

# 4D 土工管理のマルチコプタ運用

## 土工管理の見える化

和田章三・田中正人・岡本直樹

土工管理に必要な地形情報処理の概要とそのツールである 3D-CAD の利用法として、岩盤表示・工事用道路設計・施工段階図 (4D) 等の作成例を簡単に紹介する。また、入力する地形情報の取得手段として、短時間に広域測量ができるマルチコプタによる航空写真測量が、経済性と取扱面においても利用可能レベルとなり 4D 土工管理に使えるようになったので、その導入例とその運用法を報告する。

キーワード：土工管理, 機械土工, 情報化施工, 地形情報処理, DTM, DEM, 3D-CAD, CIM, 写真測量, UAV, マルチコプタ

### 1. はじめに

近年、情報化施工が進展して締固め管理や仕上げ整形の他に、出来形検査への適用が始まっている。また、BIM の影響を受けて土木分野でも CIM 構築の取組みが始まった。このような背景により 3D-CAD が漸く土木業界にも普及し始めている。

土工用の 3D-CAD は、地形を扱うため TIN (Triangulated Irregular Network: 不整形三角網) によるモデリング技術が必要不可欠であるが、このような 3D-CAD は 4 半世紀前に既に輸入されていた。しかし、当時のパソコンでは能力不足で、グラフィックワークステーション (WS) を必要としたため、業界の一部でしか活用されなかった。

また、入力情報である地形の広域測量の方法として古くから航空写真測量があり、手軽な空撮手段としてラジコンヘリや気球、エンジンカイト等の利用が試みられてきたが、永らく決定打がなかった。ところが近年、安定飛行を容易に行えるマルチコプタ等の小型 UAV (無人航空機) に必要な要素技術が技術革新により廉価で入手でき、爆発的に普及が拡がり、空撮手段として各方面で利用されるようになった。

### 2. 地形情報処理

機械土工は自然地形を対象としているため、地形と地質等の空間情報の把握が重要となる。土工の施工計画においては、まず地形と地質を調べ、土量とその分布を把握してから土量配分計画を作成する。そのため

には、地形等を情報処理に適した DTM (Digital Terrain Model: 図-1) として数値化しておくとの作業展開が容易となる。

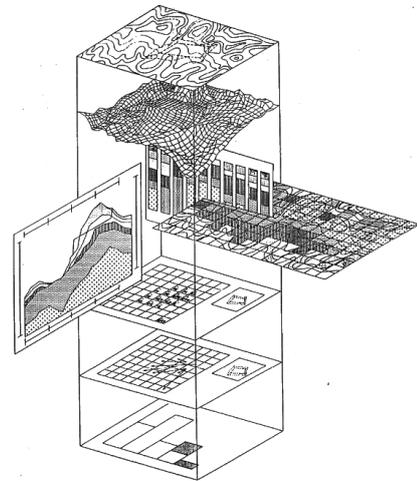


図-1 DTM の概念図<sup>1)</sup>

そのため 1980 年からパソコンを導入し、土量計算やマスカープ、線形計画法 (LP) による最適土量配分計画等を行ってきた。その頃扱える地形モデルは、図-2 の断面表示 (一次曲線) モデルやグリッド表示 (双一次曲面) モデルであった。1989 年にはグラフィック WS を導入し、いち早く 3D-CAD の利用を始めた。TIN モデルにより地形情報処理が飛躍的に向上し、細かな地形サーフェスを形成でき、スムーズシェーディング等で滑らかに地形を表現できるようになった。また、3D 道路設計が可能となり、工事用道路の設計や切盛展開図の作成に利用し始めた。

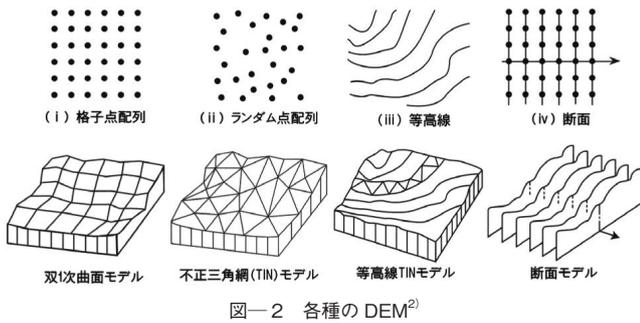


図-2 各種のDEM<sup>2)</sup>

(1) DEM

地形図を数値化するための一次地形情報には、等高線、断面図、格子点標高、ランダム点標高があり、数値標高モデル (DEM: digital Elevation Model) には図-2のようなものがある。パソコンでも TIN モデルの利用が2000年頃から可能となった。以下に3D-CADの利用例を示す。

(2) 岩盤面見える化

機械土工では、土砂・軟岩・硬岩等の土質別土量の把握が必要であるが、土質別のDEMデータがない場合には、ボーリングデータや弾性波探査結果から全体を推定するしかない。図-3上は、弾性波探査の層構造解析断面図である。図-3下は、弾性波探査の4測線に解析断面図をパネルダイアグラムのように挿入し、面内挿により計画盤より上の岩盤サーフェス、即ち掘削岩の形状をビジュアル化した例である。

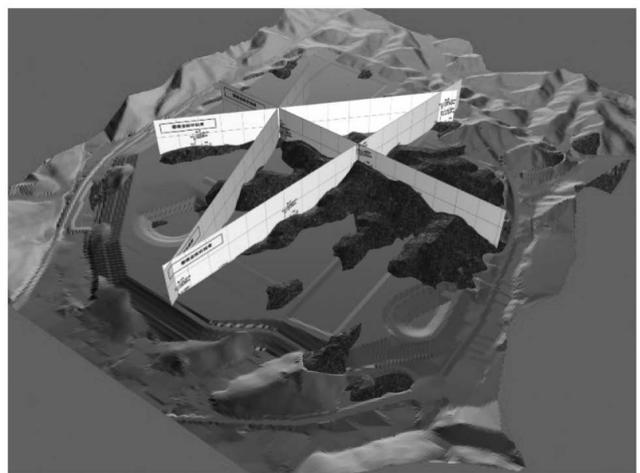
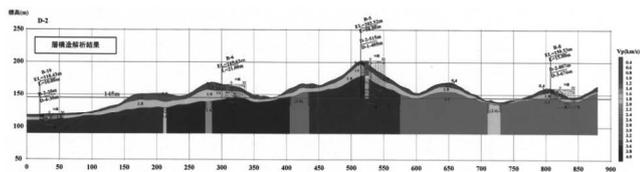


図-3 岩盤境界の推定<sup>1)</sup>

(3) 工事用道路の設計

土量配分計画では搬土経路を設定する。経路の線形は、土取場と盛場の空間的位置関係と地形、搬土機のパフォーマンス等を考慮して決定し、工事用道路の設計には、道路設用計3D-CADを用いる。図-4はグリッド表示の地形に工事用道路部分のみTINにレンダリングを掛けた例である。図-5はTINモデルに地形平面図をテクスチャマッピングで貼付けた例である。

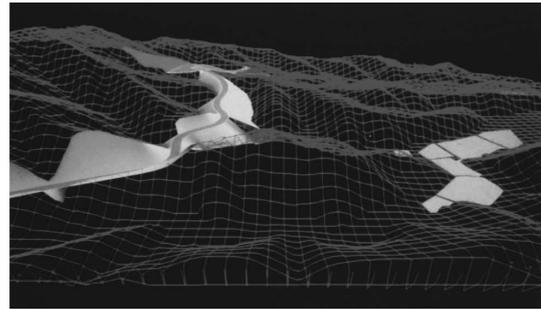


図-4 グリッド表示<sup>1)</sup>

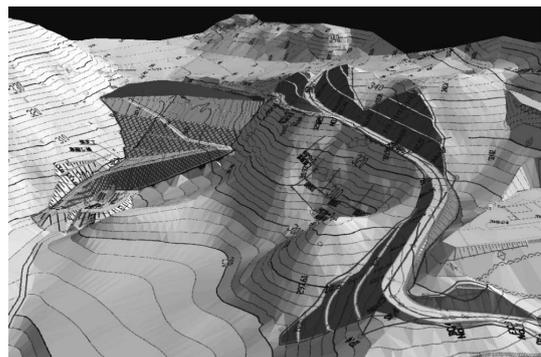


図-5 工事用道路設計の例

(4) 施工段階の見える化

施工計画では図-6のような施工段階図を作成し、可視化による切盛展開や取付道の検討を行い、関係者との打合せや作業の周知にも利用している。

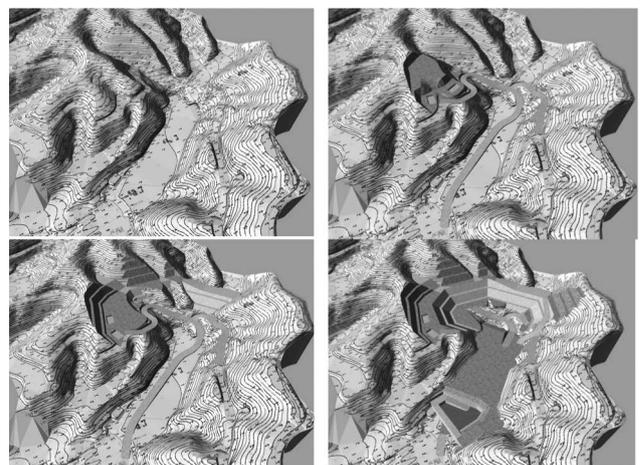


図-6 施工段階図

3D-CAD で作成した施工段階図は、自由な視点で俯瞰でき、ウォークスルー機能で自由に動き回ることができる。また、各施工段階図を時系列にコマ落しで表示すれば4D表示（アニメーション）となる。

図一六は処分場建設における施工段階の一部を例示したものである。

### (5) 機械配置

図一七のように建設機械を3Dモデリングしておけば、施工段階図にCG建設機械を配置して検討することも可能で、稼働アニメーション<sup>1),4)</sup>にも利用できる。



図一七 CG建機

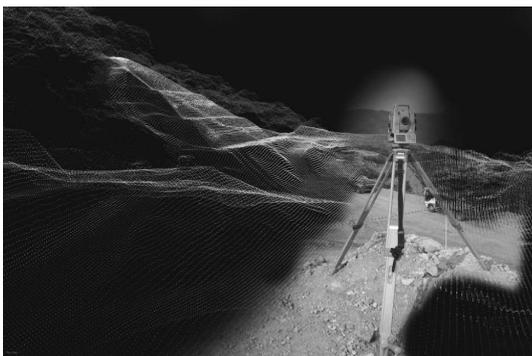
## 3. マルチコプタによる航空写真測量

### (1) 測量技術の近況

土工管理には地形を把握するための測量が必要であるが、トランシットからトータルステーション(TS)、GPS測量と測量機器の発達により省力化が図られてきた。更に3Dスキャナや写真測量の利用も拡大している。

3Dスキャナは、飛行型と地上型の機器があり、高価なレーザスキャナの他に、地上型ではスキャニング機能を持った廉価なノンプリTSが登場してきている。

そのため複数現場に導入して出来形管理に利用している。このノンプリTS(写真一1)は、設定エリア



写真一1 スキャニング機能付TS

を20点/秒で自動スキャンが可能である。

一方、写真測量にも地上型と飛行型があり、広域測量が可能な航空写真測量にUAVが利用できる。

近年、機動性に優れたUAVの低価格化と操作性向上により、各方面での利用が急速に進んでいる。UAVには固定翼と回転翼タイプがあるが、回転翼のマルチコプタの普及が目覚ましい。

### (2) マルチコプタ

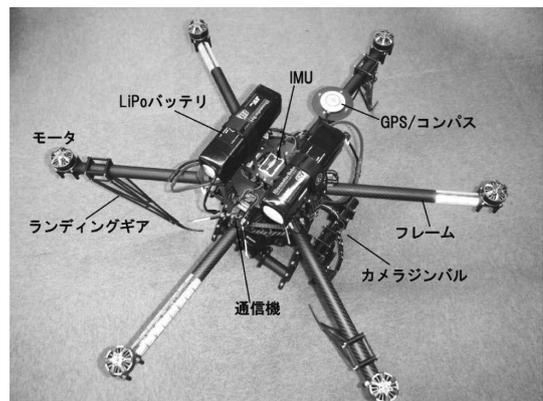
マルチコプタは、無線操縦ができるマルチロータヘリコプタのことである。放射線状に通常4~8つのロータブレードを配置し、回転方向の異なる差動推力を調整して飛行制御を行う。近年、産業用航空ビデオや写真撮影、教育・研究機関のツールとして急速に利用が進んでいる。ここでは、導入したマルチコプタによる航空写真測量システムの運用法を紹介する。

#### ① 機器構成

##### (a) 機体

機体は、Freefly Systems社製のCineStar6をベースとした6ロータブレードで、フレーム素材は超軽量の高強度ドライカーボンである。これに3点支持ランディングギアとカメラジンバルを装着している。制御装置はフレーム中央部に搭載し、その上部にリチウムポリマ電池2個を載せている。動力はダイレクトドライブのブラシレスモータを使用、従来のラジコンヘリコプタに比べてギヤボックスがないので、ロータの回転ノイズが小さく飛行音は静寂である。

機体質量は、本体3.6kg、バッテリー2個とカメラを装着すると7kg程度となる(写真一2)。



写真一2 機体構成

##### (b) 飛行制御システム

飛行制御システムは、DJI WooKong-Mを使用し、図一八のようなモジュール構成で、メインコントローラとGPS/コンパス、慣性計測装置(IMU)、パワーモニタリングユニット等から成っている。IMUは3

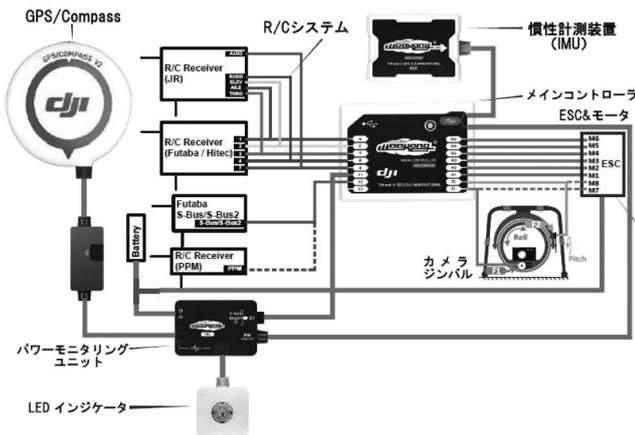


図-8 制御装置構成

軸ジャイロと3軸加速度センサ、気圧計を内蔵している。また、メインコントローラは、独自のフライト安定アルゴリズムに空撮用フライトアシスト機能、ジンバル安定化機能、位置保持機能や自動帰還機能を備えている。

### (c) 搭載カメラとジンバル (写真-3)

マルチコプタによるカメラ撮影は、機体の揺れや振動の影響を受けるので、振動対策としてカメラマウントに防振処理を施し、フローティング構造やジンバルコントローラによって機体の揺れの影響を最小限にしている。航空写真測量ではオルソ写真が目的なのでジンバルは2軸でよい。



写真-3 搭載カメラと2軸ジンバル

搭載カメラは、FXフォーマットデジタルカメラのニコンD600、画素数2400万画素で、f2.8の24mmレンズを装着し質量1,120gである。

カメラジンバルは、ベルトドライブ減速比5:1(ティルト&ロール)、フルアジャスタブル機構の2軸ジンバルである。WooKong-Mのジンバル安定化機能によりカメラの水平を保持する。

## ②飛行手順

### (a) 飛行計画

航空写真測量に必要な空撮は、自律飛行で行うた

め、飛行経路を決め、ラップ撮影のための飛行計画を立てる。測量範囲を決め、オーラップが縦70～80%・横40%位となるように撮影高度(70～100m)、撮影コースを設定し、標定基準点(座標既知点)を3点以上配置する。飛行速度は4m/s、撮影間隔は3秒を標準としている。また、バッテリー寿命による1フライトの飛行時間に制約があるため、滞空時間毎のフライト計画を作成する。地形図上の飛行計画を図-9に、Google Earth上での作成例を図-10に示す。

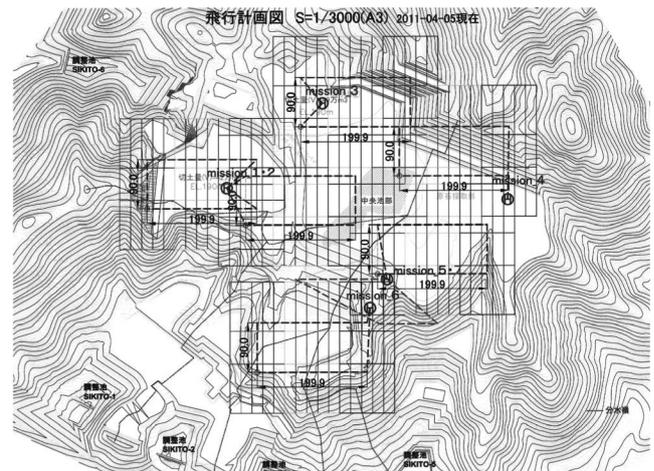


図-9 地形図上の飛行計画



図-10 Google Earth上の飛行計画図

### (b) 飛行経路入力と自律飛行

飛行経路のデータ入力は、PC上で自律飛行の設定を行う。設定要領は、PC上のGoogle Earthのマップ上に飛行経路地点と目的地、高度、移動速度等をポイントングして飛行ミッションを作成する。そして、現場でマルチコプタにデータ転送して実行指示を行えば、マルチコプタは自律飛行を開始する。マニュアル飛行では不可能な、正確な位置と高度を維持した飛行を行え、飛行誤差は高度誤差 $\pm 50$ cm、水平誤差 $\pm$

2 m 以内である。

機体と PC は飛行中もデータリンクで繋がっている  
ので、モニタリングが可能である。写真-4 は飛行  
中の画面で、飛行経路と現在位置を示し、左下に高度  
計や飛行姿勢等の計器類を表示している。データリンク  
の通信限界距離は 300 ~ 400 m である。

また、飛行は GPS による飛行制御が基本であるが、  
GPS 位置情報に太陽フレアが影響するので、飛行予  
定日の太陽活動を調べておく必要がある。



写真-6 飛行中のマルチコプタ

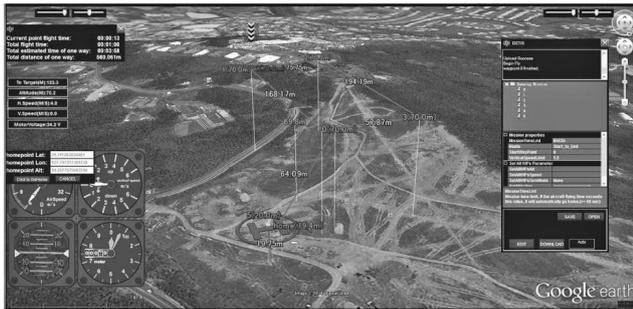


写真-4 飛行中のモニタリング

(c) プロポ操縦と飛行

飛行は離着陸を含め完全自律飛行が可能であるが、  
離着陸は突風等の突発事態に備えて、通常はマニユ  
アル操作で行う。飛行可能な風速は 8 m/s 以下である  
が、安全上 5 m/s までの飛行を心掛けている。また、  
1 フライトの滞空時間は 15 分程度であるが、安全を  
みて 8 分以内の飛行に押さえている。

プロポは周波数 2.4 GHz の 14 チャンネル双葉製を  
使用し、DJI 製のコントロールソフトを利用して制御  
している (写真-5)。



写真-5 離陸時のプロポ操縦

i) GPS 位置ホールド機能

このマルチコプタには、電子コンパス、気圧センサ、  
3 軸ジャイロ、GPS からの情報を制御するフライトコ  
ントローラを搭載していて、プロポの制御スティック  
を手から離しても、ホバーリングを自動保持する機能

がある (写真-6)。GPS 信号を優先し、GPS を受信  
できない状況では、電子コンパス、気圧センサ、3 軸  
ジャイロによる制御で高度と姿勢を維持することが可  
能である。

ii) フェールセーフ

本機は送信機からの指示で、離陸地点の上空に戻り  
自動着陸する自動帰還機能をもっている。また、フェ  
ールセーフ機能として、機体が送信機からの電波の受信  
不能事態や、搭載バッテリーの規定値の容量低下時にも  
自動帰還機能を作動できる。

iii) バッテリ管理

使用しているリチウムポリマ電池は、小型・軽量・  
大容量の特性を持っているが、取扱に注意が必要であ  
る。厳密な充電電圧・電流のセルバランス管理が行え



写真-7 充電器とバッテリーチェッカ

電圧(V)	25.10	23.50	23.37	23.23	23.10	23.01	22.90	22.80
残量(%)	98%	64%	60%	55%	50%	45%	40%	35%

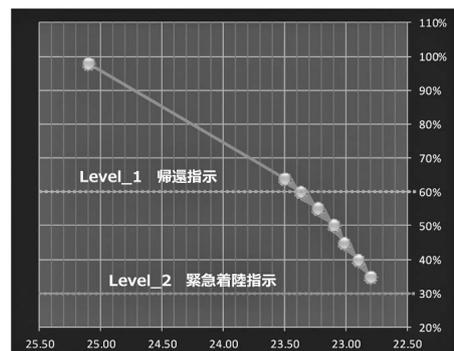


図-11 充電器とバッテリーチェッカ

る充電器（写真一7）を用いて、その都度厳密な管理を行う。飛行中のバッテリー電圧低下はPCのモニタに表示され、残量60%で帰還指示が、残量30%になると緊急着陸指示が出る。図一11に電圧低下と残容量との関係の実測値を示す。

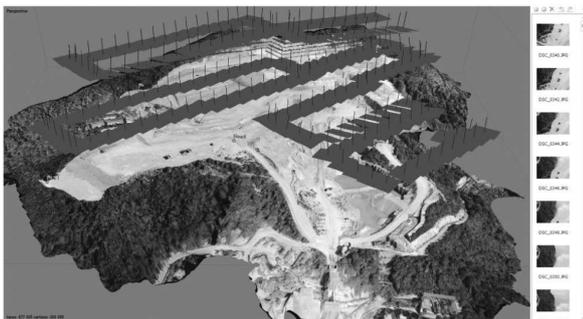
(d) トレーニング

飛行制御システムを実装しているため、高度な操縦技術がなくとも飛行可能である。しかし、安全飛行の観点からシステムに依存しない離着陸やホバーリング（対面を含む）操縦ができるようなスキルが必要である。トレーニングは段階的にシミュレータによる訓練から始め、小型実機（Fantom）による操縦訓練過程を終えてから本機の飛行訓練を行い、体で覚えた段階で実機飛行を開始する。

③写真測量

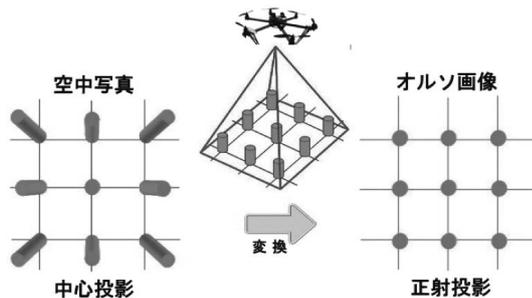
(a) 写真解析

撮影したラップ状の航空写真（図一12）は、写真測量ソフトウェアを使って解析を行う。従来のステレオ図化機等の画像解析装置は、高価で使いこなしが難しく専門知識を必要としたが、近年、操作が容易なソフトウェアが登場してきている。



図一12 空撮ポイント

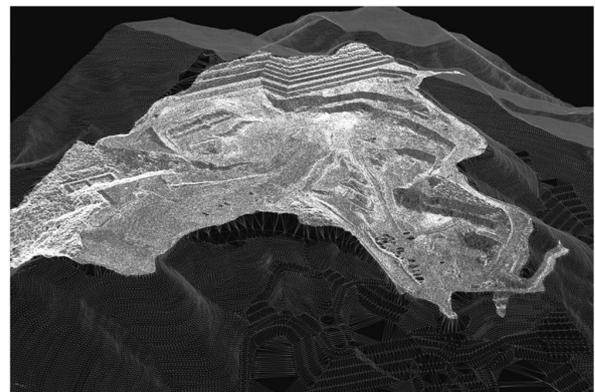
空中写真はレンズの中心に光束が集まる中心投影なので、画像の周縁部に歪みが生じる。オルソ画像は、標高データを用いて像の歪みをなくし、真上から見たような正射投影に変換して、位置情報を付加したものである（図一13）。



図一13 オルソ画像変換

標高データは、同じ場所を重複して撮影した隣接する2枚の空中写真を用いて、画像相関により取得するが、既存の標高データ等を利用して変換することも可能である。オルソ画像面上では、位置・面積・距離等を正確に計測することが可能である。

空中写真から自動標高抽出技術により数値地形モデルを作成し、これを用いて中心投影の空中写真を正射投影のオルソ画像に変換し、正しい位置情報を付与する。そして、複数のオルソ画像を接合（モザイク）して統合した一枚のオルソモザイク画像にする。次に3D点群データを抽出してポイントクラウドとし、ポイントを繋いでTINによる3Dポリゴンを作成して3Dモデル（図一14）とする。この表面にオルソモザイク画像をテクスチャとして貼付けるとオルソモザイク鳥瞰図（図一15）となる。



図一14 3Dポリゴン (TIN)



図一15 オルソモザイク鳥瞰図

(b) 出力形式

作成したモデルは、多くの出力フォーマットに対応し、Google Earth KMZ出力等ができる。また、Acrobatを3Dビューワとして利用できる。図一16, 17は、3Dモデルをpdf出力したもので、Acrobat上で自由に視点を動かすことができる。また、iPad等のiOS機器には、ply形式で出力するとMeshLab等で3D表示できる。

図一 16 3D モデルの Acrobat 出力例 (高速道路工事)<sup>3)</sup>

図一 17 3D モデルの Acrobat 出力例 (採石工事)

#### 4. おわりに

施工計画で施工段階図を作成し、切盛展開や取付道の検討を行うが、この作業に地形 3D-CAD を利用すると曖昧さがなくなり、早期により実際的な検討（フロントローディング）が行える。しかし、これらを活用するには使いこなすスキルが必要であるが、地形 3D-CAD オペレータが不足していて、弊社から客先に派遣している現場が幾つかある。

また、マルチコプタによる航空写真測量により、広域の出来形測量を迅速に行え、高精度な現況地形モデリングによる照査が行え、4D 土工管理や残工事の施

工計画の再検討に利用できるようになった。課題は滞空時間の向上であるが、有線飛行の試行も行われている。

その他に、施工法の検討には切盛や稼働機械のシミュレーション機能<sup>1), 4)</sup>が有効である。更に利用したい技術として VR/AR/MR（仮想現実感/拡張現実感/複合現実感）がある。まだコスト等の課題はあるが、様々な簡易な機器や低価格化が進んできているので利用開始の射程に入りつつある。

JICMA

#### 《参考文献》

- 1) 岡本：デジタルアースムービングによる施工計画，建設機械，日本工業出版，2009.11
- 2) 村井俊治：空間情報工学，日本測量協会，2002.8
- 3) 「土量算出の必須ツール」インフラ BIM 施工 3D 新時代，日刊建設通信新聞，2012.3.22
- 4) 岡本：専門工事業者による機械土工の施工計画，建設機械施工，JCMA，2013.9

#### 【筆者紹介】

和田 章三（わだ しょうぞう）  
山崎建設㈱  
建設事業本部  
執行役員技術部長



田中 正人（たなか まさひと）  
技術課長



岡本 直樹（おかもと なおき）

