

3次元レーザスキャナを搭載したUAVによる地形測量について

重岡 知之

近畿地方整備局 豊岡河川国道事務所 計画課 (〒668-0025兵庫県豊岡市幸町10-3)

北近畿豊岡自動車道 豊岡道路では、樹木の生い茂った急峻な山間部で地形測量をするにあたり、3次元レーザスキャナを搭載したUAVによる地形測量を行った。本稿では、国内でも事例が少ない、レーザスキャナを搭載したUAVを用いた測量について、その取り組みと有用性を検証した。また、測量の次工程となる地質調査、設計への活用状況や今後の課題について、検証した結果を報告する。

キーワード UAV, 3次元レーザスキャナ, 地形測量, i-Construction, CIM

1. はじめに

豊岡河川国道事務所では、北近畿豊岡自動車道 豊岡道路が平成28年度に新規事業化された。幅杭の位置を決定する道路予備設計を実施するために、地図情報レベル1000の地形図が必要となった。

豊岡道路の測量範囲は、90%が樹木の生い茂った急峻な山間部であり、周辺には、コウノトリ但馬空港や豊岡病院がある。また、豊岡病院ではドクターヘリが運航している。(図-1)



図-1 平面図

地形測量は、当初TS測量で計画していたが、短期間で精度よく測量する必要があり、測量手法を変更した。

現地の状況より、①樹木が生い茂っている山地の地表面が取得できる、②短期間で所定の測量精度を確保できる、③周辺に空港や病院があっても採用可能である、という条件を満たす「3次元レーザスキャナを搭載したUAVによる地形測量」(以下、「UAVレーザ測量」と述べる)を採用した。地上型レーザ測量は、急峻な山間部には不適である。UAV写真測量は樹木があるために地表面のデータが取得できないため、採用できなかった。

また、航空レーザ測量も要求精度を満たせないことや、ドクターヘリとの調整が難しい可能性があるかと判断した。

本稿では、UAVレーザ測量の取り組みと有用性を検証した。また、次工程となる地質調査、設計への活用状況や今後の課題について、検証した結果を報告する。

2. UAVレーザ測量について

(1) UAVレーザ測量とは

UAVレーザ測量は、空中から地形・地物の標高を計測する最先端の技術である。(図-2)

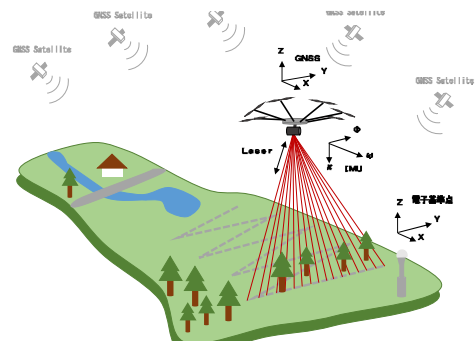


図-2 UAVレーザ測量の概念

その原理は、GNSS受信機(衛星測位システム)とIMU装置(慣性計測装置)によりUAVの位置と姿勢の情報を取得しながら、レーザスキャナにより左右にレーザを照射し、レーザ光の照射方向と地上までの距離を計測するものである。計測データの解析により、X,Y,Z座標をもった3次元点群データを得ることができる。UAVレーザ測量の最大の特徴は、樹木があってもその下の地表面を精度よく測量できる点である。このシステムは毎秒数十万測定という高密度なレーザを照射することで、樹木の葉の隙

間を通過して、地表面のデータを取得できる。樹木下を計測している様子を図-3に示す。

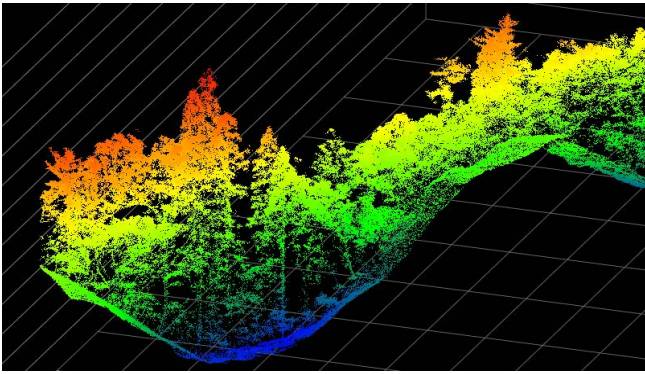


図-3 レーザが樹木下を計測している様子

(2) UAVレーザシステムの仕様

今回使用したレーザスキャナ (REIGL社製: VUX-1) とUAVを図4に示す。また、機器の諸元を表-1に示す。

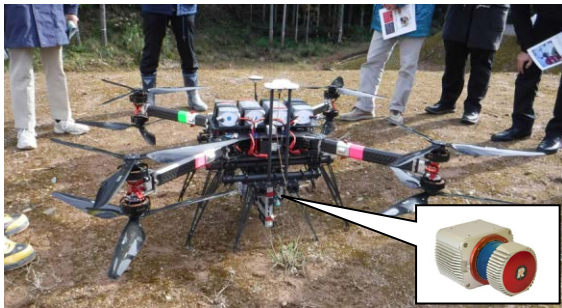


図-4 今回使用したレーザスキャナとUAV

表-1 機器の諸元

| | |
|-----------|--------------|
| 機体サイズ | 110×110×70cm |
| フライトタイム | 15分 |
| 自律航行 | 可能 |
| フライト重量 | 24.5kg |
| 飛行可能範囲 | 1,000m |
| レーザクラス | アイセーフクラス 1 |
| 最大測定距離 | 920m |
| 有効測定レート | 50万測定/秒 |
| 視野角 (FOV) | 330° |
| 取得パルス | オンライン波形解析 |

3. UAVレーザ測量および解析の実施

(1) 測量の実施

測量の実施にあたっては「作業規定の準則」および「UAVを用いた公共測量マニュアル」を準用した。調整用基準点は、11点設置した。UAVレーザ測量は高解像度で調整用基準点が視認できるため、XYZ座標すべてを使用して補正が可能であり、これにより、位置精度が向上する。配点図を図-5に示す。

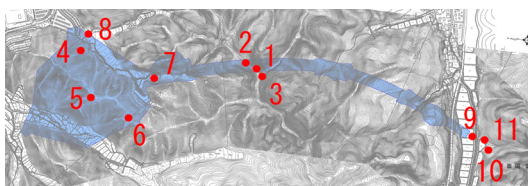


図-5 調整用基準点 配点図

飛行は自律航行により行い、対地高度は149m以下、対地速度は5m/secとした。飛行コースはコウノトリ但馬

空港の制限表面区域に含まれるため許可を得て飛行した。また、豊岡病院とも事前協議を行った。

飛行コースは北側, 中央, 南側の3エリアに分割した。(図-6) 作業の様子を図-7に示す。

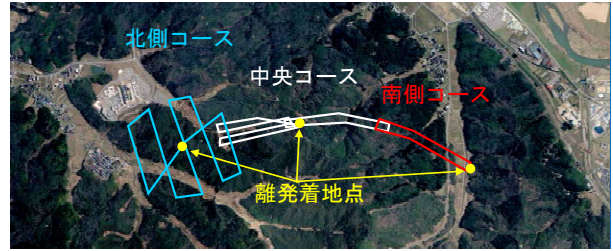


図-6 離発着地点と飛行コース



図-7 測量作業の様子

(2) 計測データの取得および処理

計測データの取得から、処理のフローを以下に示す。

(図-8)

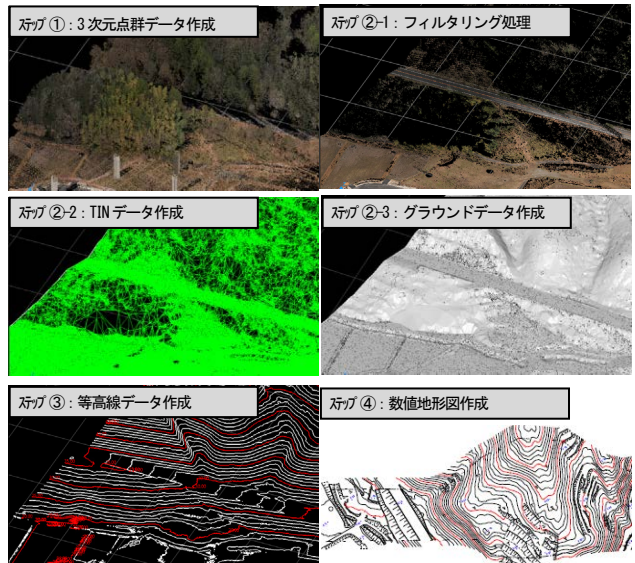


図-8 計測データの取得から処理のフロー

以下に各フローの詳細な内容を示す。

ステップ①: 3次元点群データ作成

計測データから、調整用基準点を用いて点検・調整した3次元点群データを作成した。座標の調整は北側, 中央, 南側の3区間ごとに実施した。(図-9)

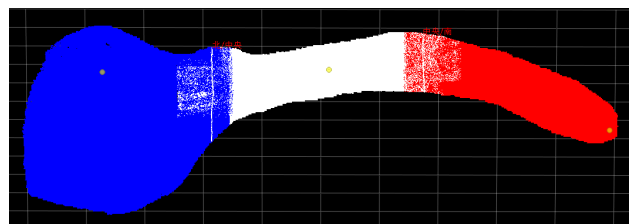


図-9 北側(青)・中央(白)・南側(赤)の点群の重ね合わせ

留意した点は、3区間の3次元点群データを一つに合成してから調整すると誤差が比較的大きく生じたため、区間ごとに調整用基準点を用いて調整したことである。この手法により、全体的な精度が向上した。

調整用基準点の水平位置及び標高値の較差について、平均値と標準偏差を表-2に示す。

表-2 水平位置および標高値の較差

| 水平位置の較差 | | 標高値の較差 | |
|---------|--------|--------|--------|
| 平均値 | 標準偏差 | 平均値 | 標準偏差 |
| 0.038m | 0.045m | 0.018m | 0.044m |

空中写真測量の標定点の要求精度（地図情報レベル1000）：水平位置の標準偏差0.1m以内、標高値の標準偏差0.1m以内に対して、許容範囲を満たしていた。

ステップ②：グラウンドデータへの処理

3次元点群データから建物や樹木等をフィルタリング処理し、地表面の3次元座標データを作成した。フィルタリングの状況を図-10に示す。

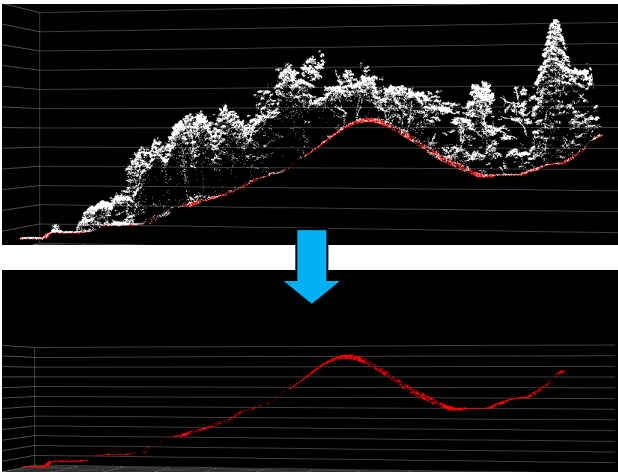


図-10 フィルタリング状況

フィルタリング後の点群からTIN(Triangulated Irregular Network)と呼ばれる不整三角網を作成した。

フィルタリングが適切に行われたか、作成されたグラウンドデータに異常が無いかを点検した。全測量範囲0.31km²のうち約50%となる0.16km²のエリアにおける、50本の断面（図-11）について異常が無いか点検した。点検の結果、適切にフィルタリングされていることが確認できた。断面の事例を図-12に示す。

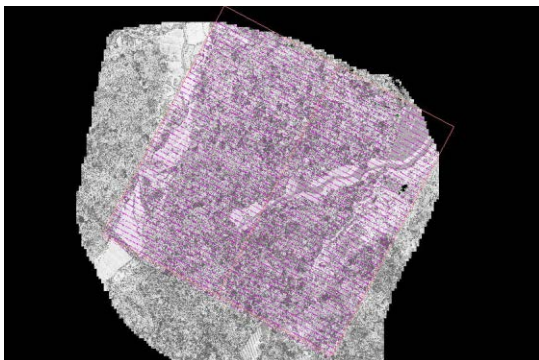


図-11 点検範囲と断面線（紫）

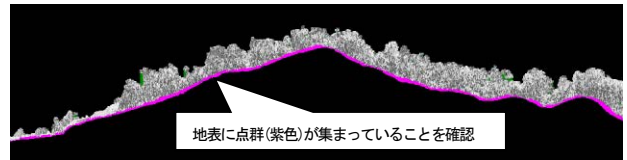


図-12 断面の事例

ステップ③：等高線データ作成

グラウンドデータから内挿補間により、1m格子中の複数の標高値から重心となる標高を算出して、グリッドデータを作成した。そのグリッドデータから、自動生成により、地図情報レベル1000の等高線データを作成した。専用ソフトウェアを用いて目視確認による点検を行った。点検画面を図-13に示す。

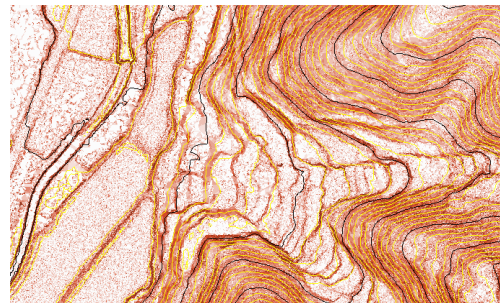


図-13 等高線データ点検画面

ステップ④：数値地形図作成

グラウンドデータを用いて、勾配を着色で表現した傾斜段彩図を作成し、その後、数値地形図を作成した。

専用ソフトウェアによる目視点検を実施し、結果は良好であった。点検画面を図-14、点検後の数値地形図を図-15に示す。



図-14 数値地形図点検画面

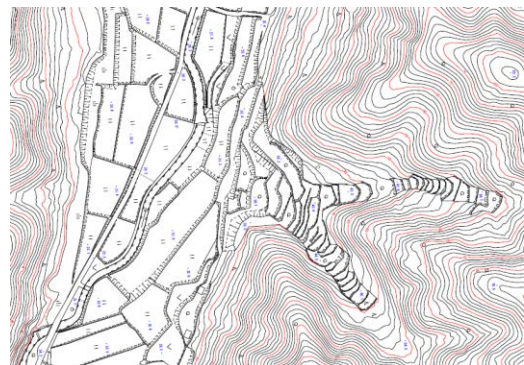


図-15 点検後の数値地形図

ステップ⑤：縦断面図・横断面図作成

「3次元点群を使用した断面図作成マニュアル

(案)」に準じて、グラウンドデータより縦断面図・横断面図の作成を行った。傾斜変換点の抽出画面を図-16に示す。

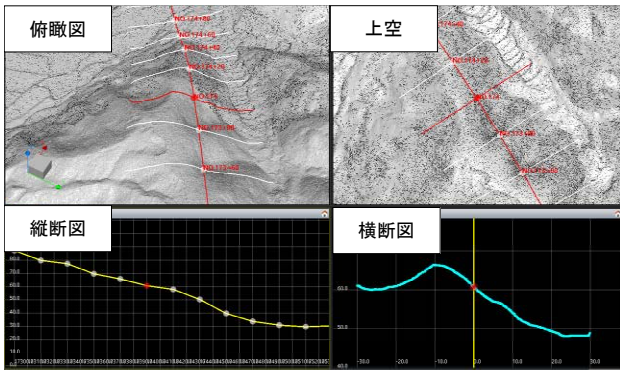


図-16 傾斜変換点の抽出画面

4. UAVレーザ測量の有用性

(1) 測量精度の検証

準則に準じた精度を確認した後、さらに自主的な精度検証を試みた。

(a) 数値地形図(平面図)の検証

数値地形図については、平地部で地上型レーザスキャナにより取得した点群との比較(図-17)及びUAV写真測量によるオルソ写真との比較(図-18)を実施した。目視確認した結果、いずれも数値地形図と一致していた。

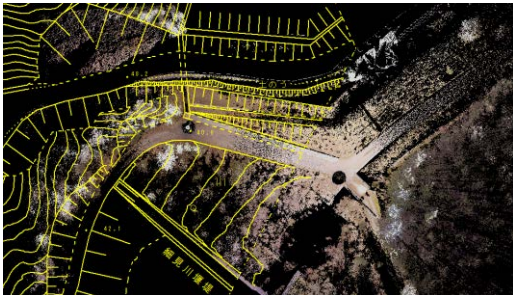


図-17 地上型レーザスキャナと数値地形図の比較



図-18 UAVオルソ写真と数値地形図の比較

(b) 縦断面図・横断面図の検証

縦断面図、横断面図はTS測量による実測と比較して検証した。横断面測量の較差の許容範囲(山地)は準則では $5\text{cm} + 15\text{cm}\sqrt{L/100}$ (L:測定距離)であることから、これを精度検証の目安とした。横断面図の検証は、4断面をTS測量により実測した。その後、横断面方向61~67mに対して、10点を断面ごとに抽出し、横断面図と比較した。標高の較差について結果を表-3に示す。

表-3 標高の較差

| No. | 断面幅 | 較差の平均値 | 許容範囲 |
|--------|--------|--------|--------|
| 156+20 | 66.89m | 0.063m | 0.172m |
| 157+20 | 66.89m | 0.094m | 0.172m |
| 161+20 | 61.06m | 0.114m | 0.167m |
| 161+60 | 61.30m | 0.099m | 0.177m |

10点の較差の平均値は許容範囲内である。TSとUAVレーザの横断面図の比較を図-19に示す。なお、縦断面図も較差の平均値は許容範囲内であった。

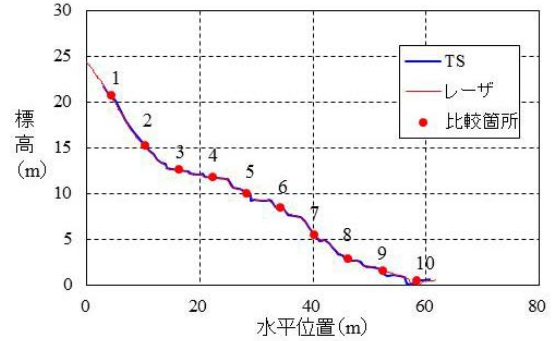


図-19 TSとUAVレーザの横断面図の比較(No.161+20)

(2) コスト・工程の検証

TS測量で外業159人・内業73人かかる作業を、UAVレーザ測量では、外業19.5人・内業81人に圧縮できた。一方で、機械経費が増えており、トータルコストは約1.1倍になっている。コストの比較結果を以下に示す。(図-20) 技術の進展により、機械経費が小さくなれば、今後大きくコストダウンできる可能性がある。また、測量結果を有効に活用できることで、測量業務の追加発注が減ることにつながれば、更なるコスト削減が期待できる。

工程としては、作業日数がTS測量と比べて外業が45日から1.5日、内業が45日から41日に短縮できた。(図-21)

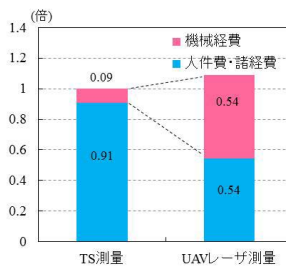


図-20 コストの比較結果

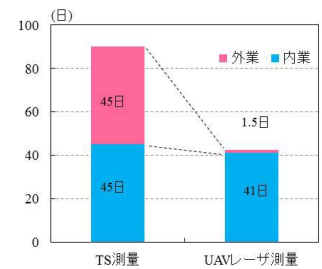


図-21 作業日数の比較結果

5. 地質調査や設計への活用について

測量の次工程である地質調査や設計における活用の状況を以下に示す。

(1) 地質調査

① 調査計画の精度向上

リニアメントや地すべり地帯などの地形判読を行う際に、3次元点群データを元にグリッドデータを再構成した。さらに、グリッドデータを元に、ウェーブレット解析図(地形の尾根、谷の区別が付きやすい図)を作成し、傾斜量図を乗算合成した微地形強調図を作成した。(図-22)

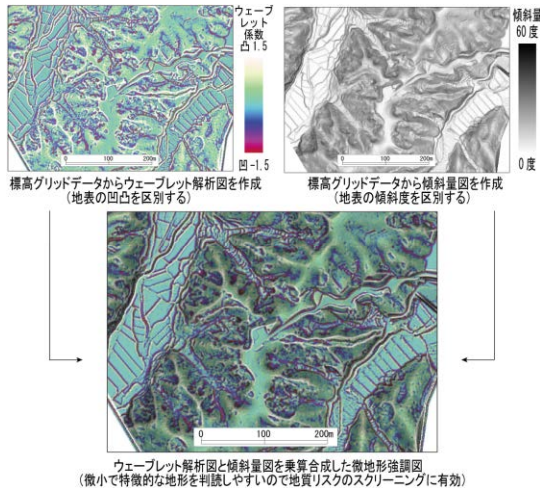


図-22 微地形強調図の作成

この図では微地形が強調されるため、地すべり・崩壊・浸食・リニアメントなどを明確に読むことができる。施工中や供用開始後に、問題を引き起こす素因の抽出に役立つことから、地質リスクを勘案したボーリング位置の選定が可能となる。3次元点群データの活用により、精度の高い調査計画が策定できた。

②活用を見送ったケース

地質の3次元モデル作成を検討したが、地質調査が全て完了していないことや、作成後の活用方法が明確でなかったことから、作成を見送った。

元々、地質の3次元モデルは不均質で不明確なものをモデル化するという難しさがある。複数のボーリング結果を元に、補完により地層のつながりを自動で図化するツールも存在するが、技術者の考えとは違う結果が出てしまう等、実用性には課題がある。入力やモデル化には相当な労力がかかるにも関わらず、自然の産物である地質をモデル化することは見込みや推定を多分に含んでしまう現実がある。さらに、地層の褶曲や断層などがあればそれを正確に表現するのは、困難であり、得られる効果が地盤の可視化だけでは、労力に対して効果が見合わない。

(2) 道路予備設計

①設計の精度向上

土石流危険渓流を通過する橋梁区間において、土石流の流下断面の照査を行った。航測図による地形図をベースとした検討では、渓流を改変しなくても桁下との比高差が1.6m確保できる(必要高さ1.1m)結果であったが、UAVレーザによる詳細な地形図を用いると地形が全体的に高くなり、掘削により流下断面の確保が必要という結果になった。(図-23)

ベースとなる地形の精度により、検討の結果は変わる。図-23を見ると、橋梁中心、上流側、下流側の各断面において微細な地形が明確になっており、グラウンドデータの活用により、従来よりも精度の高い設計が可能となった。

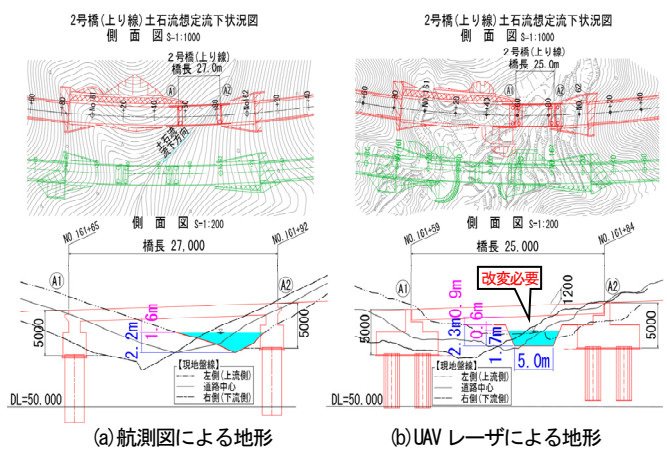


図-23 土石流危険渓流の検討結果

②設計作業の省力化

トンネル坑口の構造検討を行う際に、1Dの土かぶりを確保できる位置をトライアルで探す必要があった。従来は平面図からその都度、断面図を作成していた。今回は、グラウンドデータを用いることにより、任意の位置で簡易に断面図を作成できた。(図-24)今回、8箇所のトンネル坑口で1箇所あたり5~6断面の断面図を作成したが、グラウンドデータを活用した結果、約20時間程度の作業時間を短縮でき、設計作業の省力化につながった。

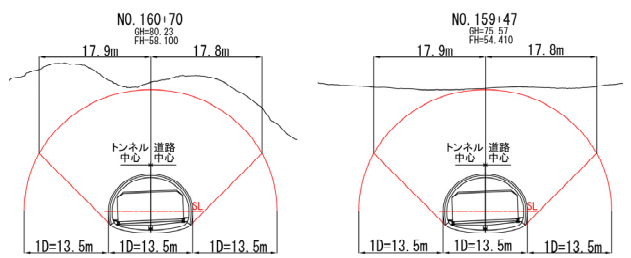


図-24 トンネル坑口の検討断面図の例

③受発注者間の合意形成の円滑化

景観検討では、フォトモンタージュをどのようなアングルで何カット作るか等、内容について打合せする際に、3次元点群データを利用した。イメージを図-25に示す。このように業務を進める上で、受注者と発注者の合意形成のツールとして活用した。

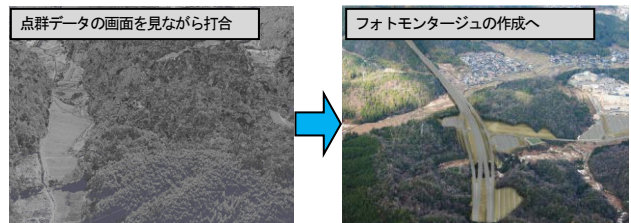


図-25 景観検討の内容決定イメージ

④積算の精度向上

CIMに用いるために、道路面や法面の3次元モデルを作成した。(図-26)今後、詳細設計、施工、維持管理と事業の段階が進むなかで、数量の算出や施工関連情報の入力などをするための基礎データとなるものである。

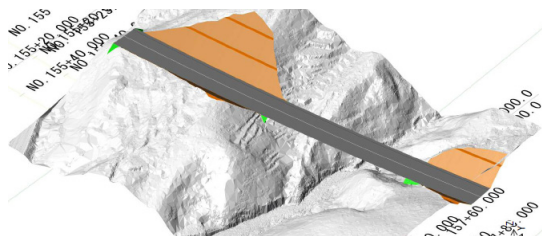
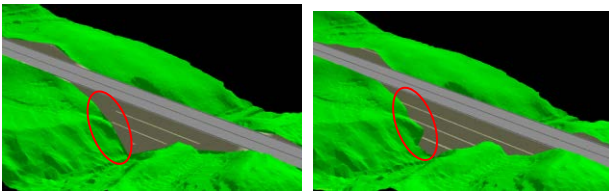


図-26 作成中の CIM モデル

今回、試行として、延長120mの盛土区間を仮想的に設定し、土量の算出を行った。(図-27) 従来の平均断面法(20mピッチ)と3次元モデルでの算出(1mピッチ)を比較した結果、平均断面法で31,700m³、3次元モデルで26,800m³となり、15%程度の差異が生じることが分かった。3次元モデルでは、地形の微細な起伏の影響を加味できるため、正確に数量を算出できた。



(a) 20m ピッチ

(b) 1m ピッチ

図-27 土量の試算に使用したモデル

⑤活用を見送ったケース

IC周辺に設置する大規模施設の位置を検討する際に、構造や概算工事費等を比較した。土工量の算出では、グラウンドデータと切土・盛土の3次元モデルを合成して算出することを検討したが、時間に制約があり、二次元の平均断面法で算出した。3次元モデル作成には、データ入力やチェックの手間がかかるため、短時間で確実な検討を行うには、慣れた方法を選択せざるを得なかった。ソフトウェアの操作性や技術者の熟練度も、発展途上であり、迅速性が求められるケースでは活用できていない現状が浮き彫りになった。

6. 課題と今後の展望

- (1) UAVレーザ測量は基準類が未整備である。整備されるまでは、精度の検証方法や成果の利用には、慎重かつ技術的な判断が必要となる。
- (2) 3次元モデルを利用した設計について、精通した技術者が少ない。データ入力に時間がかかること、照査のポイントが分からないことなどが原因で、活用が限定的となっている。発注者がリーダーシップを発揮して、発注者指定型のCIM試行事業を一層増やし、また、研修や勉強会を開催するなどの取り組みを進めることが、人材育成のために不可欠である。
- (3) 高精度であるがゆえに、3次元データの容量が大きい。そのため、作業や内容の照査を快適に行うには、受発注者のどちらも、初期投資としてハイスペックなPCが必要である。なお、今回のUAVレーザ測量のデータを利用するには、以下の動作環境が目安となる。

OS : Windows 10 Pro メモリ : 64GB
CPU : Intel Core i7 6900K 3.2GHz (8コア)
グラフィックボード : NVIDIA GTX1080

- (4) 地質調査、設計の分野では、3次元モデルの構築時に、データ入力や照査が容易にできるソフトウェアが十分に開発されていない。官民連携で開発を強化するとともに、利用者の利便性を考えると、仕様やインターフェースなどの統一が必要である。また、ブレークスルーとなるような新技術の開発が望まれる。
- (5) 地質の3次元モデルの活用効果は、明確ではない。3次元モデルを構築する労力に見合う活用効果を見いだし、いく必要がある。例えば、支持層のチェックを目的として、支持層のみサーフェスとしてモデル化を行うなど、利用する目的を明確にしなければならない。

7. おわりに

今回得られた知見を以下に示す。

- (1) UAVレーザ測量で作成した数値地形図(平面図)は、地図情報レベル1000の要求精度を満たしていた。
- (2) 3次元点群より作成した横断面図・縦断面図をTS測量と比較した結果、標高の較差の平均値は6cm~12cm程度であり、実用に耐えるものであった。
- (3) UAVレーザ測量を従来手法と比較すると、コストはトータルで1割増加し、工程は約半分短縮できた。
- (4) 精度の検証や成果の利用をどのように行うかが重要であり、技術的判断が求められる。また、UAVレーザ測量の基準類の早期確立が望まれる。
- (5) 測量の次工程である地質調査、設計の3次元モデル活用において、①調査計画の精度向上、②設計の精度向上、③設計の省力化、④合意形成の円滑化、⑤積算の精度向上、等の効果が確認できた。
- (6) 3次元モデル活用において、現場では、①精通した技術者が少ない、②ソフトおよびハードの環境が十分でない、③3次元地質モデルは活用の方向性が不明確、等の課題が見られた。対策として、人材育成やCIM試行事業の推進、技術開発、PC機器への初期投資、3次元モデルの目的の明確化などが必要である。

本報告では、UAVレーザ測量の有用性や活用の状況を検証した。一方で、2次元で設計した結果を元に、3次元モデルを構築するという、手段が目的になっているような現状が見られた。今後、i-ConstructionやCIMの推進による生産性革命を進めるには、官民が一体となって課題の解決に取り組むことが必要である。

謝辞：論文を作成するにあたり、ご協力いただきました塩見測量設計株式会社(UAVレーザ測量)、株式会社エイト日本技術開発(道路予備設計)、株式会社ウエスコ(地質調査)のご担当者様、また、関係各位に感謝いたします。