

平成の土工機械

岡本直樹

1. はじめに

平成に入って、世紀の大土工と謳われた関西新空港工事の土砂搬出（加太，阪南）工事が元年～4年に実施された。新鋭135tダンプトラック（DT）が初めて導入され，その積込機として大型電気ショベル（マリオン191M，15m³：写真－1，P&H 2100）を採用，国内土木で最後のケーブル式ショベルとなった。また，77tDT用には新開発の大型油圧ショベルEX1800とPC1600が導入された。工事完了後，主力機械は日本企業が受注した香港新空港工事に転用され，新たな積込機としてDemag H285（300t，16m³，写真－2）が追加された。また，平成の始めに無人DTが新CAT三菱により鳥形山鉱山で開発されている。平成6年からは雲仙普賢岳の火砕流災害復旧のために無人化施工が始まり，その後の各地の災害復旧工事に導入された。バブル崩壊後は，民間大型造成工事が急減し，公共事業費も平成10年をピークに半減に向かい，ダム工事の中止等で大規模土工は激減して，重DTやモータスクレーパの稼働現場が姿を消した。需要低減に排ガス規制が重なり，重DTを始め多くの大型重機が退役した。そして，建機メーカーの撤退や合併・買収等の再編が加速した。エミッション低減では，平成3年に排出ガス対策型建設機械の指定制度が始まり，現在の厳しい4次規制に至って，使用する燃料油脂等も変化した。また，油圧ショベルやブルドーザの標準操作方式が普及し，平成7年のPL法（製造物責任法）により手摺やガード等の重機の安全装備が増設された。2000年代に入ると，鉱山開発の需要急拡大で世界的に大型機，ORタイヤの需給が逼迫，大型掘削機や大型DTの注文は数年待ちとなり，ORタイヤ不足も深刻となった。東日本大震災復興の高台移転工事やダム工事の復活で大規模土工が一時的に復活したが，移転が一段落して市場は再び縮小に向かっている。そうした中で，平成28年度よりi-Constructionによる生産性革命が始まり，ICT土工の高度化が加速されている。また，近年の土工機械は電子制御が高度化し，サービストールもアナライザ利用となり，ユーザによる修理は困難と

なっている。以下，平成時代の土工機械を振り返るが，グローバル時代の視点を加えて，土工機械と土工技術の変遷を概観する。尚，国内の案件は平成年で記し，海外事案は西暦を示した。



写真－1 Marion 191M



写真－2 Demag H285

2. 平成の土工機械（1989～）

(1) ショベル系掘削機

ショベル系は油圧式となって久しい。ケーブル式はクラムシェルが揚程に使われる程度で，ドラグラインも河川の砂利採取等で見掛けることはあるが，絶滅危惧種である。しかし，海外の露天掘鉱山ではケーブル式の超大型機が活躍している。表土剥ぎ用のストリッピングショベルは生産を止めたが，ウォーキングドラグラインは供給を続けている。ローディングショベルでも，超大型DTの積込ではケーブル式が優勢であるが，油圧式メーカー各社は800t級を投入してその牙城に迫っている。そして，O&Kを継承したCATは1200t級も試作している。

さて，世界の建設機械に占める油圧ショベルの割合は，ミニショベルを含めると今世紀に入って40%から60%に増加している。平成期の特徴を列記すると，超小旋回型油圧ショベルの普及と中型機への拡大，後方小旋回型の台頭，電子制御・情報化の進展，レンタル需要への対応，超大型化の進展と需要，環境対応（排出ガス・騒音・EMC障害等の低減，リサイクル），無人化施工，安全性の向上（シートベルト・キャブ防護・周囲監視カメラ等），多機能化・多用途化（アタッチメントや双腕式等）と標準仕様の設定，省エネ/低炭素化（ハイブリッド化・電動式・燃料電池・バイオ燃

料等), グローバル化(世界統一仕様・グローバルライアンス)等がある。

大型化では, 1997年/H9に独O&Kが初の800t級RH400(現在のCAT6090)を開発, Demag Komatsuも同級H655S(後のPC8000)を1999年/H11に発表, その後, Demag KomatsuはKomatsu Germanyとなった。日立は, 平成10年にEX5500(515t, 27m³)を, 800t級のEX8000(写真-3)は平成16年に開発した。また, 平成20年にはコマツが初のハイブリッド油圧ショベル(図-1)を発表, 旋回減速時の再生エネルギーをキャパシタに蓄電して, エンジン加速の電動アシストとする。日立建機とコベルコ建機, 住友重機も追従し, CATは独自の油圧回生を開発している。



写真-3 EX8000



図-1 Hybrid ショベル

(2) ローダ

油圧ショベルとの棲み分けが進み, 大型機は重ダンブ積込の需要があるが, 中・小型機は土木現場では見掛けなくなり, 碎石場等の機動性を求められる現場に追いやられている。機構的には, 走行ダンパ, オートマチックT/Mの普及, 油圧駆動HSTが中型機まで進み, オペ環境が向上(大型キャブ, ROPS, エアサスペンションシート), 電子制御も進化し, 大型機ではジョイスティックステアリング, コマンドコントロールステアリング, T/M操作のボタンやトグルスイッチを採用して, 腕力操縦から手首・指操作となる。また, 欧米では小型機のスキッドステア型が普及している。大型化では, 1992年/H4にLeTourneauがL-1800(DCモータ駆動, 25m³)を発表。翌年にCATが994(18m³)を開発, 東谷鉦山に初輸入。コマツは平成8年に13m³級WA900を開発, 平成11年にはWA1200(20m³: 写真-4)を発表した。1997年/H9発表のCAT992G(12.3m³)では, グレートアーム(シングル・リフトアーム)を採用。2000年/H12にはルターナが世界最大のローダL-2350(40m³: 写真-5)を発表, P&HブランドのJoy傘下を経て現在はコマツの傘下。ハイブリッドローダは, TCMが平成20年にL130(11m³)を開発したが量産には至らなく, 代わって日立建機がWZ220HYB-5B(3.4m³)を平成28年に市場投入した。



写真-4 コマツ WA1200



写真-5 LeT L2350

(3) ブルドーザ

駆動系は, 小型機で油圧駆動HSTが一般化, 38t級では油圧・機械駆動併用HMTのD155AXがあり, 海外では43t級のHSTドーザJohn Deere 1050Kに続いて, 70t級のLeibherr PR776(写真-6)が出現した。また, 電気駆動のD7EやD6XEも登場した。操向系では大型機でディファレンシャルステアリングが採用され, 操向レバーはジョイスティックに変化し, 電子制御のフィンガーコントロールが現れた。また, ラジエータを後方に配置し前方視認性を向上したスーパースラントノーズのD51PXをコマツが平成19年に開発。CATは, ローリングブッシュ・トラックの採用が始まった。大型化では平成4年に最大のD575A(129t: 写真-7)を発表している。



写真-6 Leibherr PR776



写真-7 コマツ D575A

(4) スクレーパ系

モータスクレーパ(MS)は, 宅地・工業団地・ゴルフ場等の造成工事で活躍したが, 丘陵地の開発が進み, 造成が急峻な地形に移るに従って, 急勾配となり岩掘削が増加した。岩現場でのMSによる岩積込時は, タイヤカットを起こすので駆動輪を回さず, プッシャの力だけで積込むが, それでも岩の荒れた土取場での走行はタイヤを傷める。高価なMSのタイヤ費の増大も避ける必要があった。そして, バブル崩壊後, スクレーパはMSも牽引式も売れなくなり, 国内でMSは姿を消し, 牽引式が僅かに動いている。スクレーパドーザも同様に日本車輛製造が生産を中止したが, 根強い人気があり, 昔からのユーザは程度の良い中古機を求め, 部品取用の機械を用意して, 老骨に鞭打って稼働維持に努めている。日車は製造を止めたが, 欧州ではメンク社消滅後, フルティガ社が製造を引継ぎ, 大型のSR3000等を開発し, 中国でも中型機のライセンス

生産が行われている。国内では、施工会社の Y 社が SR280 をディファレンシャルステアリング車に改造していたが、近年はディーゼル・エレクトリック方式の電気駆動型（写真—8）を開発して複数台を稼働させていて、自社用に 15 台程を揃えるようだ。

さて、海外でも MS の生産メーカは減少し、CAT くらいしか残っていない。一方、キャリオールの事情は大きく変化している。牽引式スクレーパは、海外でも主要建機メーカが製造から撤退してから久しいが、米国では近年、農機メーカ等からニッチ市場としての参入が増え、新しい市場を形成している。タイヤ式やおむすび形ゴムクローラ駆動の農耕トラクタが牽引し、スクレーパは先祖帰りして、グースネックやエジクタを廃した転倒式やタイヤを多輪化したものが多く、多連結牽引で運用している（写真—9）。



写真—8 電動メンク



写真—9 New スクレーパ

(5) ダンプトラック

閑空 I 期工事で 135tDT が使われた後、国内土木工事では、回送を考慮して 90tDT が限界となっている。しかし、鉱山向けでは、平成 8 年にコマツが 100tDT HD985 を開発、大規模鉱山（青梅・秋芳・津久見鉱山）に導入。平成 9 年に鳥形山鉱山が CAT 789B (177tDT) を初輸入、翌年に秋芳鉱山も導入。平成 14 年には青梅鉱山に CAT 793C (218tDT) を初輸入。翌年に鳥形山はコマツ 186tDT 730E (Haulpak 系電気駆動) を初輸入。そして、平成 20 年頃から日立建機とコマツが、開港した常陸那珂港隣接の新工場でマイニングトラックの国内生産を強化している。日立建機は国産 EH3500AC II を発表、22 年には 220 t 級 EH4000AC II を投入。コマツはピオリア工場製 150 t 級 530M の生産を HD1500 として新工場に移管した。

アーティキュレート型 (ADT) では、コマツが平成 13 年から自社開発の HM400 等に変更、CAT も 740 (36.3 t) 等の新 3 機種の入荷販売を開始した。一方、日立建機は平成 12 年から Bell から OEM 供給を受けていたが撤退した。クローラダンプでは、ゴムシュー不整地運搬車の HST 化、運転席・荷台の全旋回型が増えシャトル運転が一般的となる。

海外の大型化では、1995 年 /H7 に初の 300 米 Ton

(281 t) 超の HaulPak 930E（写真—10）を Komatsu-Dresser が開発、初の AC 電気駆動でもあり、ベストセラーとなる。2008 年 /H20 に米コマツとなって 360 米 TonDT 960E を、2016 年 /H28 には 400 米 TonDT 980E を発表した。CAT は、1998 年 /H10 に 350 米 TonDT の 797 を機械駆動で実現。2002 年 /H14 になると、CAT797B（写真—11）用の世界最大のタイヤ 59/80R63 XDR をミシュランが開発、400 米 Ton 時代を迎えることになる。このように、平成期は 2 軸リジッド型による超大型化が進んだ。



写真—10 930E



写真—11 797B

(6) 締固め機械

大型振動ローラが普及し、単純振動から水平振動や垂直振動、可変振幅型が開発され、ポリゴンドラム（写真—12）も生まれ、斜面用にクローラ駆動型（写真—13）が造られた。タンピングローラも振動型が一般的となった。そして、締固め法では第二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に加えて、加速度応答法を用いた管理規定が活用されている。



写真—12 ポリゴンドラム



写真—13 クローラ駆動振動ローラ

(7) モータグレーダ

グレーダは排ガス規制対応が遅れ、機種・生産量共に減少した。そして、三菱重工が事業をトルコ企業に売却し、国産機はコマツのみとなる。TS や GNSS の情報化施工機器の搭載が進む。また、CAT は 7.4 m グレーダ 24H（写真—14）を 1996 年 /H8 にマイニング市場に投入。そして、操向・作業操作を 2 本のジョイスティックに集約した M シリーズを 2006 年 /H18 に発表、その全輪駆動 AWD 型では前輪を油圧駆動



写真-14 CAT 24H



写真-15 コマツ GD405-7

としている。コマツはHST駆動の3.1 m級GD405-7試作機(写真-15)を平成31年に発表した。

(8) 連続システム

関空埋立工事Ⅰ・Ⅱ期の土取場(加太・阪南・岬)からの搬出に大型ベルコンシステムが設置された。平成元～3年の相馬中核工業団地Ⅱ期整地工事においては、ブルコンシステム(ラインコンベア+オートシフトコンベア+スプレッダの組合せ、3600 t/h)により工期20ヶ月で盛土を行う。平成8～11年の常陸那珂港北埠頭埋立工事では、国産のBWE4台(3200 m³/h × 2, 2000 m³/h × 2:写真-16)を投入、運搬能力8000 m³/hの連続運搬システム(トランスファワゴン、オートシフトブルコンベア、シフトブルコンベア、幹線コンベア、ラインコンベア、ウイングコンベア、スプレッダの総数29台、総延長7.5 km)を導入し、2500万 m³を3年間で埋立てた。平成14年の谷浜工事では、400万 m³をベルコン搬出。その後は、重工メーカーのベルコン事業からの撤退が目立つ。平成17年には、昭和39年から稼働していた須磨のベルトコンベア(延長14.5 km)が活動停止した。しかし、東日本大震災復興の陸前高田の高台移転工事では、気仙川を渡河するベルコンシステムを26年3月から翌年9月迄稼働させ、500万 m³を運んだ。一方、垂直コンベアでは、平成7年に垂直スライディング・コンベア(写真-17)を山崎建設が開発し、今井川地下調整池工事の立坑掘削に投入、立坑の掘下げに伴って、垂直コンベアもスライディング降下するものである。以後の立坑等の開削工事の掘削揚土に活躍した。



写真-16 常陸那珂港 K-700



写真-17 垂直コンベア

(9) 岩破碎

岩掘削では無発破工法の適用が増加し、大型ブレーカ、割岩機、静的破碎剤等が使われていたが、平成初期にガンサイザー(蒸気圧破碎)やサーフェスマイナ、インパクトリッパが登場した。サーフェスマイナは奥村組土木興業がWirtgen 3500SM(写真-18)等を国内で運用した。しかし、生産性に威力を発揮したインパクトリッパは生産を中止してしまった。そして、近年ではエキセントリックリッパ(写真-19)が話題となった。クラッシャでは、平成4年にコマツが小型自走式のガラパゴスBR60を開発、人気を博しシリーズ化して他社も追随している。

発破穿孔機では、環境面から大型プラストホールドリルの採用がなくなり、大型ベンチではφ100 mm、小規模ではφ70 mmの油圧クロラドリルが主流となる。また、ドリルメーカーも世界的再編が進み、海外では自動化の開発が進んでいる。20世紀最後の超大規模岩掘削土工となる香港新空港工事(1992年～)では、関西空港工事で使用した主力機械を山崎建設が転用。豪州式の発破を採用し、穿孔はDM-M2 × 3, DMM, T4 × 2を投入、大口径垂直多列発破、装薬は火薬屋がエマルジョン爆薬を専用ミキサ車で現地混合して装填、エアーバックも利用してノネルで起爆した。また、発破係数(火薬量)を多くして、根切、切崩ブルを必要とせず、機械を消耗させない。



写真-18 Wirtgen 3500SM

写真-19
エキセントリックリッパ

(10) 建機メーカーの再編(アライアンス)

平成に入ると国内外メーカーのフルライン化政策、日本油圧ショベルメーカーの現地化・OEM供給等のグローバルアライアンスが急速に進む。2000年代に中国が市場経済に仲間入りし、市場がアジア・北米・西欧の3極構造となって、世界統一仕様化、グローバル調達、為替リスク回避、製品の相互供給等により、規模拡大、コスト縮減を目指した新たなアライアンスが始まる。

マイニング部門での大型M&Aでは、90年代に日立建機がVMEを買収してEuclidを入手、TerexのO&K買収やコマツのDresserとDemagの買収もあつ

た。今世紀に入ると先の Terex のマイニング部門が Bucyrus に移り、その Bucyrus も CAT が丸ごと吸収した。更にコマツは Joy Global を買収して地下鉱山機器を揃えた。鉱山業界は過半を占める炭鉱開発が温暖化対策で下火になっているが、金属鉱山は坑内掘りが増加している。また、韓国の斗山 (Doosan) は、コマツに OEM 供給していた ADT の Moxy とスキッドステア型ローダで有名な米 Bobcat を買収した。国内でも社名変更や業務提携、吸収合併が進み、油谷重工はコベルコ建機に合併、IHI 建機を加藤製作所が吸収、TCM や KCM は日立建機が取込んだ。

3. ICT 土工技術

(1) 地形情報処理と CIM

TIN (不正三角網) 表示が可能な地形 3D-CAD は、平成初期には WS 上で動く海外製品しかなく、その利用は一部の専門土工業者が工事用道路設計や切盛展開図等に利用し、CG 鳥瞰図を作成していた程度である (図-2, 3)。その後、国産アプリも登場し、性能向上した PC で動き始めた。各社製品の互換性を確保するために、CALS/EC では CAD 標準フォーマット SXF を用意した。また、平成 17 年に「Google Earth」が公開され、地球規模での衛星写真と 3D マップの利用が一般化し、国土地理院の地形情報も Web 公開が進む。平成 24 年には CIM を国土交通省が提唱して運用が始まった。CIM は、3D-CAD に属性情報を付加し、4D・5D 化してフロントローディング (事前検討) が行える概念である。



図-2 CG 機械配置図



図-3 切盛展開図

(2) UAV による全域測量

2000 年代から自動測量技術として 3D レーザスキャナや写真測量の利用が進んでいる。そして、2010 年代に UAV (マルチコプタ) と写真測量解析ソフトウェア (写真-20) の革命的な性能 UP と価格破壊が進み、迅速な現場全域測量が廉価で可能となった。そのため現場地形測量の最有力な手段となり、i-Construction にも取入れられ普及が加速した。また、高価であるがレーザスキャナ搭載 UAV や浅い水面下を透過するグ



写真-20 UAV の自律飛行空撮と写真解析ソフト

リーンレーザも登場している。

(3) 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: 図-4) して施工する技術である。平成 12 年に情報化施工 (3D-MC) の実証試験が「小山市 R4 バイパス改良工事」で行われた。その後、MG (マシン・ガイダンス) や MC (マシン・コントロール) の採用工事が増え、レンタル機器も整った。出来形把握も可能で、出来形検査 (TS) にも利用されている。また、最近では MC バックホウやシュースリップを検知して高度なブレード操作を行う ICT ドーザが登場している。しかし、情報化施工機器はまだ高価なので、価格低下と簡便性の向上が待たれている。

盛土の締固め管理では、平成 10 年代に GPS を利用した管理要領を道路公団や国交省が規定化して運用を始めた。中部新空港や関空 2 期 2 次揚土工事では、空港島埋立に GPS ドーザ、GPS ローラによる厚層締固めと加速度応答法を用いた情報化施工を行った。また、平成 22 年に準天頂衛星「みちびき」が打上げられ、翌年に同衛星を用いた情報化施工実証試験を実施。平成 25 年には、TS による出来形管理技術 (土工) を直轄工事で使用原則化した。

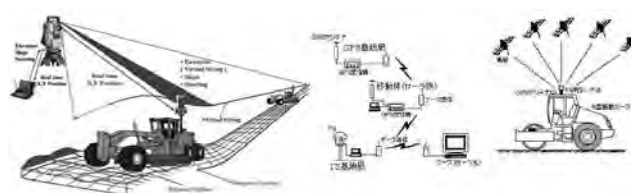


図-4 TS と GNSS 利用の情報化施工

(4) i-Construction

国交省が平成 28 年度から i-Construction (図-5) を推進。UAV 写真測量技術を取入れて、出来型管理を断面管理から面管理へ移行させ、新規の基準類や改訂を急速に整備し、情報化施工や CIM 技術を融合して、一気呵成に情報化の加速を図った。

業界の対応としては、コマツは i-Construction に先んじて、スマートコンストラクションを開始し、UAV や 3D レーザスキャナ、車載ステレオカメラ等から 3D 地形測量情報を得て、クラウド (KomConnect) で ICT 建機と連携、施工計画に連動させる構想で始めた。また、オープンイノベーションを進め、Skywatch, ZMP, GE, NVIDIA, OPTiM, カヤック、大学等と提携を進めている。クラウドサービスは、Trimble の VisionLink が先行して CAT と連携していたが、日立建機やコマツも利用を始めた。そして、コマツは自社の KomConnect を LANDLOG に切替えた。その他の測器メーカー等もクラウド処理の提供を始め、建機メーカーは機械情報のクラウドサービスを強化している。日立建機は平成 28 年に ConSite (ICT データレポートサービスの HP) を開設。トプコンは平成 29 年に評定点不要のドローン測量、点群データ一元処理 MAGNET College を発売した。そして、コマツは UAV 測量で測量ベンダーと提携してマンパワーの不足を補い、近頃は現場監督経験者の大量中途採用を行った。

併用した第 3 世代、CAN 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、近年は自律搬送機との組合せが行われている。また、平成 26 年に次世代社会インフラ用ロボット開発・導入の現場検証 (応急復旧) が行われ、平成 29 年から 5G による遠隔制御実証実験を各社が開始した。



写真-21 雲仙普賢岳無人化施工と PasoLink



図-5 i-Construction

(5) 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災害復旧の試験施工では、各社が 50 GHz 帯簡易無線 PasoLink を応用・工夫して移動体映像伝送や遠隔制御の方法で争った (写真-21)。翌年に水無川 1 号砂防ダムを無人化 RCC 工法で施工。平成 12 の有珠山噴火災害復旧工事や平成 13 年の三宅島噴火災害復旧工事においても活用され、その後も全国各地の災害復旧工事で活躍している。その間、移動体映像伝送や各種通信技術と施工法を発展させ、無人化施工技術を向上させた。無人化施工は目視遠隔操作の第 1 世代からモニタ映像操作の第 2 世代、情報化施工技術を

(6) AHS (Autonomous Haulage System)

無人 DT の研究は、1976 年の小松の電磁誘導から始まり、平成の初めに新 CAT 三菱が、内界センサによるデットレコニングとコーナキューブ補正による無人 DT を日鉄鉱業 / 鳥形山鉱山で開発した。平成 5 年にはロボテック研究所がミリ波電波灯台方式の走行試験を行っている。GPS 方式は、RTK-GPS の OnTheFly 化によって GPS 無人 DT の開発が始まる。CAT が 1994 年 / H6 に走行試験 (往復 3.7 km, 777C) をテキサスの採石場で開始。MINExpo1996 においてデモ走行を中継する。コマツは 1995 年から豪州で 930E-AT 4 台によるテストを開始し、2004 年にチリの鉱山に投入 (5 台) した。2008 年には同社の新鉱山で AHS (図-6) のみによる操作を開始し、自動化に熱心な Rio Tinto 社も試験導入し、その後、各地の鉱山に投入して 150 台までの増車を計画した。一方、ライバルの BHP-Billion 社も北米や豪州の各鉱山に CAT の AHS (写真-22) を導入し、Rio と同じく 150 台までの増車を予定した。今日、Google や自動車メーカー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 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、CAT の AHS は自動運転車と同様の LiDAR を搭載している。日立建機も 2013 年から試験走行を豪

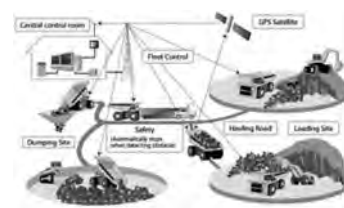


図-6 コマツの AHS 全体図



写真-22 CAT の AHS



写真-23 コマツとVolvoのキャブレスDT

州の鉱山で始めた。現在、北米・南米・豪州の各地で数百台のAHSが稼働している。そして、コマツがキャブレス無人ダンプをMINExpo2016で発表し、Volvoは既にフリート走行を試験中である（写真-23）。

(7) フリート管理 FMS

運行管理は平成に入ってGPSが利用できるようになり、各社で運行モニタシステムが開発されたが、近年はスマートフォンを用いたGNSS運行管理システムの利用が多い。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。そして、土工機械の稼働情報は2000年頃から各社がe-ServiceやKOMTRAX、ProductLink等でサーバに吸上げ、一部をユーザに提供している。

海外露天掘り鉱山では、FMS (Fleet Management Systems) が利用されている。これは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等が提供していて、配車の最適化や意思決定支援を行う。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) を建機メーカーが行っているため、保全・稼働管理システムを運用し、配車・フリート管理サービスへと拡張している。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った。

(8) その他の自動化・ロボット化

近年の自動運転車の研究では、LiDARや画像が重要なセンサとなっている。土工機械では、1993/H5にカーネギメロン大ロボット研究所が自動積込バックホウを発表した。2基のレーザスキャナレンジファインダを搭載し、掘削材とダンプの形状を認識して自動積込を行っている。国内でも後年、土木研究所が同様なシステムを研究している。また、平成16年から中型ローダでの自動積込試験が産総研で行われ、近年はバックホウの自律積込みの研究が各社で始まり、コマツ、大成建設、フジタ、大林組、鹿島建設等が取り組んでいる。人の検知、掘削対象・ダンプの形状認識にカメラとLiDARを利用して、AIに判断させていて、

自動運転車開発の技術成果が利用できている。その他には、クローラダンプやブレイカの自動化も行われている。また、米ASI社ではAHSやバックホウの他に、ブルドーザのリッピングやスロットドージング等の自律化に取り組んでいる。組合せシステムとしては、鹿島建設のA⁴CSELが敷均ブルと振動ローラ、DTの組合せの自動化を進めていて、台形CSGダムへの本格導入を予定している。また、AI画像認識により、重機全体の動きと作業の識別と分析を行って施工計画にフィードバックする研究も始まっている。

(9) 今後

ビッグデータ処理とAIが土工機械の自律化研究を加速させている。現在は熟練オペの動作を真似、画像やLiDARによる人・物体検知の精度向上の段階である。次のステップとして、土質・地質の認識や施工計画への取組みが求められる。地質認識の取組みは、平成28年から安藤ハザマがTN切羽のAI地質自動評価を行っていて、明かり工事への展開が望まれる。

AIの施工計画への活用としては、数理計画手法の応用と利用高度化が求められ、土工計画の各段階（土量配分、経路設定、機種選定、能力算定、機械投入の山積・山崩等）での高度化が求められる。近年、土工計画における数理計画手法の応用研究は低調になっているが、AIブームで数理が再注目されているので、この方面も活性化が進むだろう。

また、AIに加えて次世代の要素技術5GとxR技術が取込まれる。これから5Gの普及が、稼働データ/ビッグデータ収集を加速し、遠隔操縦も高度化でき、高解像画像や制御等を遅延なく利用できるようになる。テレグジスタンス技術が漸く実用化段階に入りそうである。5Gテレワークを利用してオペレータは自宅勤務で建機を操作、仕事も選べ、世界中の現場で活躍できる。パートタイムで運転を入替ることも可能となる。また、神業を持ったベテランオペレータが難しい局面だけ運転操作を肩代わりすることもできる。昔は積込の神様とかブルの神様がいたもので、著者も難しい作業で時々現場指導に来た神様に助けられたことがある。そして、運転席はレンタルも利用でき、腕はAIが判定して技能登録される。熟練オペの操作(動作分析)をビッグデータとして蓄積、メーカーがノウハウをどんどん吸上げる。CATが国際的な競技会“Cat Operator Challenge”を今更のように開くが、最高の熟練オペ操作のデータ化が開催動機であろう。また、海外ではVolvoとエリクソンが5Gで組み、三一重工と華為技術が建機のスマート化で戦略提携する等の情

報もある。

次にxR (VR, AR, MR, SR, RR等)技術である。iPhoneが平成19年に登場し、スマホや電子タブレットが建設業でも重要なモバイル端末となって活用されているが、xR端末は3D世界に没入できる次世代のデジタルプラットフォームとなる。ARによりスマートグラスやヘルメット装着バイザに情報や指示を表示すると、現地踏査・施工計画作成・施工・維持監理の各段階で、設計図書情報やデータベース上の関連情報を参照できる。また、現場の疑問は、AIが先輩のノウハウや文献データベース等からの的確に答えてくれる。コマツは「ホロジオラマ」と「ランドレポート」のコンセプトモデルを試作して試考しているようだ。

そして、Digital Twinにおける機械土工である。リアルを3Dで複製したDigital Twinの構築が工場や都市において進められていて、国交省は列島のDigital Twin化に取組み、地球規模でもそれは進むだろう。3D世界に没入でき、未来や過去に行き来できる4D世界でもある。空間と時間を飛び越えた異次元空間での施工が可能となり、鏡の国Digital Twinは究極のBIM/CIMとなる。仮想空間で建設機械を動かせるシミュレーションやアセスメントが容易となるが、複合現実MRではリアルとの同期・非同期が行え、仮想体験においてサイバー空間とリアルの区別が付かなくなる。また、デジタルツインの世界でも立入制限があり、不正侵入、サイバー攻撃・乗っ取り等へのセキュリティ対策強化も求められる。

4. おわりに

近頃、データ駆動型経済やデータ資本主義が叫ばれていて、データはヒト・モノ・カネに次ぐ第4の資本と言われている。AIを毎秒賢くするデータ(data training)、このデータが機械学習のアルゴリズムの燃料となる。機械土工もデータ駆動型のDigital Earthmovingが進むことになるだろう。データは施工により生成される。データ収集で先行して、他社に先駆けたデジタル化が優位性を決め、施工データのプラットフォームが覇者となる。従って、現場内の移動センサ、即ちセンサ搭載建機を運用して、データ収集システムを構築している建機メーカーが圧倒的に優位に見えるが、AIベンダーやゼネコンにも勝機はある。データ駆動型アルゴリズムは、自らの分析結果を基に

精度を上げ、更なるデータを生み出す好循環を生む。しかし、施工データの独占は許されないので、施工データのオープン化とその取引所設置が課題となる。土工機械のユーザはお人好しで、稼働データを一方的に吸上げられるままで、メーカーは一部データの還元でお茶を濁しているが、Open Prevailな企業にユーザは寄添うようになるだろう。

さて、高齢化・建設労働者の減少で生産性の変革が求められ、ICT土工への期待は大きい。土工機械の市場規模は自動車のマーケットより遙かに小さいので、自動化への資本投下が少ない。しかし、自動運転技術の成果がこれからも利用できる利点があり、5GやxR技術も活用できる。AIは各国で、深層学習以外にTrueNorth等のニューロチップの研究に取り組んでいるが、際立った成果が出ていない。この成果を得られると新しいイノベーションとして自動化にも大きく貢献するだろう。しかし、当面の自動化は遠隔操作と自律機械の組合せとなり、人と機械の協働となる。そして更に自動化が進めば、専門工事業者は不要となり業態は大きく変わることになる。そのパラダイムシフトを見据えた展望を持つことが、業界人の課題となっている。

《参考文献》

- 1) 建設機械化の50年, JCMA, '99.5
- 2) 日本建設機械要覧, JCMA, '01 ~
- 3) 岡本: 大規模土工の近未来風景, 建設の機械化, '03.1
- 4) 岡本: 土工機械のあゆみと近況, 建設の施工企画, '05.9
- 5) 岡本: 土工機械とユーザーニーズ, 建設の施工企画, '07.1
- 6) 岡本: 建設機械の歴史, 建設の施工企画, '08.1
- 7) 岡本: デジタルアースムービング, 建設の施工企画, '09.3
- 8) 岡本: 連載 土工機械の話 1~6, 土木施工, '09.7~12
- 9) 岡本: 海外露天掘削山の情報化施工, 建設機械, '09.11
- 10) 岡本: 専門工事業者による施工計画, 建設機械施工, '13.9
- 11) 岡本: 4D 土工管理のマルチコプタ運用, 建設機械施工, '14.4
- 12) 岡本: 建設機械のシンギュラリティ, 建設機械施工, '15.12
- 13) 岡本: 近頃の土工技術, 建設機械施工, '16.11
- 14) 岡部, 杉山: 油圧ショベル大全, 日本工業出版, '17.3
- 15) 岡本: 土工の情報化史, 建設機械施工, '18.7
- 16) 岡本: 重ダンプトラックの変遷史, 建設機械施工, '19.1
- 17) 岡本: 土工のあゆみ, 建設機械施工, '19.3
- 18) 登録機械土工基幹技能者テキスト改訂5版, JEMCA, '19.5
- 19) 岡本: C4IにみるICT施工の未来, 建設機械施工, '19.7
- 20) Kevin Kelly, Mirror world, Wired, '19.7
- 21) 土工教室 / <http://hw001.spaaqs.ne.jp/geomover/index.htm>

【筆者紹介】

岡本 直樹 (おかもと なおき)
(一社)日本機械土工協会

