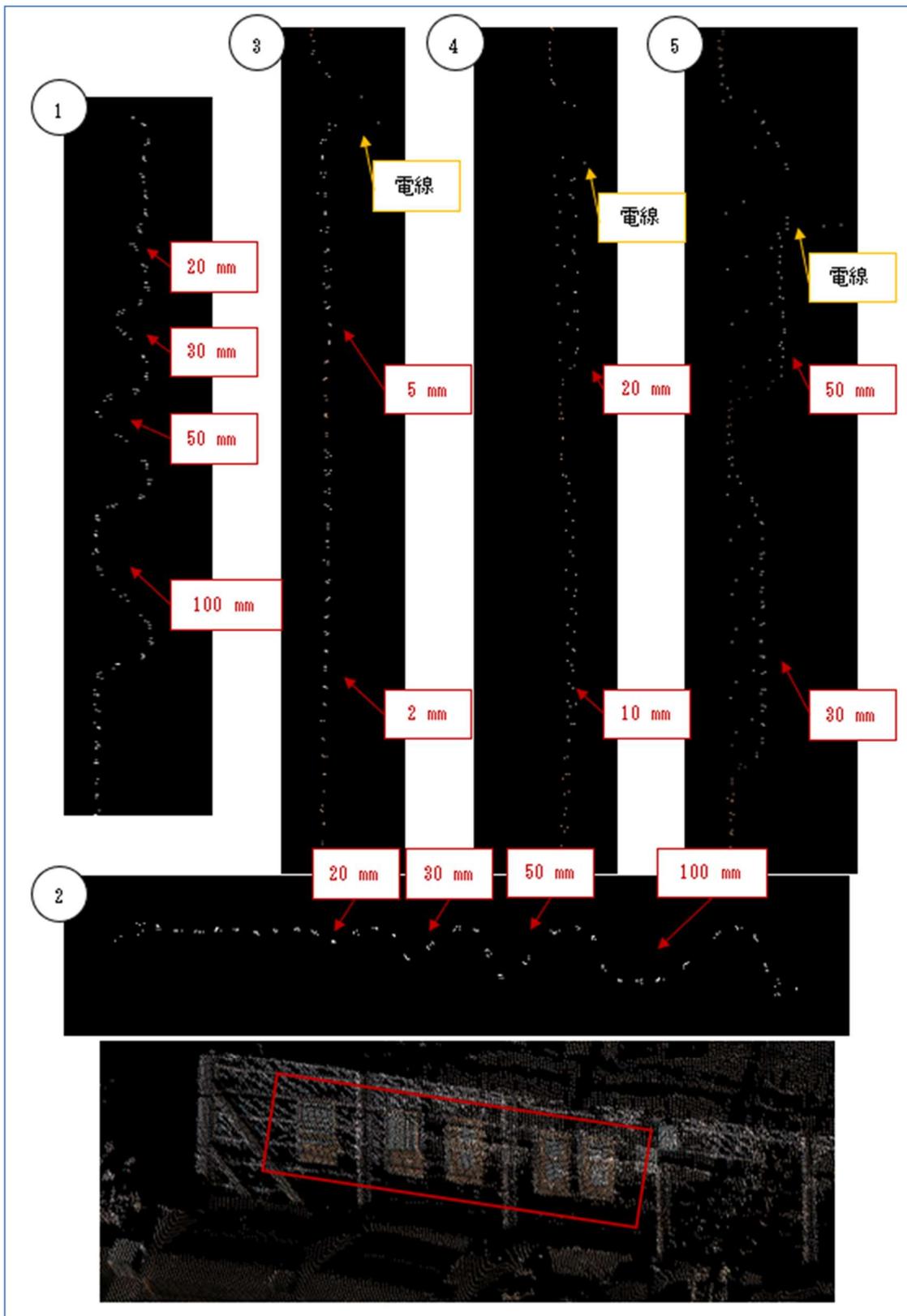


図 5-27 MMS 車両が 40 km/h で走行した際に取得した上段の供試体の点群

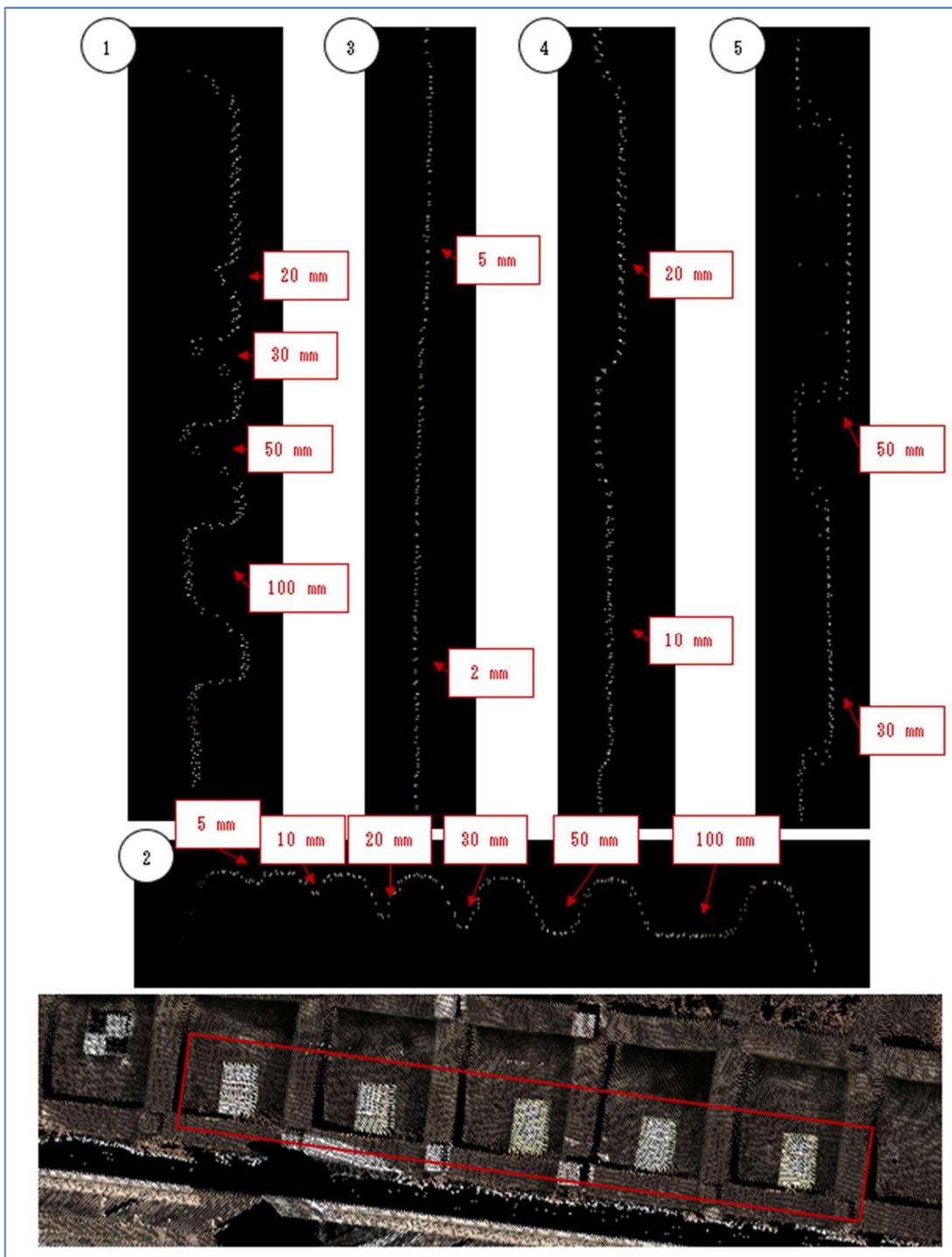


図 5-28 MMS 車両が 50 km/h で走行した際に取得した下段の供試体の点群

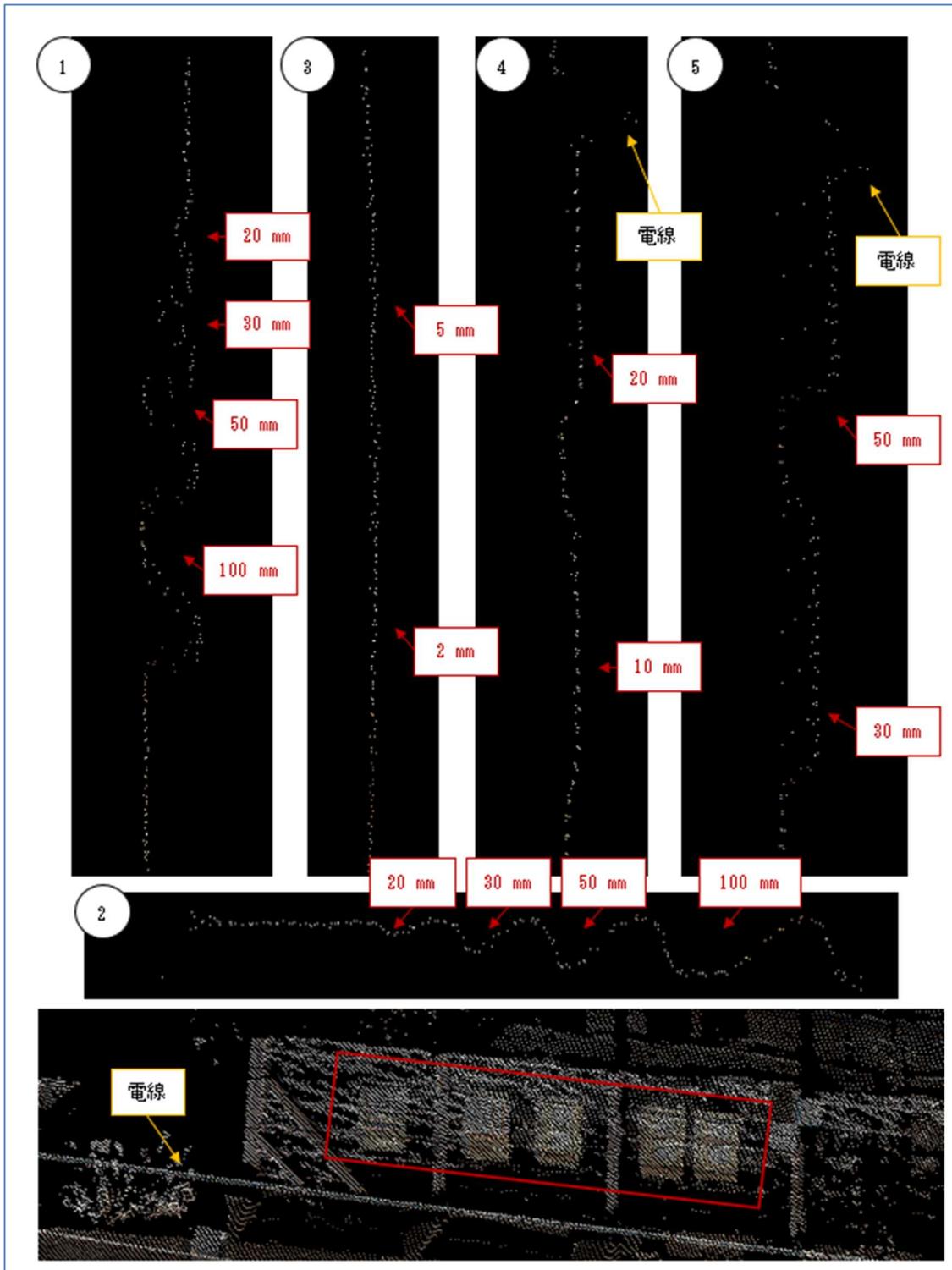


図 5-29 MMS 車両が 50 km/h で走行した際に取得した上段の供試体の点群

5.7 Iterative Closest Point に関する検証

本章では、ICP アルゴリズムに関する 2 つの検証を行う。

1 つ目は、模擬変状を用いた法面変状の抽出である。2 つ目は、点群の点数を減らすサンプリングを実施し、点群密度の増減が変状抽出の精度に与える影響を検証する。

(1) 法面変状抽出の検証

本節では、MMS 計測によって得られた点群を用い、ICP 手法がどのような変状を抽出できるかを検証した。本検証では、対象となる法面の法枠 4 つ分を使用した。1 時期目には、変状を加えずに MMS 計測を行い、2 時期目には模擬変状を付与し、ICP 手法による検出が可能かを検証する。法枠内に設置した模擬変状について説明する (図 5-30)。これらの模擬変状を用いて得られると予想される結果を以下に示す。

- ・法枠 A : 1 時期目・2 時期目ともに模擬変状を設置せず、解析の結果、変状が検出されないことを確認する。
- ・法枠 B : 1 時期目には模擬変状を設置せず、2 時期目には法面表面のコンクリートを削り、最大 40 mm 程度のはつり落としを行った。はつり落としの全長は約 1 m であり、法枠の中央右付近に施工した。
- ・法枠 C・D : 1 時期目には模擬変状を設置せず、2 時期目にはそれぞれ 10 mm、20 mm のシートを設置した。これらのシートのサイズは 1 辺 0.5 m である。ICP 手法がどの程度の変状を検出できるかを検証する。

また、図 5-30 の通り、法面上には氷柱や植生などのノイズ点群が存在している。そのため、検証の際にこれらの点群を除去するフィルタリングを行い、解析を実施した。フィルタリング前後の検証結果について、以下に述べる。

1 時 期 目	A. 変状なし	B. 変状なし	C. 変状なし	D. 変状なし
2 時 期 目				
	A. 変状なし	B. はつり落とし	C. 10 mm 厚のシート	D. 20 mm 厚のシート
解 析 結 果 予 想 さ れ る				
	法面断面	法面断面	法面断面	法面断面

図 5-30 変状の供試体を設置した法枠とそれぞれの法枠で期待される変状

フィルタリング前の模擬変状の抽出精度の確認

フィルタリングを行う前に、模擬変状の抽出精度を確認する。1 時期目および 2 時期目の点群は、MMS 車両が時速 50 km で追い越し車線（車線②）を走行した際に取得したものであり、本検証では、PDOP が相対的に良好とされる 2.0 以下の条件で取得した点群を用いた。また、これらの点群は調整用基準点を用いて位置補正を行っている。フィルタリング前の法枠の解析結果を 図 5-31 の上部に示し、次のように表現している。

- ・上部のベクトル図：ベクトルと変化量を示し、変化の方向と大きさを表している。
- ・下部のヒートマップ図：色によって変化を表しており、右側に示した *Displacement value (m)* に基づき、変化の大きさを確認できる。単位はメートル (m) である。

法枠 A の解析結果

法枠内全体に変化が見られるが、特定の方向に顕著な変化は検出されなかった。また、法枠の上下の一部にはノイズと思われる大きな変化が確認された。

法枠 B の解析結果

約 40 mm のはつり落としを行ったが、解析結果の上部では、氷柱の点群や法枠のノイズの影響と考えられる地山側への変位が確認された。その影響により、はつり落としによる変化は解析結果から直接確認できなかった。しかし、図 4.7 に示す法枠断面の解析結果では、はつり落としによる変状が確認された。

法枠 C・D の解析結果

これらの法枠には、それぞれ 10 mm および 20 mm のはらみ出しを模したシートを設置している。どちらの法枠においても、上部のベクトル図や断面の解析結果から変化の様子を確認することができた。また、本解析結果では法枠下部の植生の影響が大きいことが示唆された。

フィルタリング後の模擬変状の抽出精度の確認

フィルタリングを実施した後の模擬変状の抽出精度を確認する。各時期の点群から不要な箇所を削除し、解析を行った。

解析の対象は以下の2種類である。

1. 植生・氷柱・法枠などの不要な点群を除去した法面表面の4区分
2. それぞれの区分において法枠を含む法面を切り出した4区分

フィルタリング後の解析結果を図5-31の下部に示す。これらは、フィルタリング前の解析結果と同様に、上部にベクトル図、下部にヒートマップ図を配置している。

法枠Aの解析結果

法枠の上下に存在する不要な点群やノイズを除去したことで、法面上にある小さな変化のみが解析結果に残る形となった。

法枠Bの解析結果

上部に存在する不要な点群を除去したことで、はつり落としによる変化の様子がより明瞭に確認できるようになった。また、断面解析においても、はつり落としの変状のみが明確に捉えられている。

法枠C・Dの解析結果

法枠下部の植生の影響が大きく、これらの点群を除去したことで、1時期目と2時期目の点群が完全には合致せず、一部が変状として表れている。しかし、設置したシートについては、フィルタリング前と比較してより明瞭に確認できるようになった。

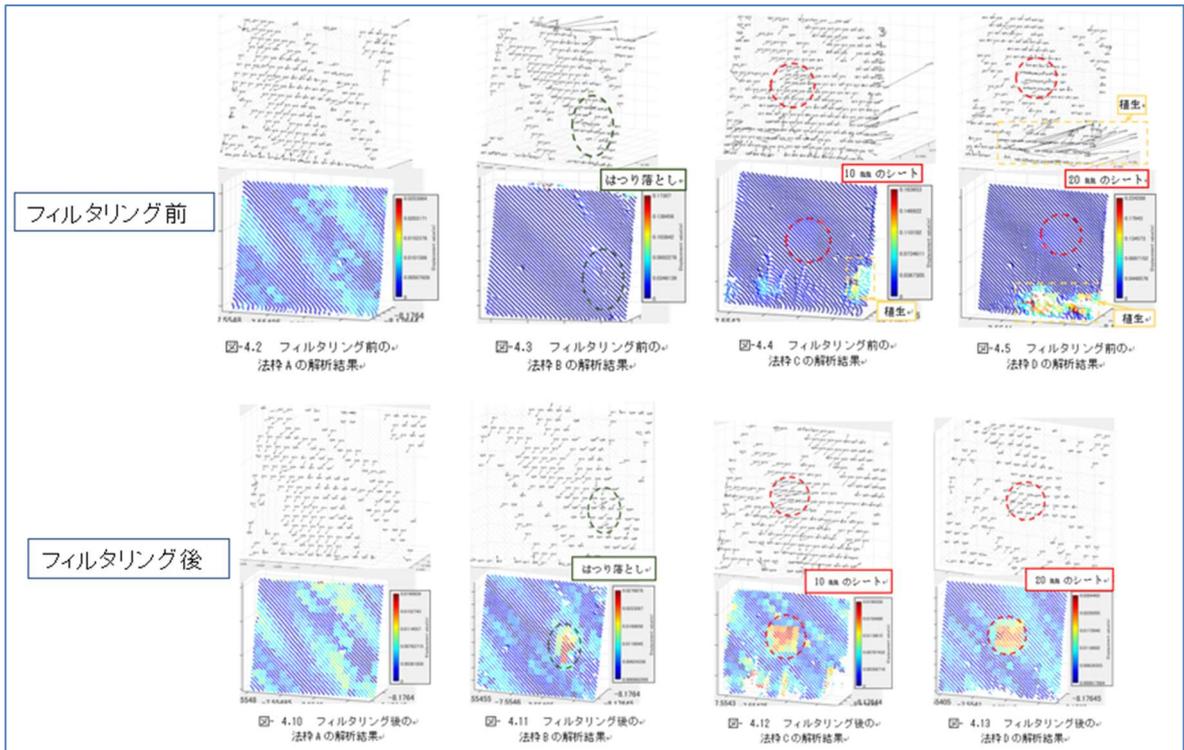


図 5-31 法枠内の解析結果

(2) 点群密度の変化による法面変状抽出の検証

本節では、前節で解析した4つの法枠（フィルタリング前後）に対し、CloudCompareの点群間引き機能 Subsample を用いて、点群密度の変化が法面変状の抽出に与える影響を検証した。点群数を減少させることで、解析時間の短縮が期待される。また、本手法では1秒間に100万点を取得可能なレーザースキャナーを使用しているが、取得可能な点群数が少ないスキャナーを用いた場合でも変状を適切に抽出できるかを検証する。CloudCompareの Subsample 機能には Random サンプルング と Space サンプルング の2種類があり(図5-32)、これらを使用して1時期目および2時期目の法枠内の点群をそれぞれ間引いた。

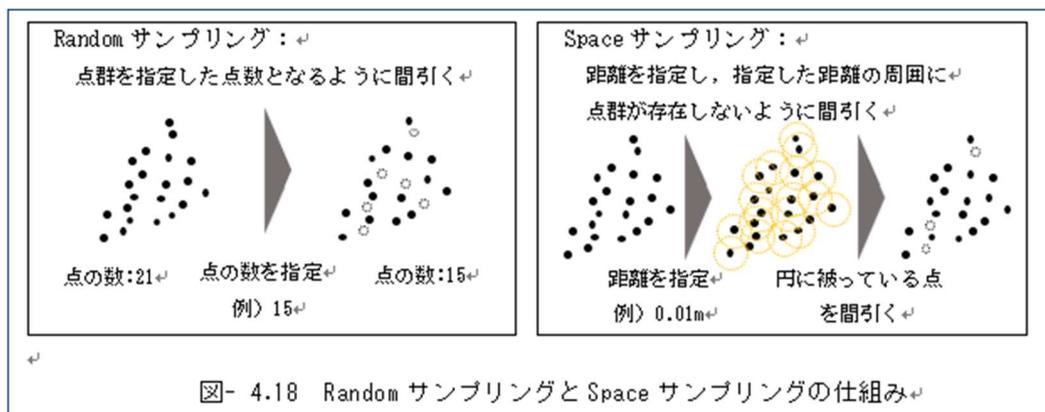


図 5-32 Random サンプルングと Space サンプルングの仕組み

Random サンプリングの概要と点群数の変化

Random サンプリングとは、指定した点数になるように点群をランダムに間引く機能である。フィルタリング前の点群に対してサンプリングを行った結果の点群数を図 5-33 に、フィルタリング後の点群に対してサンプリングを行った結果の点群数を図 5-34 に示す。これらの表において、①の点群はサンプリングを行っていないオリジナルの点群 である。また、②、③、④の各状態では、それぞれ前の状態の点群数の半分になるように間引きを実施した。本解析では、メッシュサイズを 0.1 m に設定している。

点群数	1 時期目 Random サンプリング			
	①	②	③	④
法枠 A	5204	2602	1301	651
法枠 B	5418	2709	1355	677
法枠 C	5788	2894	1447	724
法枠 D	5727	2864	1432	716
点群数	2 時期目 Random サンプリング			
	①	②	③	④
法枠 A	4943	2472	1236	618
法枠 B	5110	2555	1278	639
法枠 C	5445	2723	1361	681
法枠 D	5317	2659	1329	665

図 5-33 フィルタリング前の法枠の点群数 (Random サンプリング)

点群数	1 時期目 Random サンプリング			
	①	②	③	④
法枠 A	4641	2321	1160	580
法枠 B	5126	2563	1282	641
法枠 C	4607	2304	1152	576
法枠 D	4438	2219	1110	555
点群数	2 時期目 Random サンプリング			
	①	②	③	④
法枠 A	4399	2200	1100	550
法枠 B	4898	2449	1225	612
法枠 C	4835	2418	1209	604
法枠 D	4225	2113	1056	528

図 5-33 フィルタリング前の法枠の点群数 (Random サンプリング)

Random サンプリングを適用した点群の解析結果

フィルタリングを行わずに Random サンプリングを適用した点群の解析結果を図 5-34 に示す。また、フィルタリングを行った後に Random サンプリングを適用した点群の解析結果を図 5-35 に示す。

フィルタリング前の解析結果 (図 5-34)

法枠内に設置した変状は、サンプリングを行っていない①の段階でも確認することができなかつた。一方で、2 時期目の法枠 C・D 内の右下付近に存在する植生は、点群数を 4 分の 1 に間引いた③の状態でも、2 時期間の変状として確認できることが分かった。

フィルタリング後の解析結果 (図 5-35)

法枠内に設置した変状は、①の段階で明確に抽出できている。さらに、点群数を 2 分の 1 に減少させた②の状態でも、変状を抽出することが可能であることが確認された。ここで、変状量のみが異なる法枠 C と D の解析結果を比較すると、変状量が 20 mm である箇所は、よりはっきりとした変化として表れている。

まとめ

以上の結果から、本検証における変状は、フィルタリングを行った場合、元の点群数の 2 分の 1 に減少させても適切に抽出できることが確認された。

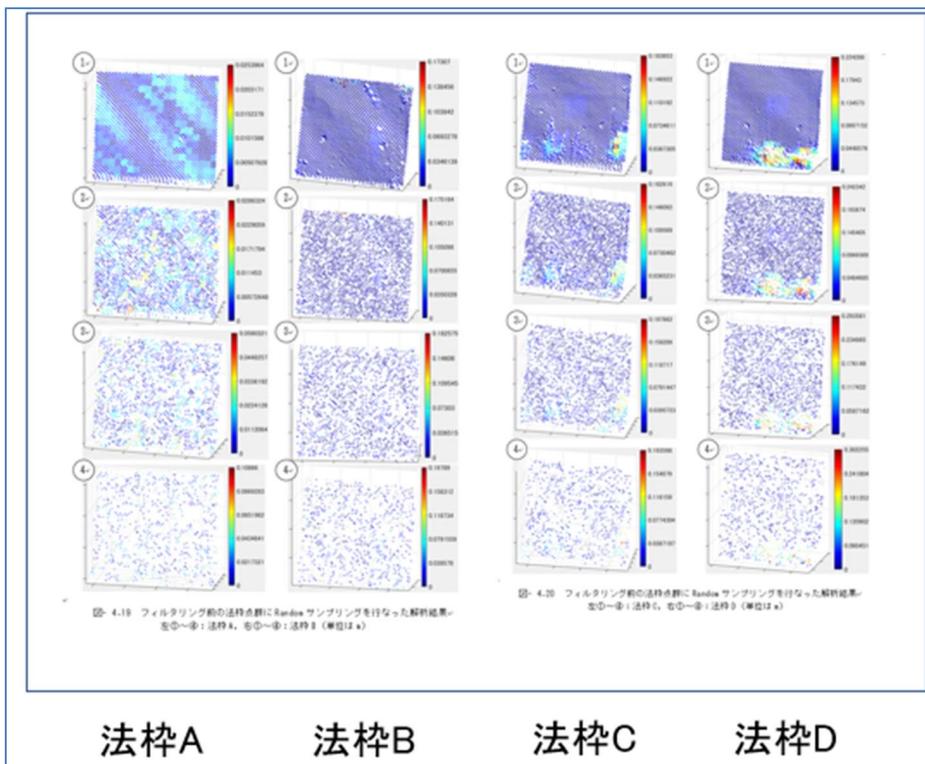


図 5-34 フィルタリング前の法枠点群に Random サンプルした解析結果

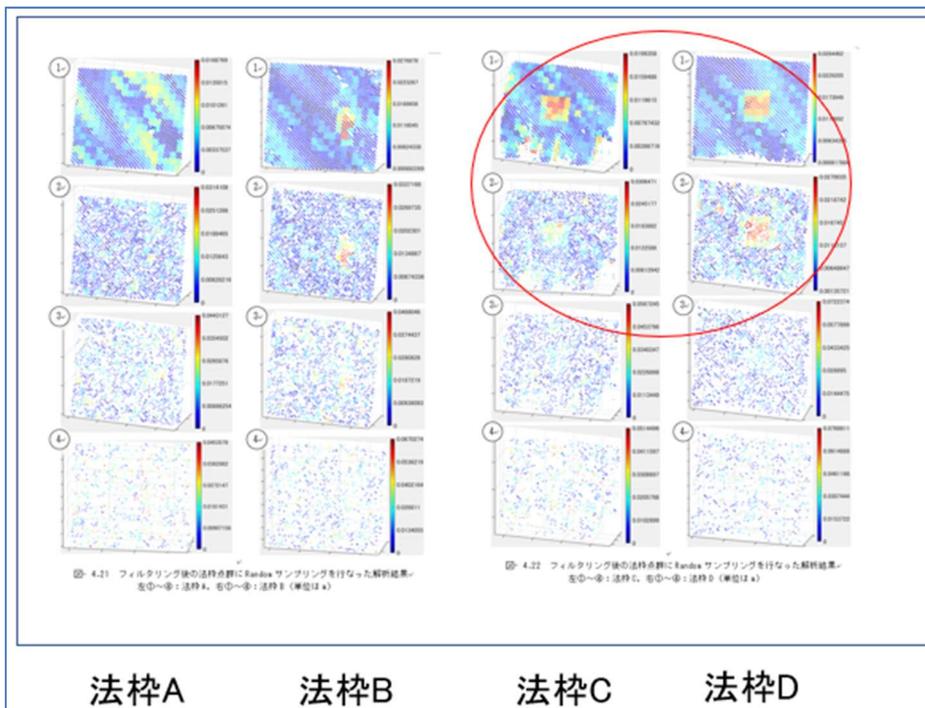


図 5-35 フィルタリング後の法枠点群に Random サンプルした解析結果

Space サンプリングの概要と解析条件

Space サンプリングとは、2点間の最小距離を設定することで、それよりも近接する点を削除し、点群を間引く機能である。

最小距離の値が大きいほど、保持される点群数は少なくなるという特徴がある。

本検証では、図 5-36 に示すように、合計 7 段階の Space サンプリングを実施した。

- ・①の状態では、Space サンプリングを適用しない。
- ・②から⑦の状態では、2点間の最小距離をそれぞれ 0.02 m, 0.03 m, 0.04 m, 0.05 m, 0.06 m, 0.07 m に設定し、その値に基づいて点群を間引いた。

また、Random サンプリングと同様に、フィルタリング前後の点群を用いて解析を実施した。なお、本解析ではメッシュサイズを 0.1 m に設定した。

フィルタリングを行わず、Space サンプリングで点群を間引いた場合の解析結果を、図 5-36 の上部に示す。

法枠 A の解析結果

- ・①, ②, ③の段階では、変状は確認されなかった。
- ・しかし、④, ⑤の段階では、局所的に変状が生じているように見える。

これは、1 時期目と 2 時期目で対応していた点群が、それぞれのサンプリングによって除去され、①の点群分布よりも遠くの点と対応付けられたことが原因であると考えられる。

法枠 B の解析結果

- ・上部に存在する氷柱の影響により、はつり落としの変状が明瞭に表れていない。

法枠 C・D の解析結果

- ・フィルタリング前の Random サンプリングの解析結果と同様に、10 mm および 20 mm 厚のシートは変状として抽出されなかった。
- ・一方で、植生が 2 時期間の変化として表れている。

フィルタリングを行い、Space サンプリングによって点群を間引いた場合の解析結果を、図 5-36 の下部に示す。

法枠 A の解析結果

- ・①～④の段階では変状は確認されなかった。
- ・⑤～⑦の段階では、フィルタリング前の解析結果と同様に、局所的に変状が見られた。

法枠 B の解析結果

- ・2点間の最小距離が 0.04m の④まで、①と同様に変状を抽出できている。
- ・⑤の解析結果では変状が確認できるものの、はつり落としの変状付近以外の箇所にも変状が表れている。

法枠 C・D の解析結果

- ・法枠 C では、2点間の最小距離が 0.04 m で変状を抽出できた。
- ・法枠 D では、2点間の最小距離が 0.05 m で変状を抽出することができた。

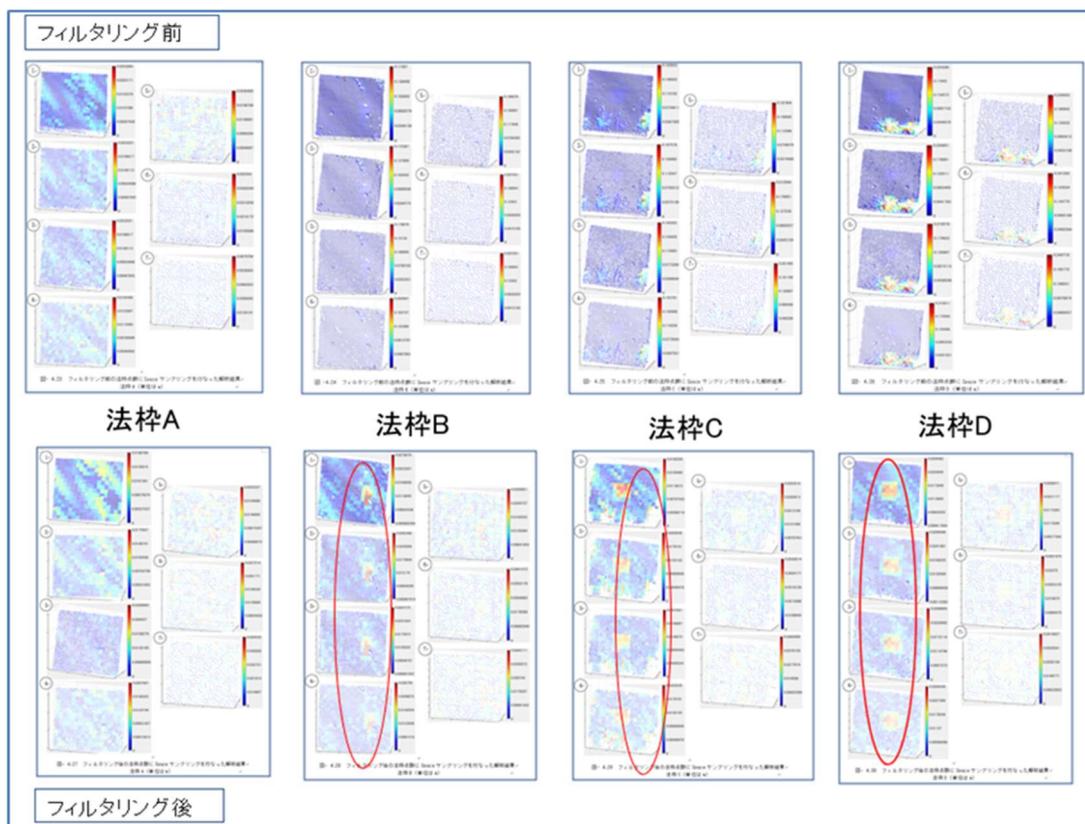


図 5-36 フィルタリング前後の法枠点群に Space サンプリングを行った解析結果

結論

本研究では、現在の法面点検において定性的な評価が主であることおよび効率性に課題があることを背景として、MMS（モバイルマッピングシステム）で取得した点群を使用し、ICP アルゴリズムを応用した手法による法面の 2 時期間の変状抽出を試みた。

この一連の手法によって、法面点検の補助やスクリーニング手法としての活用が期待できるかを目的とし、MMS および ICP に関する検証を行ったうえで、法面や道路法面を対象に解析を実施した。

第 5 章での MMS に関する検証

① MMS の走行速度による点群精度

MMS 車両が時速 40 km で走行した場合 の RMS 誤差

- ・ 水平方向 (ΔXY) で 16 mm
- ・ 鉛直方向 (ΔZ) で 18 mm

時速 50 km で走行した場合 の RMS 誤差

- ・ 水平方向 (ΔXY) で 14 mm
- ・ 鉛直方向 (ΔZ) で 31 mm

鉛直方向については、低速（時速 40 km）で走行したほうが点群取得精度は高くなることが確認された。

② 調整用基準点の有無による点群精度

調整用基準点（7 点）を使用した場合 の RMS 誤差は

- ・ ΔXY で 22 mm、 ΔZ で 26 mm

基準点を使用しなかった場合 の RMS 誤差は

- ・ ΔXY で 21 mm、 ΔZ で 15 mm

基準点の有無による精度の差は大きくなかったが、系統誤差の補正が可能であることが確認された。

③ 衛星配置（DOP 値）による点群精度

DOP (Dilution of Precision) の値が悪い状態 での RMS 誤差は

- ・ ΔXY で 21 mm、 ΔZ で 21 mm

DOP 値が良い状態 での RMS 誤差は

- ・ ΔXY で 16 mm、 ΔZ で 10 mm

この結果は、対象とした法面が開けた環境であり、DOP 値が全体的に良好であったことが要因と考えられる。

④ MMS 計測で取得できる点群密度

時速 50 km で走行した場合，時速 40 km で走行した場合と比較して，点群数が約 20%減少することが分かった．また，法面の上部に比べ，下部のほうが点群取得数は減少する傾向が確認された．

⑤ 変状の再現性

本研究で用いた MMS の計測条件（時速 50 km で走行）において，法面下部の変状識別性を検証した結果，以下の変状を識別できることが確認された．

- ・横型亀裂：20 mm 以上
- ・縦型亀裂：20 mm 以上
- ・はらみ出しのような変状：10 mm 以上

OCP に関する検証

① 法面変状抽出の検証結果

- ・フィルタリング前の点群の解析結果では，植生などが変状として誤って抽出され，求める変状を確認できなかった．
- ・フィルタリングを行った点群では，法面の後方・前方それぞれの変状を適切に抽出することができた．
- ・点群密度を変更した場合の解析結果を確認したところ，フィルタリング後の点群であれば，元の点群の 4 分の 1 の密度（2 点間の最小距離が 0.04 m）の場合まで変状を抽出可能であることが分かった．

以上の結果から，本手法による法面の変状抽出が期待できる．

現在，法面の変状抽出には伸縮計が使用されており，この伸縮計では 1 日で 10 mm 以上の変位が観測された場合，警戒・応急対策が必要と判断される．本手法は，この対応区分に基づき，大きな変動が予想される法面の変状抽出・定量化，またはスクリーニング手法としての活用が可能である．本手法を用いて法面上の変化点を抽出し，抽出された箇所で見接目視を行うことで，法面点検の効率化が期待できる．

MMS で取得した法面の点群に対し，ICP アルゴリズムを応用して変状を抽出する本手法は，法面点検の補助やスクリーニング手法としての活用が期待できる．

本手法では，MMS という効率的な測量機器を使用しており，法面点検のパトロールを MMS 車両の通常走行で代替することが可能である．また，取得される点群は座標値を持つ定量的なデータであり，ICP アルゴリズムによる解析を行うことで，異なる時期の変状を数値として取得できる．さらに，この点群データと変状量のデータを蓄積し，長期的な維持管理に活用することで，管理の効率化が図れると考えられる．例えば，法面を特定の座標で区切り，それぞれに番号を付与することで，法面全体を細かく管理することが可能となる．経年変化を蓄積することで，補修や点検の適切なタイミングを容易に判断できると考える．

データ検証により、異常の可能性を早期に発見し、それが迅速な対応と災害防止が可能になる一方で、異常データの判断には個別の違いがあり、基準の整備が必要である。また重症度の判断には周辺の異常等を総合的に判断し、原因を追究する必要がある、専門家を交えた現場目視点検の研修等が必須になると考える。

施工会社視点での考察

一時期データの取得を施工会社が工事完成時に実施することを想定して考察する。対象は図 5-2 とする。本件は ICT 活用工事の中でも ICT 法面工に分類される。コンクリート構造物の測定精度は±10mmであり ICT 構造物を含むコンクリート構造物の要求精度は共通して±10mmとなる。この場合、UAV 測量や地上移動式計測機器では精度の確保が困難であるため、地上レーザー測量機器 (TLS) が選択される。しかし、TLS を使用する場合、機械高より上部の測定箇所において、フレームの上部など反射面が見えない部分ではデータの欠損が生じる。納品データは完璧を求められることがあり、データ欠損の説明に多大な労力を要する。また、TLS の特性上、近距離の反射面では点群が密になり、遠距離になるほど粗くなるため、均一なデータとはならない。そのため、点群を密に取得した上で、均一なデータとなるように間引く必要がある。さらに、書類作成にも多くの労力を要する。計測前に施工計画作成においては、評定点、検証点の設置に関する精度確認資料など、新技術を採用することで従来の施工にはなかった書類が発生し、その作成にかかる労力は計測作業よりも大きい。またこれらの書類は工事完成検査前に整備する必要がある。働き方改革の観点から見ても、従来の施工の方が効率的である。さらに出来形管理などの管理費用は認められないため、計測を外注するとその分コスト増となる。この問題への対策として維持管理に必要な一時期データの取得は別途に基準類を整備するなどの対策が必要となる。また、工事と切り離して別途発注することなどが求められる。

公共工事では、工事完成後に引き渡しが行われ、維持管理業務は施工者が関与しないのが一般的である。建設業務の流れは主に測量・計画、設計、施工、維持管理のプロセスで構成されているが、それぞれが分断され、一方向の流れとなっている。維持管理時の一部の知見は PDCA サイクルを通じて反映されることもあるが、設計や施工の段階で維持管理の視点が十分にとりいれられているとは言い難い。施工会社が維持管理に参加することで、大きなメリットが得られると考えられる。維持管理を意識したデジタルデータの作成が可能になり、施工時に現場の状況を熟知しているため、不具合原因究明を迅速に行うことができる。また、施工時に仮設計画などをシミュレーションしており、補修計画や災害対策を迅速に立案・実施することも可能となる。建設プロセスの流れを図 5-37 に示す。

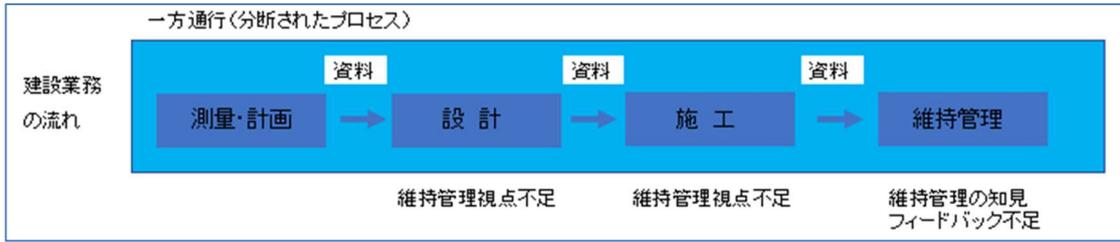


図 5-37 建設プロセスの流れ

第6章 結論

建設業のDX(デジタルトランスフォーメーション)は i-construction の推進が効率化において最も効果のある施策と考えられる。一方で、設計または施工等の業務の専門化により担当業務以外の知識不足となり、その流れが分断されている。第1章では建設業界における現状を分析し、従来施工になかった新たな技術または知識の取得とICT施工の流れを説明した。第2章ではUAV測量における実務での創意工夫を事例としてまとめ、第3章では実現場における効率化と精度検証を実施した。第4章では地下空間における点群データの取得を検証した。第5章では維持管理時におけるモニタリングデータの精度を検証した。

地域建設会社が維持管理業務に関わっていくことにはメリットが多くある。

①迅速対応可能

地域の建設会社は資材調達や人員の確保も容易となり、また、重機を保有する会社も存在し、日頃から近隣のリース会社や警備会社と良好な関係が築いているため、迅速な連絡・対応が地の利を活かし可能となる。維持管理業務においては、点検後に異常を発見した際の早期対応が重要である。

②地域実情に精通

地域の気候に詳しいことで特に積雪地方における対応や地盤の特性を理解している。道路事情に詳しいことで効率的な点検業務が可能となる。

③地域経済活性化

地域における建設業は直接的な雇用だけでなく、建設資材など地元発注が多く、地域の活性化につながる。

④コスト削減

遠方の業者を利用する場合、作業員の交通費や宿泊費が発生し、業務全体のコストが増加する。一方で地域業者であれば、通勤圏内での業務化可能なため、これらの費用を大幅に削減できる。

⑤地域住民との信頼関係

地元住民との良好な関係を築くことで、維持管理に対する理解が得られやすく、不要なトラブルを未然に防ぐことができ、地域建設業のイメージアップにもつながる。

⑥持続可能なインフラ管理

かつて、土木は「経験工学」ともいわれており、技術者は現場で実務経験を積みながら、その知識や技術を世代間で継承し、ノウハウを蓄積してきた。そのため、OJTによる教育には特に強みを持っている。継続的な維持管理を行うことで、点検だけでなく軽微な補修にも対応できる。また、点検に加えて施工も可能なため、危険度に応じた対策シミュレーションを実施し、持続可能なインフラ管理を実現できる。

一方でデメリットが考えられる。

①品質のばらつき

維持管理業務には点検・補修のノウハウや長期的な劣化予測の知識が求められる。しかし、適切な補修方法や計画の立案が難しく、不適切な施工によって施工ミスが発生する可能性がある。また、補修が過剰または過少になる可能性がある。

②競争激化

施工案件の減少により、企業間の競争が激しくなり、無理な受注が増加することが想定される。その結果、利益率が低下し、維持管理を継続するために必要な対応が十分にできなくなる可能性がある。

③人材不足

維持管理には、施工管理とは異なる専門知識が求められる。しかし、事業を継続するために計画的な人材を確保することが難しく、人材不足が深刻化する恐れがある。

デメリットと同様にコスト面でのハードルも存在する。MMSなどの効率化が期待できる機器は高額となりがちであり、地域の建設業にとって大きな課題となる。しかし、通常の建機の2倍の価格がするICT建機などを先進的に導入し、挑戦する建設会社もあり、それによって競争優位性を発揮できる。また、補助金などの制度が整備されれば、導入が進む可能性もある。

デメリットの対策について

施工会社が維持管理の点検業務を行うにはデメリットがあり、それぞれの課題について対策を講じる必要がある。

①品質のばらつき対策

品質のばらつき対策については研修又は講習会の受講がまずあげられる。国土交通省や地方自治体等が主体となって地域建設業でも負担とならないようなものが望まれる。

②競争激化対策

適切な地域建設業者による点検業務を実施するには一定以上の技術力を保持が望まれる。例えば点検業務の効率化には新技術の導入などが期待されており、ICT施工を内製化しているなど、新技術導入に積極的な企業選定が望ましい。

③人材不足対策

維持管理に携わる人材不足の解消には施工経験豊富な人材の投与が考えられる。新規建設投資減少と維持管理費用増加の割合に合わせて人材の流動もある。また、新しい技術を導入した事例でICT施工普及に貢献した中部地方整備局の建設ICT導入研究会のような活動が求められる。

今後の課題と展望

1920年代のニューディール政策以降、大規模なインフラ整備が行われたアメリカでは、1880年代には老朽化問題が深刻化し「荒廃するアメリカ」が出版されるなど、社会問題として顕在化した。この問題は経済や生活を含む多方面に影響を及ぼした。同様に、日本においてもインフラの老朽化が今後さらに深刻な社会問題となることが維持管理の専門家によって警告されている。しかし、地方では対応する管理体制が厳しく、十分な予防処置が講じられないまま問題の先送りが続き、結果としてインフラの維持管理が破綻するケースが増えている。

インフラ整備の遅れは地方の過疎化を加速させ、人口減少による財政縮小を招くなど、負のスパイラルに陥るリスクが高い。このように、地方の過疎化とインフラ維持管理は相互に影響を及ぼし合う関係にある。この状況を打破するためには、従来の方法を抜本的に変革するインフラDXの推進が求められる、より効果的かつ信頼性の高い維持管理体制を構築することが重要であり、その一環として、ICT施工を内製化している施工会社の参加を提案する。

ICT施工は国土交通省直轄工事において高い実施率を誇るが、その取り組みには施工会社ごとに差がある。しかし、先進技術を積極的に取り入れ、チャレンジ精神を持つ施工会社であれば、維持管理分野においても十分な対応が可能であると考えられる。また、そのような企業には優秀な若手人材が集まる傾向にある。参加にはインセンティブの提供や競争優位性の確立が求められる。

さらに、維持管理部門は施工部門と比較して、その重要性が過小評価される傾向にある。このため、専門職化を進め、長期的な地位向上を図ることが必要不可欠である。施策の一つとして、小中学校の授業にインフラ維持の重要性を組み込み、将来の人材確保と意識向上を図ることが有効である。

人材の確保には土木系大学生だけでなく専門外の学生及び工業高校生に期待される。特に、情報工学や機械工学を専攻する学生は、ICT技術の活用や自動化技術の導入に貢献できる可能性が高い。また、工業高校生は現場での即戦力として活躍できるため、実習やインターンシップを通じた早期育成が重要である。これらの人材がインフラ維持管理分野に積極的に参画できるよう、教育機関と建設業界が連携し、実践的なカリキュラムの整備やキャリアパスの明確化を進める必要がある。

建設会社が維持管理の点検業務を行う際には技術・コスト・人材など多くの課題が存在する。これらの課題に対処するためには専門技術者の育成、データの有効活用、業務の分業及び補助金の活用など対策が重要である。これらの施策を総合的に講じることで、維持管理の効率化と信頼性の向上を実現し、持続可能なインフラ維持体制の構築が可能となる。

謝辞

本論文をまとめるにあたり，多くの方々にご指導・ご鞭撻を賜りました。

本論文をまとめるにあたり，主査をお引き受けくださいました岡山大学学術研究院環境生命科学学域の木本和志准教授に，心より感謝申し上げます。お忙しい中，論文の作成，公聴会，審査に際し，多くの時間を割いてご指導いただき，誠にありがとうございました。

また，副査の吉田圭介准教授には，論文の作成に際し，ご指導を賜り，誠にありがとうございました。

西山哲教授には，主指導教員として博士後期課程で学ぶ機会を与えていただくとともに，本論文の作成に際し，ご指導を賜りました。ご多忙の中，幾度となく議論の機会をいただき，的確なご助言を賜ったおかげで，本論文をまとめることができました。また，県内外での様々な発表活動等に際しても，暖かいご支援と貴重なご助言を賜り，心より感謝申し上げます。

岡山大学西山研究室の博士後期課程同期生の皆さまには，1年目より講義や研究発表などで御一緒する機会もあり，情報共有を通じて様々な助言や励ましをいただきました。心より感謝申し上げます。

また，岡山大学西山研究室の学部生，修士生，卒業生の皆さまには本論文の作成にあたり，貴重なデータや情報をご提供いただくとともに，訪問しやすい環境を整えていただきました。深く感謝申し上げます。

株式会社荒木組の片山幹雄常務取締役には，このような貴重な機会を与えていただくとともに，ご助言を賜りました。誠にありがとうございました。

株式会社荒木組の土木部の皆さまには，様々な実験データの取得に際し，施工現場で多大なるご協力を賜りました。また，貴重なデータをご提供いただくとともに，意見交換の機会をいただきました。心より感謝申し上げます。

さらに，株式会社荒木組の技術課の皆さまには，研究活動に際し，様々なご配慮をしていただきました。心より感謝申し上げます。

最後に，岡山大学環境自然科学研究科博士後期課程への入学を喜んでくれて，研究活動を支えてくれた妻・通枝をはじめ，家族に心から感謝し，謝辞の結びと致します。