#### 特集>>> 土工

# 近頃の土工技術

# デジタルアースムービング

# 岡本直樹

土工技術について、近頃使われている計画技術と施工技術の概要を紹介する。計画技術では、CIM を含めた地形情報処理と UAV による広域測量について概観し、施工技術では岩掘削・運搬・締固めに分けて、工法の種類とその適用性・能力等を概説する。更に ICT 技術の現状として、情報化施工、無人化施工、i-Construction と業界の対応、AHS、その他の自動化・ロボット化、フリート管理について海外の動向も含めて記し、最後に建機メーカのアライアンス動向を付記した。

**キーワード**:機械土工, DTM, DEM, CIM, UAV, ドローン, 岩掘削, 機種選定, シミュレーション, i-Construction, AHS

# 1. はじめに

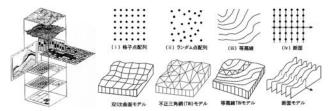
近年、土工に関連したドローンによる空撮測量やi-Construction 対応に業界が喧しい。i-Con 導入が目的なのではなく、i-Con は手段に過ぎない。i-Con の上辺だけを取入れるのではなく、土工計画から施工管理のプロセスに上手く取入れてこそ意義がある。本稿では最近の土工技術として、デジタルアースムービングを中心に話を進める。

# 2. 計画技術 1)

土工計画では、まず、原地形図と造成計画図の差分から土量計算を行い、土量分布を把握してから、最適な土量配分<sup>2)</sup>を行う。その際、地形図は DTM (Digital Terrain Model: 図—1) 化して作業を進める。次に搬土走路を設定して、距離別搬土量を求める。これらに組合せ機械を選定し、それぞれの機械能力計算から必要台数を求め、工程上で山積/山崩を行い機械投入計画を作成する。

#### (1) 地形情報処理 <sup>3), 4)</sup> と CIM

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)には図一2のようなものがある。レンダリングに適したTIN(Triangulated Irregular Network)によるモデリングがパソコンでも処理できるようになり、価格低



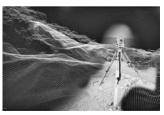
図―1 DTM の概念図

図-2 各種の DEM

下が進み普及が始まった。そして、CIM は 3D-CAD をベースに属性情報を付加したものとされるが、施工計画 (手順)を 4D で見える化して、詳細な事前検討 (フロントローディング) が行える。クラウドを利用すれば見える化の共有も可能である。

#### (2) UAV による広域測量 <sup>5), 6)</sup>

近年、自動測量技術として 3D レーザスキャナ、スキャニング機能付き TS (写真—1) や写真測量の利用が進んでいる。そして、UAV (ドローン:写真—2) と写真測量解析ソフトウェアが近年、革新的な性能 UP と価格破壊が行われ、一気に利便性が向上し、迅速な広域測量が廉価で可能となった。そのため広域地形測量の最有力な手段となり、i-Construction にも取



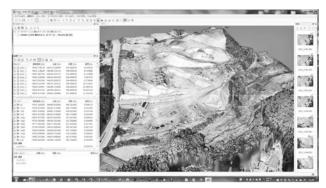
写真― 1 スキャニング機能付 TS



写真-2 離陸中の UAV



写真-3 UAV 飛行中のモニタリング



図一3 写真解析画面



図-4 3D 地形モデル出力例

入られ普及に拍車が掛かっている。また、最近はレーザスキャナの UAV 搭載(本号掲載: UAV 搭載レーザ計測システムの開発)も試行されている。

UAV は飛行計画に従って自律飛行を行い、連続的にラップ写真を撮ることができる。写真—3は UAV 飛行中のモニタリング画面である。図—3は、写真

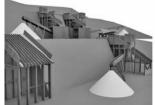




図-5 CG によるプラントと建機の配置

解析中の画面である。そして、図-4は 3D モデルの出力例である。本誌の表紙写真は、このモデルの視点を変えて、CG 建機を配置したものである。建機はモデリングして機械配置やグリズリ等のプラントレイアウトに利用できる(図-5)。また、アニメーション化 $^7$ も可能である。

# 3. 施工技術 8)

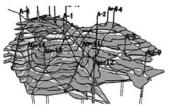
#### (1) 岩掘削

岩掘削では、岩分布の把握が必要となる。そして、 岩掘削は環境面から発破が制限されることが多く、特 殊発破としての制御発破や無発破工法の選定が問題と なるので、ここでは各種岩掘削工法の種類を紹介する。

# (a) 岩分布の見える化

岩数量が未定の場合、ボーリングデータや弾性波探査データから岩盤境界を推定して数量を算定する。図 — 6 は岩盤面を見える化した例で、図 — 7 は地質の垂直断面と水平断面を組合せて、3D パネルダイアグラムとしたものである。画面上で視点を自由に動かせ、地質内部構造を立体的に見える化できる。



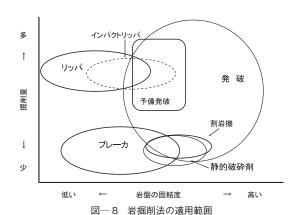


図―6 岩盤境界の見える化

図-7 3D パネルダイアグラム

# (b) 岩掘削工法の選定

一般的な岩掘削工法の適用範囲は概ね図―8のようになる。無発破工法の適用が増加し、大型ブレーカ(写真―4) や割岩機(図―9)、静的破砕剤がよく使われている。その他に低公害岩掘削技術には、図―10のようなものがある。大型バックホウ、ツインヘッダの掘削能力を図―11に示す。その他に近年、軟岩破砕の生産性向上を図ったエキセントリックリッパ(振動リッパ:図―12)が注目されている。



T A RESIBL OLDPREL RESIBL OLDPREL

写真―4 超大型ブレーカ

図-9 油圧割岩の手順

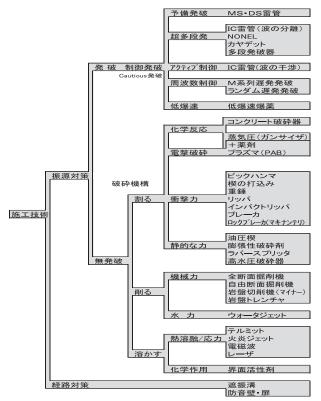
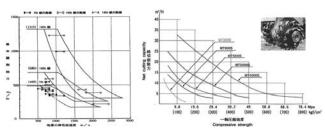


図-10 低公害掘削法の種類



図―11 大型バックホウとツインヘッダの掘削能力

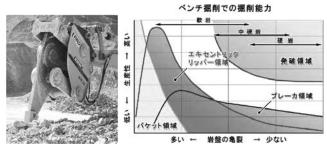


図-12 エキセントリックリッパと適用範囲

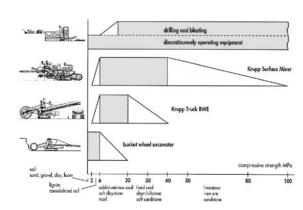
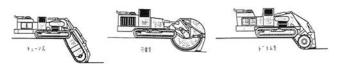


図-13 海外の大型連続掘削機の掘削性能



図―14 岩盤トレンチャの形式

また、参考として図― 13 に、海外の大型連続掘削機械の能力を示す。図― 14 は米国や英国で生産されている岩盤トレンチャで、我が国にも輸入されている。

#### (2) 走行・運搬技術

現行大型搬土機械の経済的搬土距離を図— 15 に示す。走行機械の選定では、その他にトラフィカビリティや登坂力・降坂能力を考慮する。登坂力と降坂能力は図— 16 のような牽引力曲線とブレーキ性能曲線から求める。これは後述の走行シミュレーションでも利用する。

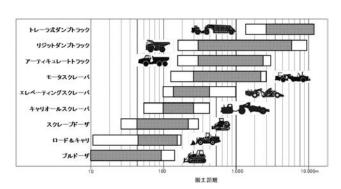
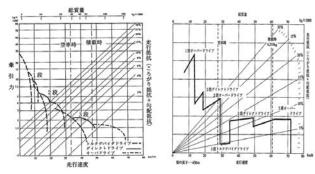


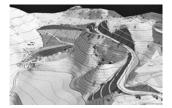
図-15 大型機の経済的搬土距離



図―16 牽引力とブレーキ性能曲線

原石山等への登坂可能なパイロット道の取付け検討や運搬工事用道路の設計<sup>9)</sup> は、3D-CAD で作図し、 CG 鳥瞰で表示する(図― 17, 18)。また、切盛展開 に合わせた取付道の検討にも利用できる。





図─ 17 パイロット取付検討

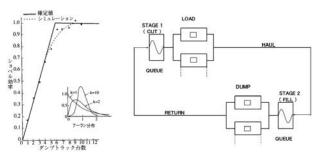
図-18 工事用道路設計の例

# (a) 走行シミュレーション

運搬機のサイクルタイムや作業量を高精度に求めるには、走行シミュレーションを利用する。図— 16 のような牽引力等を利用した走行シミュレーションは、CAT やコマツ、土木研究所、山﨑建設 100 が開発して利用している。

# (b) 待ち行列シミュレーション

複数台の運搬機を扱うシミュレーションでは、待ち行列型シミュレーションを行う。場内運搬では、積場と盛場の2ステージ循環型待ち行列(図—19)となるが、場外運搬の場合は交差点や離合箇所の待ち行列が問題となる(図—20)。



図―19 2ステージ循環型待ち行列型シミュレーション

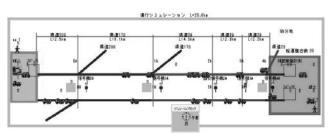


図-20 場外シミュレーション例

#### (c) 運搬管理と積載量

運行管理システムについては、従前、ノンストップ・トラックスケールや行先表示装置等が利用されたが、近年は GNSS 運行管理が一般的となっている。また、積載量は内部センサ計測が高精度になり、積込機にもオプションが用意されている。

#### (3)締固め

締固め機械では、従来の締固め機種に加え、2軸偏心垂直振動(図—21)やポリゴンドラム(写真—5)が生まれ、斜面用にクローラ駆動振動ローラ(写真—6)が造られている。そして、締固め法では新東名工事から厚層締固めが規定化され、近年は情報化施工による締固め回数管理や加速度応答法を用いた管理規定が利用されている。また、土木研究所では商品化されている機種の評価試験を実施している(本号掲載:加速度応答システムの適用性評価)。

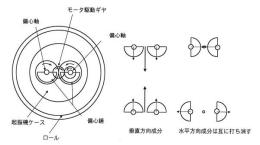


図-21 2 軸偏心垂直振動機構





写真―5 ポリゴンドラム

写真―6 クローラ駆動振動ローラ

#### 4. ICT 建機の現状

#### (1) 情報化施工

情報化施工は、設計図面(3D-CAD)と位置情報

(GNSS, TS)を付合せて、排土板やバケット等の作業装置を制御(MC, MG)して施工する技術である(図ー22)。出来形把握も可能で、出来形検査(TS)にも利用されている。MG(マシン・ガイダンス)やMC(マシン・コントロール)を採用する工事が増え、レンタル機器も増えた。最近の機種では、MCバックホウ(本号掲載:マシンコントロール機能を搭載した油圧ショベルの開発、本号掲載:セミオートマシンコントロールシステムを搭載した油圧ショベルの開発)やシュースリップを検知してブレードコントロールを行うインテリジェントブルドーザが登場している。そして、脱着等の取扱が容易になったシステムも現れ、新しい機種への装着も試みられている。しかし、情報化施工機器はまだ高価なのが難点である。価格低下と簡便性の向上が待たれる。

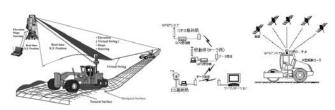
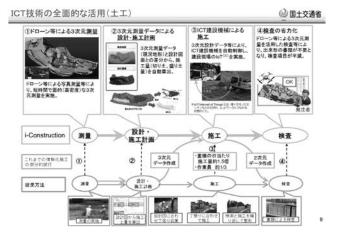


図-22 TS と GNSS の利用

# (2) 無人化施工(遠隔操作)

無人化施工は、人が立入ると危険な地区で遠隔操作により施工を行う方法である。平成6年の雲仙普賢岳における試験施工から研究が始まり、移動体映像伝送や各種通信技術が発展した。目視遠隔操作の第1世代、モニタ映像操作の第2世代、情報化施工技術を併用した第3世代、CAN(Controller Area Network)とLANを接続したネットワーク型遠隔操作の第4世代へと進化している。

# (3) i-Construction



図—23 i-Construction 構想

昨年11月に国交省が、i-Construction 構想(図—23)を打上げた。UAV写真測量技術を積極的に取り入れて、出来型管理を断面管理から面管理へ移行させる。そのために15もの新規の基準類や改訂を急速に整備し、情報化施工やCIM技術と統合して、一気呵成に情報化の加速を図ろうとしている。驚くほどのスピード感である。関連団体・企業等においてもi-Construction対応への組織改変が矢継ぎ早に発表されている。

#### (4) 業界の i-Con 対応

コマツは i-Construction に先んじて、スマートコンストラクション構想(図—24)を発表し、UAV 測量やインテリジェント建機を活用したクラウドサービス(KomConnect)を開始していた。

クラウドサービスは、Trimble の VisionLink(写真 — 8)が先行していたが、国内の認知度は低かった。ここに来て、i-Construction 対応も絡んで CAT-Jpn と連携(本号掲載:「機械の声を聞く」i-Constructionを含有した総合的建機ソリューションの提供:図—25)強化しての活動が活発化してきた。日立建機も VisionLink を利用するようだ。その他に Leica が iCONect(本号掲載「i-Construction における重機 ICT コミュニケーション」)を用意している。



図-24 Smart-Construction



写真― 7 サポートセンター

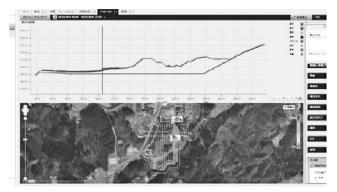
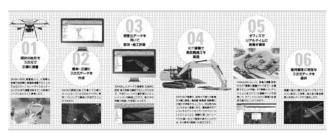


写真-8 VisionLink 画面



図─25 Cat Connect

# (5) AHS<sup>11), 12)</sup> (Autonomous Haulage System, 図—26)

AHS の研究は、1976年の小松の電磁誘導から始ま り、1990年に新 CAT 三菱開発のコーナキューブ位置 補正の90tDTの日鉄鉱業/鳥形山鉱山への導入があ る。1993年にはロボテック研究所がミリ波電波灯台 方式 14) の走行試験を行った。GPS 方式では、1994 年 に CAT がテキサスで試験走行を行い、MINExpo1996 ではアリゾナからのデモ走行を中継した。KOMATSU は、1995年から豪州で930E-AT4台によるテストを開 始し、2004年にはチリ Codelco 社の Radomiro Tomic 鉱山に投入(5台)した。2008年には、同社の新鉱山 Gabriela Mistral で AHS のみによる操業を開始し、 現在 18 台が稼働している (写真―9)。自動化に熱心 な Rio Tinto 社も 2008 年から West Angelas 鉱山に 5 台を試験導入し、その後、Yandicoogina、Nammuldi、 Hope Downs の各鉱山で 69 台が稼働し、150 台までの 増車が計画されている。一方、ライバルの BHP-Billion 社も Mt.Keith (アリゾナ) Navajo (New Mexco), Timbleba (豪州) の各鉱山に CAT の AHS を導入し.

Rioと同じく150台までの増車を予定している。今日, Google や自動車メーカ各社が争って開発中の自動運転技術は、DARPAのGrand Challenge 2004・2005, Urban Challenge (DUC) 2007 で基盤技術が生まれた。 CAT は、これらにスポンサ参加しており、MINExpo 2008 では DUC2007 で優勝した CMUの車両を展示し、Autonomousをテーマとしていた。CATのAHSは LiDARを搭載しており、これらの技術を導入しているものと思われる(写真一10)。また、CATは Fortescue 社の豪州 Solomon 鉱山にも納車しており、45台まで増車する予定である。日立建機も2013年から試験走行を豪州 Stanwell 社の Meandu 鉱山で始め (写真一11)、2017年の販売を目指している。

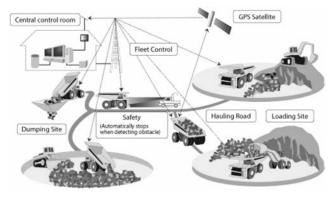


図-26 Autonomous Haulage System



写真-9 コマツの AHS



写真-10 CATのAHS



写真―11 日立建機の AHS



写真-12 ASIの Autonomous BD

# (6) その他の自動化・ロボット化 12), 13)

土工機械の作業装置系では、ブレードコントロール やバケットコントロールが古くから研究され、その成 果が情報化施工や無人化施工に取入られている。

米 ASI 社は、AHS の他にバックホウ、ブルドーザではリッピングやスロットドージング(写真-12)

等の自律化に取組んでいる。我が国でも施工自動化の試みが始まった。鹿島建設の A<sup>4</sup>CSEL では、敷均ブルドーザと振動ローラの自動運転に取組んでいて、ブルドーザは ICT 建機 D61PXi を利用して自律化を図っている。また、ブレーカによる小割作業の自動化では、T-iROBO-Breaker(大成建設)が登場した。その他に大林組が汎用遠隔操縦装置を開発し、災害用地盤探査ロボットを開発中(本号掲載:土工用建設ロボットの開発における新たな挑戦)である。

#### (7) フリート管理 FMS<sup>11), 12)</sup>

FMS: Fleet Management Systems は, 海外露天 掘り鉱山で利用されている建設機械群の管理システム で、Modular 社 (コマツ系), CAT, Wenco (日立建 機系)、Leica等が提供している。配車の最適化や意 思決定支援に利用され、クラウドと AI を利用したビッ グデータ処理の取組みも始まっている。海外大型鉱山 における建設機械は、維持修理費込みの販売契約 (FMC: Full Maintenance Contract) を建機メーカが 行っている。このため機械の保全管理システムを含む 稼働管理システムが必要となり, ソフトベンダを取込 んで運用し、配車・フリート管理サービスへと拡張し ている。資源需要・価格の低迷の中で、鉱山各社は積 極的に AHS 導入と FMS の機能アップによる生産性 と安全性の向上に取組んでいる。日本でも i-Con 絡み のクラウド経由で、類似サービスの一部が受けられる ようになりつつある。

# (8) 建機メーカのグローバルアライアンス

建機メーカの世界的合従連衡は留まることを知らない。Terex の鉱山部門を吸収した Bucyrus を CAT が買収し、ケーブルショベルや大型ブラストホールドリル、地下鉱山機器を入手し、O&K 系の超大型油圧ショベルと UnitRig の超大型電動ダンプも手に入れた。そして先頃、Komatsu が Joy Global 社の買収を発表  $^{15)}$  した。地下鉱山機器の他に P&H のケーブル機と世界最大の  $40 \, \mathrm{m}^3$  級ローダ(旧 LeTourneau)が手に入る。2 大建機メーカが更に巨大化して、地上と地下のアースムービング機を支配することになった。参考として、ケーブル機とコマツ PC8000(800 t 級油圧ショベル:左下)の大きさ比較を図— 27 に示す。

#### Size of Joy Global's Products

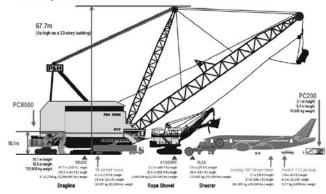


図-27 ケーブル機の大きさ比較 <sup>15)</sup>

# 5. おわりに

デジタルアースムービングは、IT技術として土工計画で進めていたが、UAV空撮測量データやICT建機のセンサ情報がクラウド経由でリンクされ、施工管理へ拡張されつつある。近い将来、更なるIoTとビッグデータ利用に拡大し、他業界で話題のAI技術も建機や意思決定支援に応用<sup>12)、13)</sup>されていくだろう。本稿では土工技術全般についてもう少し言及したかったが、紙幅の関係で断念した項目が多い。次の機会に記したい。

J C M A

#### 《参考文献》

- 1) 岡本,専門工事業者による施工計画,建設機械施工, '13.9
- 2) 岡本, 4章 土量配分計画, 環境土構造工学 (1), 電気書院, '06.4
- 3) 岡本, デジタルアースムービング, 建設の施工企画, '09.3
- 4) 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, '09.12
- 5) 岡本, 4D 土工管理のマルチコプタ運用, 建設機械施工, '14.4
- 6) 岡本, マルチコプタによる 4D 土工管理, 建設機械, '15.1
- 7) 岡本・田中:重機稼働アニメーションについて,第17回土木情報ジンポジウム講演集1992.10
- 8) 岡本,連載 土工機械の話 3~6,月刊土木施工 2009.9~12
- 9) 岡本, 工事用道路の設計と安全, 建設の施工企画, '08.7
- 10) 岡本,大下:搬土機械の走行シミュレーションにおける走行速度の合理的決定法,第9回建設マネジメント問題に関する研究発表・討論会 講演集、土木学会、91.12
- 11) 岡本,海外露天掘鉱山の情報化施工,建設機械,'09.11
- 12) 岡本, シンギュラリティ前夜の建設機械, 建設機械施工, '16.10
- 13) 岡本、建設機械のシンギュラリティ、建設機械施工、'15.12
- 14) 岡本, ミリ波を利用した遠隔監視制御システム, 建設ロボット・自動 化便覧, 先端建設技術センター, 1995
- 15) 大橋徹二, ジョイ・グローバル社の買収について, '16.7



[筆者紹介] 岡本 直樹 (おかもと なおき) 山﨑建設 ㈱ 技術顧問