

大規模土工の近未来風景

—高度情報化施工への夢—

岡本直樹

専門工事業者として大規模土工を直接指揮し、さまざまな工事の施工計画立案に携わってきた。また、情報化や自動化の研究にも取組む機会を得た。これらの経験を踏まえ、土工機械のエンドユーザとしての永年の夢や願望を近未来の風景として描いた。そして、この描写の背景として情報化・自動化の技術水準の現状を海外の事例も含めて紹介する。

キーワード：機械土工、情報化施工、無人化施工、自動化、群制御、遠隔施工、IT

1. はじめに

建設機械の発達史を俯瞰すると、牛馬や道具の類を利用してに過ぎない古代以来の建設作業に、漸く19世紀になってスチームエンジンを搭載したトラクタが出現した。そして、内燃機関の発明と共に建設機械の躍進が始まり、トルクコンバータ、油圧機器等の進歩と共に目覚ましい発展を遂げてきた。

我が国における建設機械の導入は、明治3年安治川の河川改修工事を嚆矢とする。以降、淀川、利根川、信濃川等の全国の河川改修に浚渫船、ラダーエクスカベータ、機関車、トロ等が輸入され、機械化を推進したが、その後の大恐慌による失業対策から機械化は中断された。

第二次大戦後、進駐軍とともにブルドーザやスクレーパがやって来た。それは、戦後復興に伴う御母衣ダム、

九頭竜ダム等の電源開発や名神高速道路から始まる高速道路時代の到来と共に、機械化の新しい曙となり、高度成長と共に飛躍的に普及、発展して今日に至っている。その間、機械は大型化、油圧化、タイヤ化を進め、1980年代からはエレクトロニクス技術を融合したメカトロニクス化が進行し、自動化、情報化を推進する新しい技術革新が始まった(図-1)。

2. 近未来の風景

ここはロックフィルダム工事現場の管制室である。プロットティングボードの地形図上に重機群の動態(マヌーバ)が点滅表示している。各土工機械は自律機能をもった無人機械で、無線LANによるデータリンクで情報を共有し、管制コンピュータとマルチエージェントシステムを構成している。1種情報化施工技士の資格を持つ群管理者が、意志決定支援システムの分析を参考に全体最適化を監視し、指令を発している。

土取場、盛場等の要所には群を監視するフォアマン(2種情報化施工技士)が配置されている。土工事は繰返し作業が中心で自動化に適している面もあるが、完全自動化には至ってなく、マンマシンシステムとして人間の判断に頼る部分はまだ多い。

原石山のベンチフロアを歩いている時、ヘルメット内蔵ホーンの接近警報でふり返ると100t無人ダンプが静かに目の前を通り過ぎた。燃料電池車なので、排気ガスのない静粛な無公害車である。原石山の作業でも、一人のフォアマンが監視している。土工機械は、ある程度の判断機能を持った自律機械である。しかし、難しい状況の変化にはフォアマンが対処する。場合によっては自ら操作して作業やティーチングを行う。

フォアマンのヘルメットにはディスプレイや無線

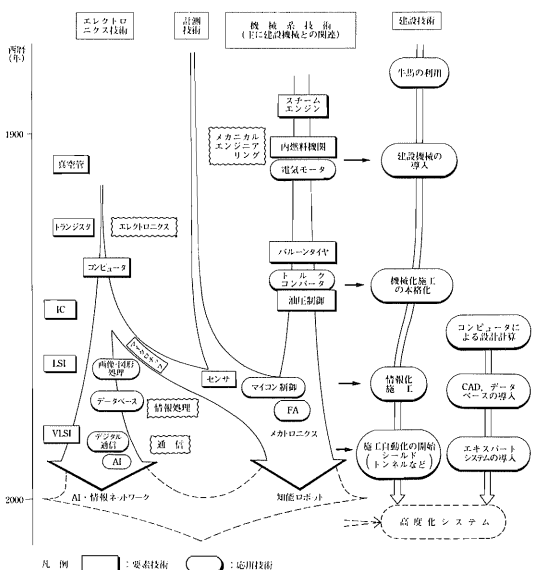
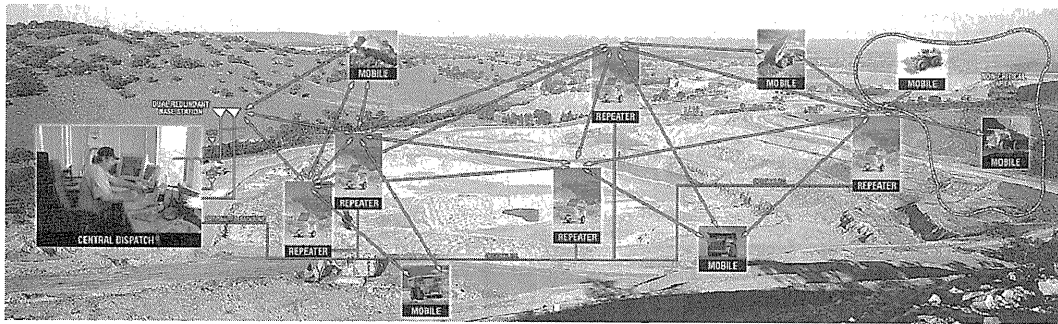


図-1 建設機械の進化¹⁾

凡例 □: 要素技術 ○: 応用技術



写真—1 無線 LAN MasterLink

LAN が内蔵（ウェアラブルコンピュータ）され、必要な情報（図面、データ、映像等）は、データリンクにより管制センターや各機械から取得できる。ヘルメット内蔵のバイザーを降ろすとバイザーディスプレイに情報が表示される。現場の要所や各機械搭載カメラの映像や稼働データも瞬時に参照でき、ズーム・パン等の遠隔操作も自在である。

積み場では無人ローディングショベルがダンプに積み込みを行っている。画像認識によりダンプトラックと材料の状態を識別して積込んでいる。

発破はコンピュータが指示する発破パターンに基づいて、レーザ穿孔を行う。融解速度から岩層を解析して、装薬時のデッキチャージに反映する。

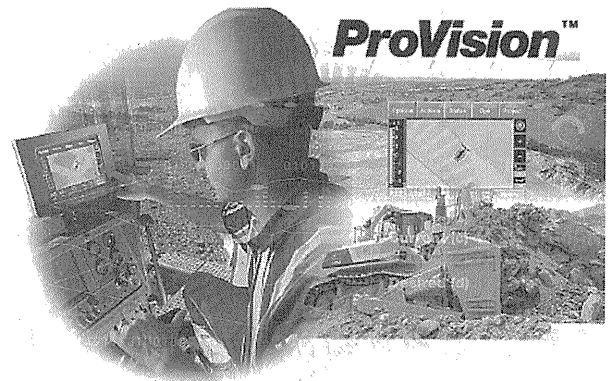
爆薬はエマルジョンを専用ミキサ車で混合し、装填する。発破粒度を調整するためのデッキチャージを自動的に行い、エアバックも併用している。点火はIC雷管を使用して、低振動、低騒音のアクティブ制御発破²⁾を行う。付近に民家はないが、自然生態系に配慮した静かな発破である。発破粒度、振動、騒音等の計測データは、次の発破設計に自動的にフィードバックされる。

洪水吐では、プラズマリッパを装着した2台のD11がリッピング掘削を行っている。

堤体のコア部は、ストックパイルから運ばれてきたコア材をブルドーザで敷均し、3両連結の無人ローラが1往復で、規定の6回転圧をクリアする。締固め度は、地盤反力センサでもチェックしている。

フィルタ材は、トレーラ式の2両連結ボトムダンプトラックが20 km 先の採取場から運搬してくる。コンボイ運転を行い、先頭車両は有人運転で、後続車は自動追従運転を行う。途中の地域高規格道路はスマートロード化されAHS（Advanced Cruise-Assist Highway System）による自動運転モードで走行する。

この時代、パソコンはない。というより、何もかもがコンピュータである。あらゆる機器にマイコンが内蔵（Ipv 6）され、UWB（超広帯域無線）接続のユビキタスネットワーク社会となっている。

写真—2 HG-GPS Dozer System[®]

オフィス環境でも、形が変形していて、コンピュータをあまり意識させない。机は卓全面がディスプレイになっている。ノートや手帳はハイパーメディアとなり、めくられる柔らかいシートディスプレイを何枚も綴じられる。

支店の事務所では、特殊情報化施工技士の工務主任が大規模土工の施工計画に取りかかっている。机全面に原地形図を表示し、ボーリングや弾性波、リモートセンシング情報等から地層を解析してソリッドモデルを作る。そして、計画図のレイヤーを重ねて土量計算を行い、土質別の土量分布を3次元柱状図として表示して立体的に把握する。

次に、運土手順と土質を考慮した4次元運土計画を行って一般最適解を求める。それから条件設定や工程を調整し、実施運土計画を立案する。このシステムは、運土矢線と工程表のアクティビティを連動させ、割付けた土工機械の山積み、山崩しの自動平準化機能をもつが、工程スライダ³⁾によりマニュアル操作で運土手順を容易に変更できる。

次に、切羽展開シミュレーションを参考に搬土走路の道路線形を決める。始点、終点と縦断勾配、標準横断図（テンプレート）、必要に応じて経由点をセットすると数案のルートが自動表示される。その中から最適なルートを選択、若しくは小修正を加えてルートを決定すると3D道路図面ができあがる。走行シミュレーション⁴⁾機能で視距、離合間隔、走行速度、ブレーキ制動等のドラ

イバビリティとサイクルタイムをチェックする。自動運転を行う場合は、ドライバビリティをあまり気にする必要はない。組み合わせは、後で待ち行列シミュレーションによりチェックする。

計画ができあがると遠隔地の数名とインターネットで施工検討会（電子会議）を開く。まず、彼が施工計画の概要プレゼンテーションを行い、その後で、参加者はめがね型立体視ディスプレイを掛け、地形ソリッドモデルによるサイバースペース（仮想空間）に入り込む、4次元運土計画をヴァーチャルリアリティで視覚化し、重機が稼働する施工シミュレーション⁵⁾で仮想体験をしながら議論をする。参考になる意見を採り入れて、再シミュレーションを行い議論を収斂していく。

3. 自動化・情報化技術

建設機械の自動化への取組みは比較的早く 1960 年代に始まっている。そして、1980 年代になると「建設ロボット」という呼称とともに自動化が推進された。背景として、ロボット導入による製造業の生産性向上が刺激としてあり、マイクロプロセッサの登場による技術革新と爆発的普及が機械の知能化への可能性を示唆したことにあった。制御法もアナログ制御からデジタル制御に移行し、メカトロニクス化を推進した。

一方、高齢化、熟練労働者の不足、生産性向上等の面からも建設機械の自動化、ロボット化が要請され、建設ロボットブームが到来した。初期に開発された建設ロボットは、位置計測が容易な左官ロボット、清掃ロボット、壁面ロボット等の構造化された環境下での平面移動型の建築系ロボットであった。

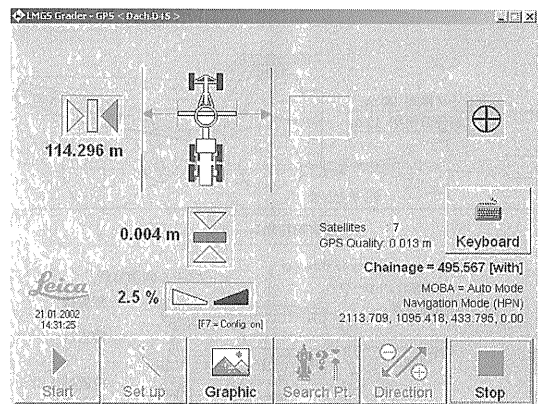
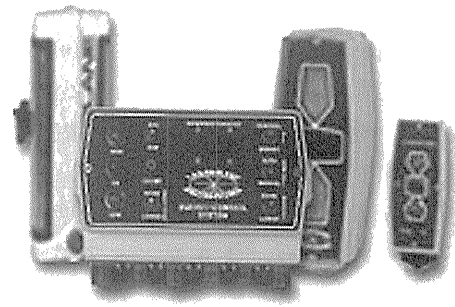
土工機械では、1970 年代に電磁誘導ケーブル方式による無人ダンプトラックが開発され、1980 年代末期にマイコン制御による無人ダンプトラックが出現した。

(1) 自動化

土工機械の自動化を大きく 2 つに分類すると走行系と作業装置系に分けられる。

作業装置系のブレード操作は熟練を要するため、早くから自動化の研究が進められていた。回転レーザを利用した整地作業のインジケータは、1970 年代に米国で実用化し、圃場の拡大に威力を発揮した。日本でも今日、圃場整備では一般的な装備となっている。

そして、最近では自動追尾 TS（トータルステーション）や GPS を利用したブレードコントローラ⁷⁾が多い。これらのブレード自動制御も古くから研究されているが、軽負荷の仕上げ制御用で、掘削作業（バカ押し）には向

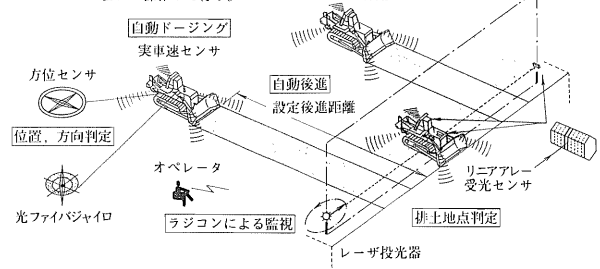


写真—3 グレードコントロール機器と画面⁹⁾

かない。負荷制御の研究も古くから行われているが、非線形制御要素が多く実用化には至っていない。このような中、1994 年にコマツが姿勢制御を重視したブレード自動制御を発表し、マルチオペレーションの提案と共に注目される（図—2）。

無人ブルドーザのマルチオペレーション（岸際垂直面レーザ・地磁気センサシステム）

人のオペレータがラジコン装置により、数台のブルドーザをコントロールする。個々のブルドーザは自動で前後進し、1レーンのドージングを設定回数繰り返す。レンジング、リップング等はオペレータがマニュアル操作して行う。



図—2 無人ブルドーザのマルチオペレーション

バケット制御については、マイクロプロセッサの登場と共に法面等の仕上げ制御が試みられ、回転レーザの利用や、最近では自動追尾 TS や GPS を利用したものが多い。また、バケット操作のイージオペレーションを狙った 1 本レバー操作の研究事例もある。これは、ヒューマノイド型のような 2 本アームの操縦に威力を発揮しようである。

積み込み作業については、単純なルーズ土の積み込みはティー

チングブレイバックも考えられるが、積み込み対象材の位置や形状の認識が進まないと難しい。研究事例としては、浚渫作業の全自動油圧ショベルが1986年に発表されている。近年は、画像処理等を用いたロード積み込みの研究が始まり、成果の発展を期待している。

自動走行の誘導制御法は、ガイドレス方式では、車輪エンコーダとジャイロによるデッド・レコニング (dead reckoning) が基本で、スリップ等の累積誤差の補正用にコーナキューブやGPSが利用されている⁸⁾。

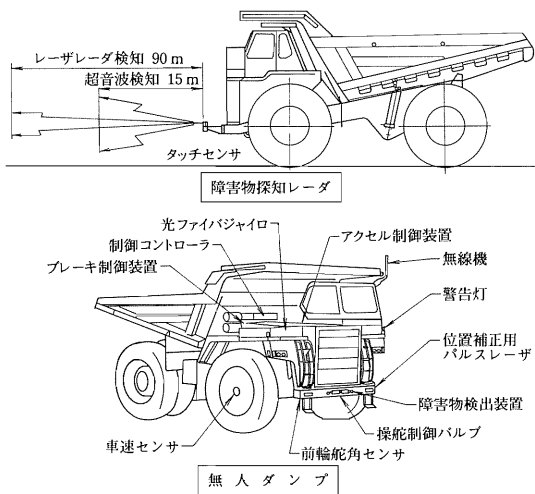


図-3 無人ダンプトラック⁹⁾

建設機械のラジオコントロールは、1960年代後半から利用されていたが、雲仙・普賢岳の災害復旧工事では、多数の建設機械群を中距離以上で遠隔操作するために様々

な問題が生じた。特に遠隔操作に必要な映像情報の移動体伝送用（無指向性）の電波が電波法上使えないことから、自動追尾法等さまざまな方法が検討された。遠隔操作では、極限ロボット等で研究されたテレグジスタンス (tele-existence) 技術の活用が将来は望まれる。

センシング技術と知能化が進展すれば、個別の自律機能を高めると共に協調制御へと進む。

まず、自動走行においては、単なる車両誘導制御から閉塞制御による車間維持、衝突・追突防止の保安制御が必要となる。次に、交差点制御、合流部の織込み、障害物回避等のアルゴリズムを付加した交通管制や積み込みとの協調制御等の群制御の段階に発展する¹²⁾。

図-4はミリ波電波灯台方式による無人走行システムで、障害物検知とデータ通信にもミリ波を利用して、交通管制等の群管制を行った。

(2) 情報化

土工事への情報化の取組みは、メインフレーム時代に日報管理、機械管理、原価管理等をバッチ処理していたものが、PCの登場によりタイムリーに活用できるようになった。また、積算は勿論、施工計画等の技術計算への利用も容易になり、大型工事ではCADやシミュレーションの利用が一般化している (表-2)。今後は、CALIS/ECの推進によって、設計CADデータが入手でき再入力の手間が省けて、運土計画や走路設計、切羽展開図の作成や各種シミュレーションが容易に行えるよう

表-1 自動化の事例

① 作業装置系	<ul style="list-style-type: none"> ブレード制御 (負荷制御, 姿勢制御) 回転レーザによる仕上げ制御 3次元制御 (自動追尾 TS, GPS) リッパ制御 (負荷制御) バックホウのマニピュレータ化 バックホウの1本レバー化 ロード積み込みの基礎研究 全自動油圧ショベル (浚渫)
② 自動走行	<ul style="list-style-type: none"> ダンプトラックの自動運行 転圧機の自動運転 締めめ: GPS, 振動加速度計 クローラダンプ自動運転 ロード&キャリア作業
③ 遠隔操作・監視	<ul style="list-style-type: none"> ラジコン建設機械各種 バックホウのマスタースレーブ操作 バイラテラル テレグジスタンス 自動測量 重機稼働監視 GPS, 自動追尾 TS, レーザ灯台, 電波灯台
④ 運行管理システム	<ul style="list-style-type: none"> トランスポンダ方式による車両通信 自動積載量計測

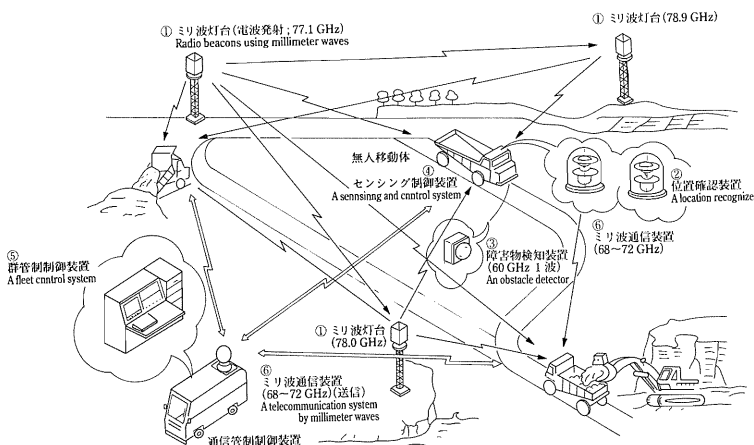


図-4 ミリ波による遠隔監視制御システム^{10), 11)}

表-2 パソコンの利用例

地形処理システム	土量計算, 土量配分計画
CAD	地形モデリング, 走路設計, 土量計算
走行シミュレーション	搬土機械のサイクルタイム
待ち行列シミュレーション	必要ダンプトラック台数
地形シミュレーション	プレゼンテーション
工程管理ソフト	PERT, 山積み・山崩し
表計算ソフト	作業能力算定, 積算

になる。

一方、大手ゼネコンでは、空港等の大型工事に統合土工管理システムを導入している。GPSと運土計画を組合わせたものが多い。また、GPSを利用した締固め管理が道路公団等の工事で一般化しつつある。近年、国内で情報化施工として導入されている3D-MC (TOPCON)は、CAD情報と自動追尾TSやGPSによる3次元位置情報を照合して機械制御を行える。

自動化、省人化を進めていくと中央官制センターでの情報処理も、瞬時に状況把握が行えるMMI (マンマシンインタフェース) や迅速な意志決定支援のために意志決定理論や最適化理論の導入が重要となってくる。この方面では、リアルタイムリアクションを求められる軍事面での技術が参考になる。戦闘機のHUD (ヘッドアップディスプレイ) やグラスコックピット、またCIC (戦闘情報指揮所) の戦術情報の集中表示法やデータリンクによる最新のC⁴ISRのシステム設計には参考になる点が多い。

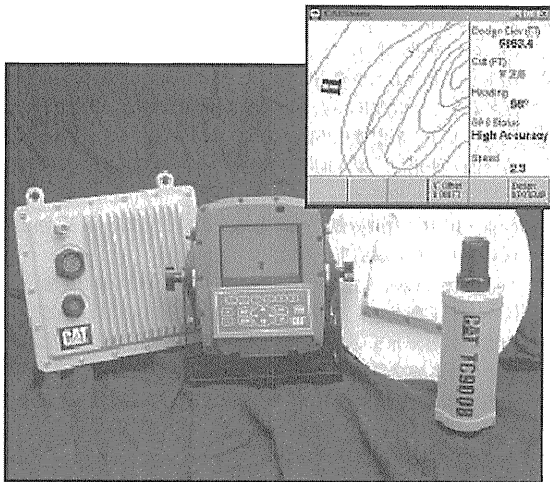


写真-4 CAT CAESbasic[®]

(3) 海外の状況

海外の動向では、建機搭載型のGPS製品が測量メーカだけではなく、建設機械メーカのオプションとして急速に普及し始めている。これらは無線LANでネットワークを構成するのが特徴である。キャタピラー社のCAESの基本構成は、GPSアンテナ、受信機、コンピュータ、無線LANである (写真-4)。写真-5は、コマツのブルドーザに搭載されている同様のシステムのGPSとMasterLinkで、写真-6は2.4GHz帯SS無線LANの移動式中継器である。

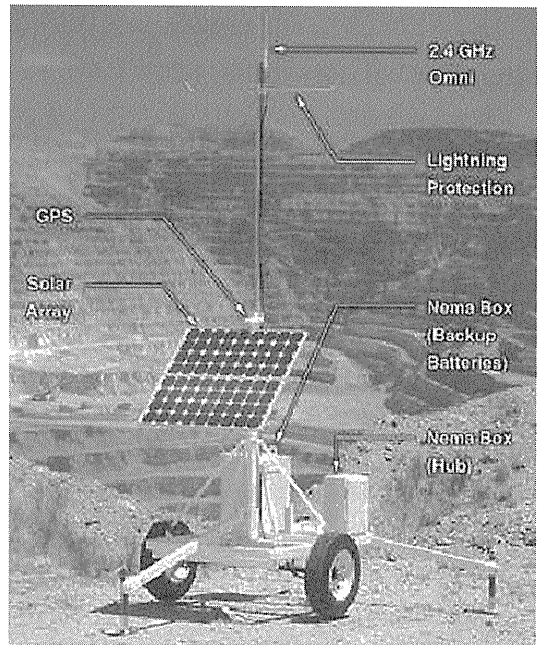


写真-6 MasterLink リピータ[®]

鉱山機械統合管理システムには、MineStar (CAT) や IntelliMine (Modular) があり、いずれも高精度GPS搭載のブルドーザやショベルが地層情報を参照

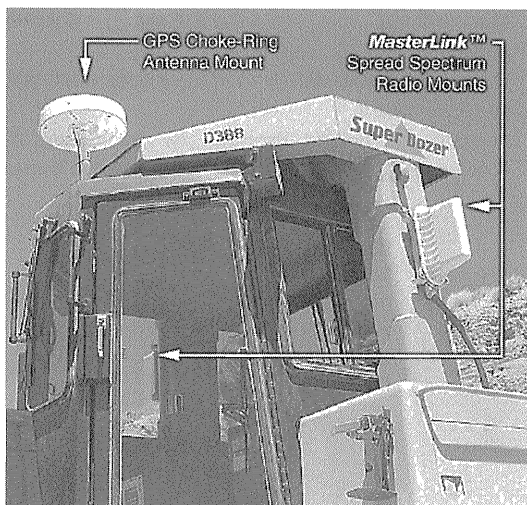
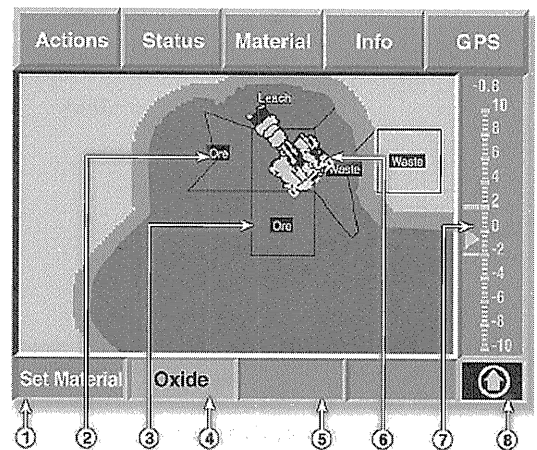


写真-5 GPSとMasterLink[®]



- ① オベ選定材 ② ポリゴン名 ③ 材料ポリゴン色
- ④ HP-GPS 選定材 ⑤ 積載量と車番 ⑥ ショベルアイコン
- ⑦ 予定高 ⑧ 方位

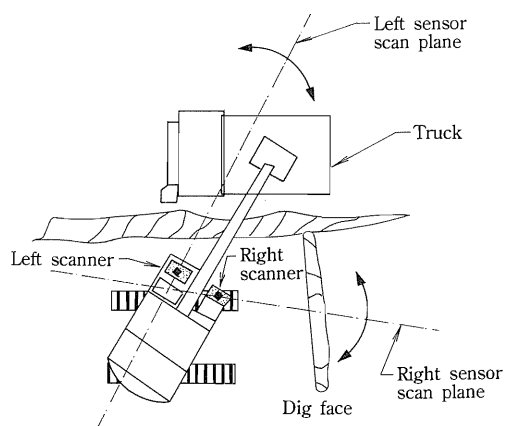
写真-7 掘削機の周辺状況[®]

(写真一7)しながら掘削し、穿孔機はピンポイント穿孔を行う。各重機は無線 LAN で結ばれ、稼働データを自動記録し、施工にフィードバックする。管制センターでは、稼働モニタリングにより重機の最適配置を行っている。また、機械の健康状態からメンテナンス、定期修理等を含めた統合管理を行う¹³⁾。

この辺は、実際に機械を保有して運用する米国のシステムと機械を持たない日本のゼネコンが作る統合土工管理システムの運用思想に違いが出てくる。

近年、土工操作系のヒューマンインタフェースは、電子化に伴いロードのジョイスティック採用やドーザブレードのフィンガーコントローラ等画期的な改善がみられる。そして、運転席の計器類も航空機と同様にグラスコックピット化が始まろうとしている。それに伴い GUI (グラフィカルユーザインタフェース) の改善が望まれる。例えば、ブレードコントロール用 GUI は、各社共に現状は稚拙である。HUD を採用してもっと洗練した精密仕上げに適した表示が可能はずだ。これはバケットコントロールにも適用できる。

GPS 自動走行については、CAT が 1996 年の MineExpo において、アリゾナから GPS 無人ダンプ走行の実況中継を行った。コマツは、豪州で 1996~1998 年にプロトタイプの開発とテスト (Pj. 8001) を行っている。その後、Modular 社が加わり、新しい開発プロジェクト (2000 年 7 月~2001 年 3 月) が進行した。そして、2001 年後半にパース近郊でデモンストレーションイベントが 2 回開催され、試験段階からまもなく商業ベースでの実用化に入ろうとしている。これに伴うように自動積込みの研究も盛んになった。図一5 はカーネギー・メロン大学ロボット研究所の実機システムである。バツ



図一5 自動掘削・積込み¹⁴⁾

クハウに 2 基のレーザーレンジセンサを搭載し、掘削材とダンプトラックの形状を認識して自動積込みを行っている。

4. おわりに

情報化施工の言葉は、当初、土質の計測管理の分野で使われ、その狭い意味の定義に不満を抱いていたが、近年、CALS/EC や IT の推進を背景に情報化施工が本来の意味を持ってきた。そして、情報化施工への成熟と同時に、自動化への黎明期をも迎えつつある。その背景には、一向に衰えないコンピュータ技術の進歩に加え、センシング等の要素技術が揃ってきたことが挙げられる。無人ダンプトラックの実用化を目前に、自動積込みの研究も活発化している。これらの研究を見守り、自動化と高度情報化施工の早期実現を期待したい。 J C M A

《参考文献》

- 1) 常田・芝崎：建設技術の高度化の現状と課題，土木技術資料，第 31 巻 2 号，p. 3，1989. 2
- 2) 岡本：IC 雷管を用いた新発破技術報告書，ジェオフロンテ研究会，pp. 42-45，1998. 11
- 3) 岡本・大下：土工の GUI による対話型工程計画，第 10 回建設マネジメント問題に関する研究会・討論講演集，1992. 12
- 4) 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会・討論講演集，1991. 12
- 5) 岡本・田中：重機稼働アニメーションについて，第 17 回土木情報シンポジウム講演集，1992. 10
- 6) Trimble, Leica, CAT, Modular : Technical Bulletin 他
- 7) 岡本：土工ポケットブック，山海堂，pp. 310-311，2000. 4
- 8) 岡本：ダンプトラックの自動化の趨勢，第 2 回西日本資源開発シンポジウム論文集，1995. 11
- 9) 岡本：無人ダンプトラック，建設機械施工ハンドブック，日本建設機械化協会，pp. 219-220，2001. 2
- 10) 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，p. 66，1995
- 11) 岡本：機械化土工の歴史と課題，建設作業のロボット化，工業調査会，1999. 6
- 12) 岡本，宮本：無人ダンプトラックの交通制御，土木計画学研究・講演集，No. 15 (1)，1992. 11
- 13) 岡本：大型土工機械の動向とコンピュータ管理，建設の機械化，pp. 62-65，2001. 5
- 14) Stentz 他：A Robotic Excavator for Autonomous Truck Loading, The Robotics Institute, Carnegie Mellon University

【筆者紹介】

岡本 直樹 (おかもと なおき)
山崎建設株式会社
土木本部
技術部
技術課長

