

# ロボット無人化施工研究の道程

—エレクトロニクス総プロからロボット総プロへ—

久 武 経 夫

建設ロボットと情報技術の融合を課題としたロボット総プロが終了し、従来の施工機械単体の自動化から、施工と機械を一体化した IT 施工実現の基礎が固まった。内閣府連携施策群「次世代ロボット」のプラットフォームの整備など、従来研究と試作に止まっていた建設系ロボット実用化への基盤が整った。この基盤を背景に、1970 年代に始まった建設ロボットの研究が、情報技術との融合によって新しい展開を始めた。

機械と情報の融合は、エレクトロニクス化された調査、設計、施工、維持管理作業の統合および情報の相互有効利用による効率化、コスト縮減、品質向上を標榜した「エレクトロニクス総プロ（1983 年～1987 年度）」に源流がある。

屋外作業機械での設計と施工融合のロボット化のキーテクノロジーである位置認識システムは、誘導（磁、光波、画像）、地磁気センサ、レーザ方位、光波測距器、ジャイロスコープ、ミリ波灯台を経て GPS 利用に到達した。GPS の高機能化と光学系センサとの複合利用が相俟って、屋外作業ロボット化の未来が見えてきた。既存の GPS 衛星を眺望できない山陰やビル陰を補うための準天頂衛星も総プロの枠の中で研究されている。

施工機械の高度化と、調査・設計・施工・保守のライフサイクル情報統合を企図した情報化施工を支える技術として、GIS（地理情報システム）、3D-CAD、GPS—光学系センサによる 3 次元位置情報、情報処理技術（IT）、情報と施工機械の制御系を直結した自動運転技術がある。

ロボット総プロで開発された、情報と直結して動く掘削積込機械のロボット化実現に続く展開は、施工全体のロボット化である。本稿では、エレクトロニクス総プロ以来 30 年の間に施工現場全体の統合化を試みた研究の道程を振り返り、今後の展開への一助としたい。

キーワード：総プロ、IT 施工、建設ロボット、位置認識、GPS

## 1. 建設機械のロボット化と作業のシステム化

土木施工機械の操縦系へのエレクトロニクス導入は、1967 年水中ブルドーザが嚆矢とされている。以来、遠隔操縦、自動化、ロボット化など建設機械へのエレクトロニクス導入が 50 年を迎えようとしている。

建設機械の高度化は、鉱山や荷役分野で先行している。1960 年代には、製鉄所の溶鉱炉近傍で稼動する機械にラジコン建機が使用された。土木分野では、転圧機械（ランドフィルコンパクト（1980 年））、地盤調査機械（1983 年）、振動ローラ（1987 年）、ダンプトラック（誘導式 1980 年、ジャイロ方式 1985 年、GPS 方式 2005 年）の開発が行われた。表—1 に、機能の概要を示す。同表は、作業全体がロボット化された施工現場のイメージ図を開発、作成された年代順に列記したものである。

遠隔操作型建設機械が人間に代わって全作業を行うロボット施工は、従来、鉱山での採掘や運搬、大型ダ

### 建設総合技術開発プロジェクト（総プロ）

建設技術に関する重要な研究課題のうち、特に緊急性が高く、対象分野の広い課題を取り上げ、行政部局が計画推進の主体となり、産学官の連携により、総合的、組織的に研究を実施する制度として、1972 年度（昭和 47 年度）に総合技術開発プロジェクト（総プロ）が創設された。現在までに 60 テーマが採りあげられ、建設機械の高度化に関わるテーマとして、① 1983～1987 年度：第 2 次総プロ「エレクトロニクス利用による建設技術高度化システムの開発（エレクトロニクス総プロ：エレクトロニクスを用いて建設技術の高度化と効率化を図るための未来展望の策定）」、② 1990～1994 年度：建設事業における施工新技術の開発、④ 1996～1998 年度：統合情報システム活用による建設事業の高度化技術の開発、⑤ 2003～2007 年度：ロボット等による IT 施工システムの開発、⑥ 2003～2007 年度：準天頂衛星による高精度測位補正に関する技術開発、がある。  
<http://www.mlit.go.jp/tec/gijutu/kaihatu/soupro.html>

表一 群管制型無人化施工システム例

年	システム名	自動化機械	位置・姿勢認識	衝突防止	群管制の対象機械	IT融合	無線種別・データ内容	段階	誘導方式	長所	短所	開発主体
1980	鉦山運搬システム	ダンプトラック (I)	電磁誘導線方式	通過センサ	ダンプトラック、複数可	無し	使用せず	デモ投入	経路上に誘導線を配置し、誘導電波を検知しながら走行	工場、倉庫等で実績有 ソフパ、汎用製品で確実に不向き	レイアウトの変更困難、変化する現場に不向き	コマツ
1982～1983	道路施工システム	コンパクタ	地磁気センサ+車輪エンコーダ	超音波+距離ハルス	コンパクタ	無し	ラジコン用制御信号	機実実験/1台	遠隔操縦による絶対位置補正	汎用機器使用で廉価 拡張性がある	耐環境性評価、電波到達距離未実証	東京大学、フジタCAT
1985	エレクトロニクス総プロ	複合	電波灯台	電磁波		有り		コンセプト	自動及び管制室より遠隔操縦	掘削・積込・運搬等作業全体の統合化	机上の検討で細部の検証未	国土交通省
1985～1987	RCDダム施工システム	振動ローラ	光波式位置認識装置	無し	振動ローラ 5台	転圧エリア分担	400MHz 制御信号	現場実験/1台	地上と車面に光波距離計と自動追尾装置搭載、相互の距離と水平移動角を測定	高精度位置測定、山間部等 GPS で対応不可な空間でも使用可	光波追尾装置が高価、設置部直下等死角対応が必要	宮ヶ瀬ダム工事事務所 三菱重工業務
1990	技術開発のビジョン	ダム掘削、巻出、転圧、養生、掘削、積込、運搬、転圧	光学式誘導基準点、他	不詳	全作業機械	全体監視のみ	制御、ヘリ情報入手	コンセプト	掘削等は遠隔操縦、打設・養生は半自動、プラントは全自動	全工事の集中管理で生産性向上を図れる	工程毎の機械の代替等段階の無人化	建設技術開発会議/国土交通省
1984～1991	鉦山運搬システム	ダンプトラック (II)	ジャイロ+距離ハルス+路側定点補正	超音波、相互無線通信	ダンプ 2台+有人オペレータ	無し	微弱電波	実用化	機械式ジャイロコンパスと路側定点との距離測定	外部誘導装置が簡略 搬送路変更が容易	誤差が積算されるため定期的な補正必要	日鉄鉱業 CAT、慶応大学
1989～1993	ロボテック研究所実験システム	複合	電波灯台方式	ミリ波レーザ	複数ダンプトラック+積込機械	無し	70GHz帯ミリ波	ワゴン車で現場実験	複数の電波灯台からの受信波の距離と角度を測定する	レイアウト変更可 対物センサは計測距離が長い	ミリ波高出力デバイスの開発、路面凹凸等認識装置開発	基礎技術研究促進センター
1994	建設車両自動運転システム	ダンプトラック	ジャイロ+距離ハルス+コナキューブ	CCDカメラ+画像解析	複数ダンプトラック	無し	無線	ワゴン車で現場実験	有線通信網と無線アクセスポイントの複合システム	コナキューブが廉価で確実、誘導理論が確立している	移動経路が確定する運搬機械以外への展開が困難	株間組 筑波大学
1994～	防災工事無人化施工	全機械	GPS	カメラ映像目視、超音波、他	無し、原則個別遠隔制御	転圧作業有り	400MHz 1.2,2.4,5.0 GHz他	実用化	個別の遠隔制御、転圧機械、ダンプトラックの、ロボテックの無人走行実績有り	蓄積した技術の活用 無人化施工の実績 行政の支援	完全自動への展開	国土交通省 建設無人化施工協会
～2002	鉦山自動運搬システム	ダンプトラック (III)	GPS	ミリ波レーザ、他	複数ダンプトラック+積込機械	無し	2.4GHz 無線LAN	実用化	複数の衛星からの信号によって位置と移動距離・方向を測定する	屋外の現場向き 基準局の併用で高精度な位置計測が可能	必要数の衛星を捕捉できない場所、時間帯が存在する	住友大阪セメント CAT コマツ
2008	ロボテック総プロ	油圧ショベル	GPS、傾斜計 3次元計測センサ		積込機械+運搬機械、他	融合が原則	2.4GHz 無線LAN	基礎実験	施工情報に基づく動作計画、施工状況の3次元情報	施工情報と機械の融合		土木研究所 東京大学

ム施工、潜函工法など危険、苦渋を伴う作業で採用または研究されていた。この工法が、1994年雲仙普賢岳の災害復旧工事で本格的に導入され、以来、北海道有珠山、三宅島、中越地震など、災害復旧や救援作業で多用されている。無人化施工を実現するために、施工法の変更、新作業機械の開発、機械の状態（位置、姿勢）や現場地形などの計測技術が一般化した。これらの成果が、転圧機械、積込機械、運搬機械などの自動化研究へと展開している。

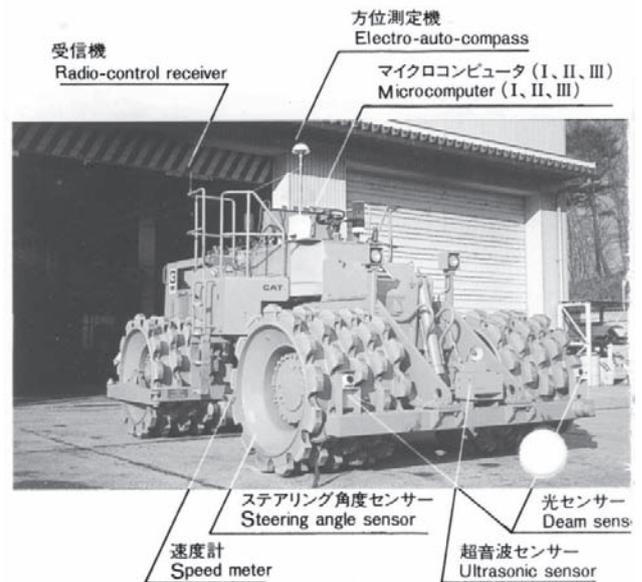
ロボット等によるIT施工システムの開発はこれら技術進展の総括と位置づけられる。表一は、作業機械と施工の融合を企図した研究事例を示す。

## 2. 個別機械の自動化と作業全体のシステム化

### (1) ランドフィルコンパクト (1983年)

土木工事のうち、転圧作業は前後走行を行う単純作業が主で自動化が容易なため、多くの研究が行われている。

写真一1の自動運転システムは高速道路施工時のランドフィルコンパクト5台のフリート無人走行を前提に開発された。地磁気方位センサ、走行パルスエンコーダ、ステアリング角度センサ等により走行軌跡情報を得て無人走行を行う。1名のオペレータが遠隔操縦装置を用いて5台の機械の経路補正を行う。開発は、フジタ（衝突防止）、東京大学（誘導）、キャタピラー三菱（走行パルスセンサ、遠隔操縦改造、無線シス



写真一1 無人コンパクト

テム)の共同で行った。実験フィールドでの1台の走行試験には成功したがフリート走行の実験、実作業での採用は行っていない。研究成果が3-3, 3-5, 3-7開発の契機となっている。

### (2) 無人化された現場のイメージ (1985年)

1981年～1985年の間実施された「エレクトロニクス総プロ」に於いては、掘削・積込・運搬の全機械を離れた場所に設置した操作室からの操縦を提案している。1994年に実現した「無人化施工」の原型である。「個々の機械の自動化では投資効果が無い、現場全体

の無人化が必要である」との趣旨で作成された未来施工現場のイメージである（図-1）。走行など単純作業は無人、掘削作業など作業サイクルの一部は遠隔操縦で支援する提案で、後出3-6の鉱山に於ける無人搬送システムの原型となった。



図-1 ロボット化された土木現場のイメージ  
（「エレクトロニクス利用による建設技術高度化システムの開発 報告書」）

(3) 振動ローラ群の無人運転（1987年）

振動ローラの運転は運転者への負荷が大きい、作業が単純なため転圧回数のミスカウントが生じ易い。この問題を解決するために建設省（現国土交通省）と三菱重工業株式が大型RCDダムで5台の転圧機械の協調運転を想定した自動運転システムの開発を行った。

転圧機械の位置検出認識は±0.1mを目標とし、光波式位置検出装置を用いた。

機械制御は、振動ローラ1台の実験機と実証試験に止まったが、中央制御部は5台までの拡張を想定したシステムとした（図-2）。同プロジェクトでは、コンクリート養生（グリーンカット）機械の自動化試作も行った。ダンプトラック、ブルドーザの自動化システムを構築し、工程変更の段取と機械入替の自動化システムを開発すれば、図-3の「RCDダム堤体盛立」

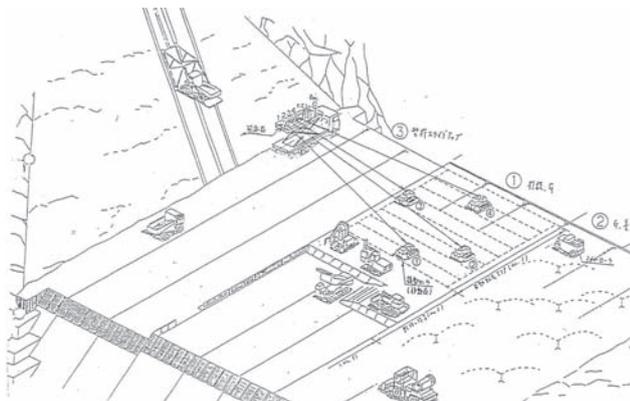
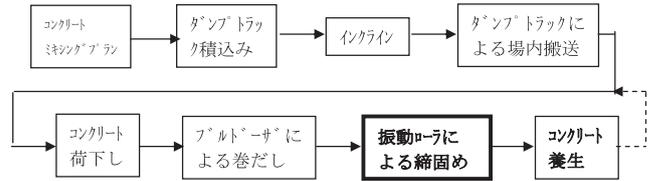


図-2 RCDダムへの無人コンパクタ群導入のイメージ

立て」の全作業のロボット化が実現する。図-4が、RCDダム堤体盛立て時の工程例である。



<http://www.ktr.mlit.go.jp/sagami/moredam/build/02.htm>

図-3 RCDダム堤体盛立て時の工程

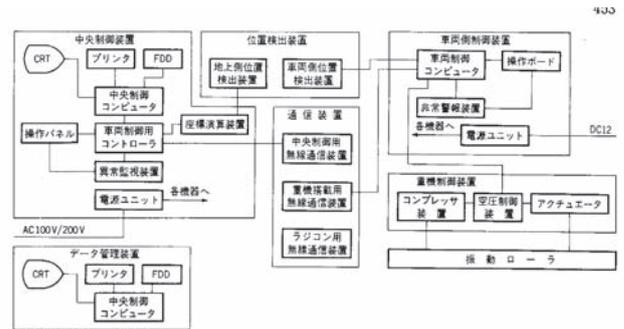


図-4 システムブロック図

(4) 技術開発のビジョン（1990年）

(a) コンクリートダム施工

図-4が、原石採掘現場を含めたRCDダムの堤体盛立て全工程へのロボット導入のイメージである。全ての施工機械をロボット化し、総合指令室に全施工情報を集約する。運搬路には光学式の誘導基準点を設けダンプを自動走行させる。コンクリート締固めロボットは、(3)の「振動ローラ群の無人運転」に相当する機能を有する。

(b) 大型土取現場

図-5は、「施工合理化技術開発のビジョン」による切土工・盛土工現場へのロボット導入のイメージである。場内に配備した無線中継点を介して中央コ

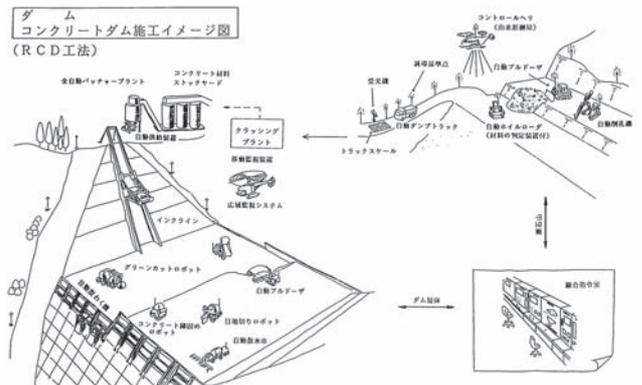
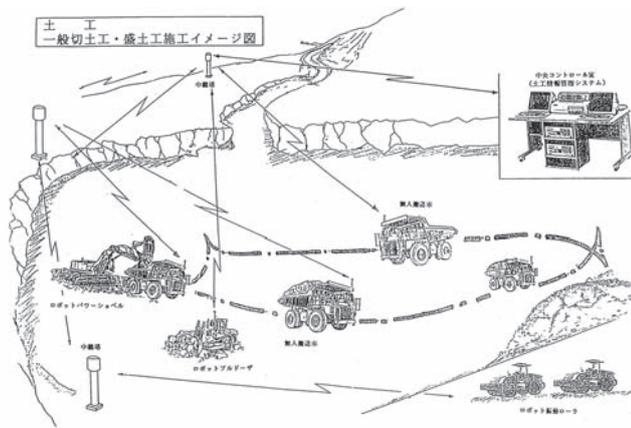


図-5 RCDダム施工イメージ

ントロール室と施工機械が双方向の通信を行う。全ての施工機械がロボット化されている。このイメージのパワーショベルとダンプトラックの組み合わせ部分が

(5) 項, (6) 項の開発の目標となっている。  
 なお、「技術開発のビジョン」は、施工合理化技術の開発と普及促進を目的に、トンネル、ダム、道路、建築施工分野へのロボット導入のイメージを体系化し、41枚の「近未来の施工現場」図として纏めたものである。施工機械の自動化のレベルを、①全自動、②半自動、③マニュアル、④プレハブ化（工場自動化）に分類し、その時点での最先端技術を基に作成されている。(1990年3月)



図一六 切土工・盛土工現場へのロボット導入のイメージ

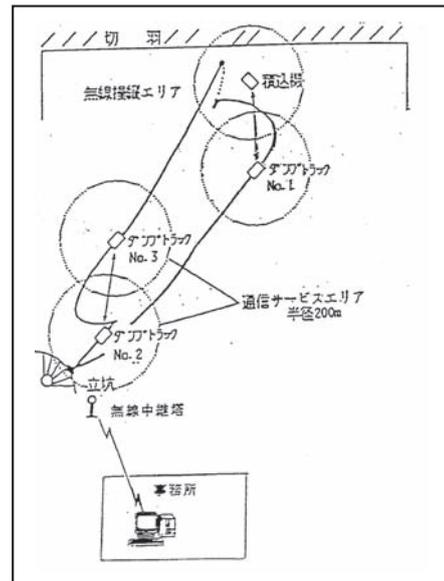
**(5) 鉱山に於けるダンプトラックの無人フリート走行システム (1991年)**

日鉄鉱業(株) (衝突防止等安全システム), キャタピラー三菱(株) (誘導, 無線) の共同開発である。代案システムの併行研究の部分に慶応大学の協力を得た。

メカニカルジャイロスコープ, 車軸の回転エンコーダ, 路側の位置修正ポールによる軌道管理が行われる。スケールモデルによる制御システムの開発, 実験フィールドでの実機 (32t級ダンプトラック) 走行試験を経て日鉄鉱業(株)鳥形山作業所での実作業 (85t級ダンプトラック)に移行した。同システムの開発が, (8)におけるシステム開発の基盤となった。

システムは, 複数台の無人ダンプトラックと有人積込機械の組み合わせで, 積込機械のオペレータが積込エリアでのダンプトラックの遠隔操縦を行う。ダンプ同士は特定小電力無線装置の伝送エリア内 (図中の円弧内) で通相互信を行い相互の位置を認識し車間距離の調整を行うことができる (図一七, 写真一2)。

コマツも光ファイバージャイロを用いた同様の無人ダンプトラックシステムを海外の大型露天掘り現場に



図一七 有人積込機械と特定小電力無線装置を用いたダンプトラック群の無人走行システム



写真一2 ダンプトラックの無人走行

納入している。

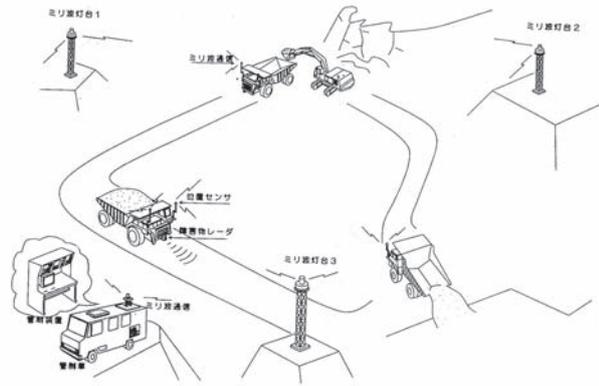
**(6) ミリ波を利用した建設施工の自動化システム (1993年)**

1989 ~ 1993 年度に当時の郵政省の指導でミリ波利用の研究が行われた。払底した低周波数帯の電波需要の拡張領域として周波数の高い未利用領域 (30 ~ 120 GHz) 利用を企図したものである (図一8, 9)。

この「ミリ波を利用した屋外作業自動化の研究」を行うために, 基盤技術研究促進センターの支援による期間限定 (1989 ~ 1993 年度: 予算規模 21.5 億円) のロボテック研究所が設立された。同研究所が実施した研究は下項である。

- ①位置認識: ミリ波の遠距離伝播を前提とするミリ波灯台システム
- ②障害物検知と回避 (ミリ波障害物センサ): ミリ波を用いた障害物認識システム

- ③車両制御：実験車による位置認識，障害物検知，通信管制システム
  - ④運搬車両群管制の最適化手法：運行計画支援システム，交通管制システム
- ①に関しては課題が残ったが，②～④に関しては研究成果が得られた。

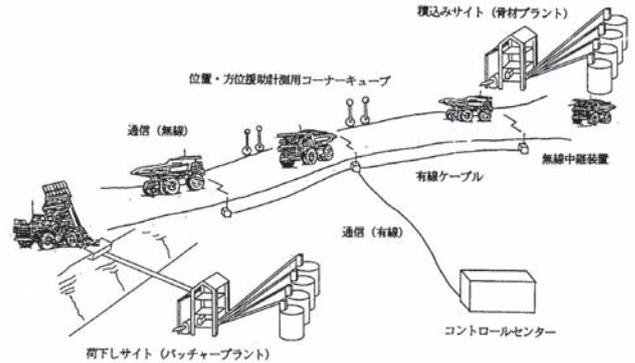


図一八 ミリ波を利用した建設施工現場の自動化

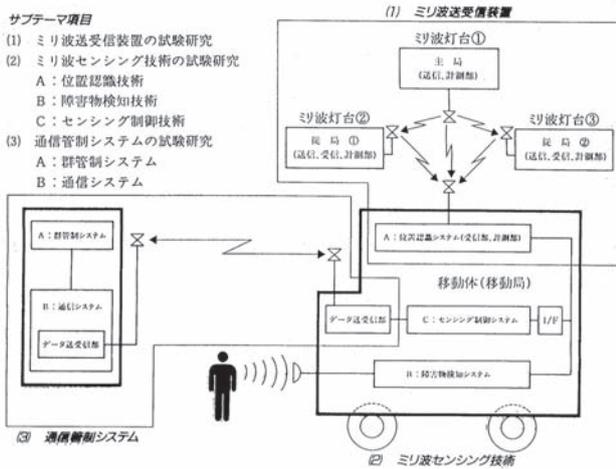
- ④通信機能：有線通信網と無線アクセスポイントの複合システム

上記システムを搭載した実験車を，全長 500 m，幅員 7 m，最小カーブ半径 40 m，最大起伏勾配 1% ダム工事専用道路において走行実験を行った。

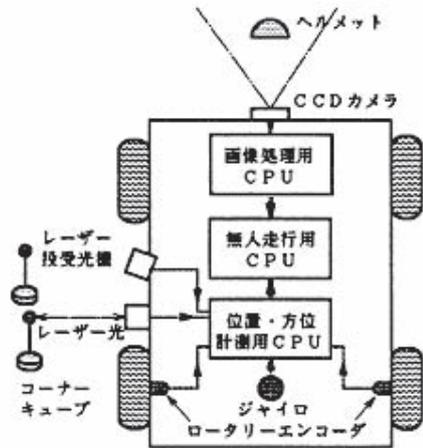
図一 10 が実施のイメージである。積込サイトと荷下ろしサイトに遠隔操縦のオペレータを配し，運搬路は完全無人で走行するシステムである。



図一 10 複数台無人車両の制御と運行管理システム



図一 九 ミリ波移動体制御



図一 11 無人車両システム構成

(7) ダムに於ける複数台無人運搬車両の制御と運行管理システム (1994 年)

(株)間組が筑波大学の支援を得て開発。ダンプトラック自動運転システムは下記で構成されている。

- ①無人操縦：CPU ユニット
- ②位置及び方位認識：ジャイロとロータリーエンコーダから成る自律計測系及びレーザー投受光装置と路肩に設置したコーナーキューブを用いた援助計測系で構成
- ③前方障害物検知機能：CCD カメラによる車両前画像のコンピュータ処理，60 m 前方の障害物認識が可能

(8) 雲仙普賢岳無人化施工 (1994 年～)

普賢岳の災害復旧工事は 1994 年以來，作業者が直接作業に介入しない「無人化施工」を行っている。導入時 34 社 45 件の施工法提案から選別された 6 工法より開始し 2006 年度までの 70 件の工事を通じて，無線伝送技術 18 件，建設機械の遠隔操縦化技術 19 件，工種・工法 25 件，特殊把持装置等 20 種類の新作業装置等，新技術の導入で無人化施工が可能な施工領域を拡大した。コンパクトなど転圧機械，ダンプトラック，ブルドーザ，測量機械等の無人運転の試みが行われている。

機械の位置認識に，従来の誘導，光波，ジャイロなどによる認識手法から，稼動領域を自由に選択できて

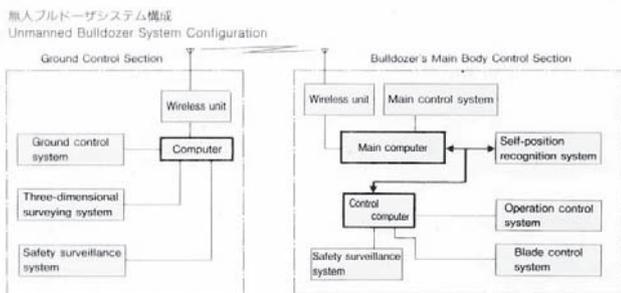
位置補正のための補助システムが不要な GPS が採用された。GPS を搭載した機械の移動軌跡から PC 上に地形を再現し、その地形に基づいて掘削や転圧の管理を行うなど、出来形情報と施工の融合が実現した。高緯度衛星信号の受信システム、GPS 機器やソフトウェアの高機能化、業務用無線モデム等を用いた固定局情報の共有など環境も整備されてきた。GPS の普及に伴う廉価化で測量や丁張り無しの施工が可能となり、施工時間の圧縮等の利点が評価されている。屋外作業機械の自動化への障壁が排除された。

普賢岳無人化施工では、ジャイロによる機械方位計測、インターネット上を介した遠隔地からの機械操縦等の止を含む遠隔操作も試行された。地形、出来高、



[http://www.kenmukyou.gr.jp/f\\_sekouhou.htm](http://www.kenmukyou.gr.jp/f_sekouhou.htm)

図-12 無人化施工現場



[http://www.fujita.co.jp/release/r1999/1999\\_1013muj.htm](http://www.fujita.co.jp/release/r1999/1999_1013muj.htm) 1999.10

図-13 無人ブルドーザシステム



写真-3 無人ブルドーザ

出来形等の作業情報の共有による CALS への展開も試行された。

山間地、ビル陰、衛星を補足できる、時間帯に影響されず全国をほぼ 100%カバーする高緯度を周回する準天頂衛星の測位サービスが実現すればさらに高精度な測位が可能となる。

「無人化施工」では、「設計」、「施工」「機械」が融した全自動施工も試みられている(図-12, 13, 写真-3)。

(9) 鉱山用無人ダンプトラック/GPS方式(2003年)

GPS の高機能化と廉価化、100 m 以上の監視機能を有するミリ波レーダの出現によって鉱山用無人ダンプトラックも新しい展開をしている。1990 年代に移動体搭載型の高精度 GPS が入手可能となり、(6) のシステムが GPS 利用へと展開した。高機能な無線 LAN の普及も無人ダンプの現場への適応性を高めている。図-14 に GPS 衛星を中心としたダンプトラックの無人走行システムを示した。

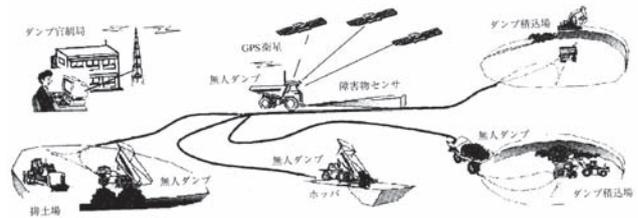
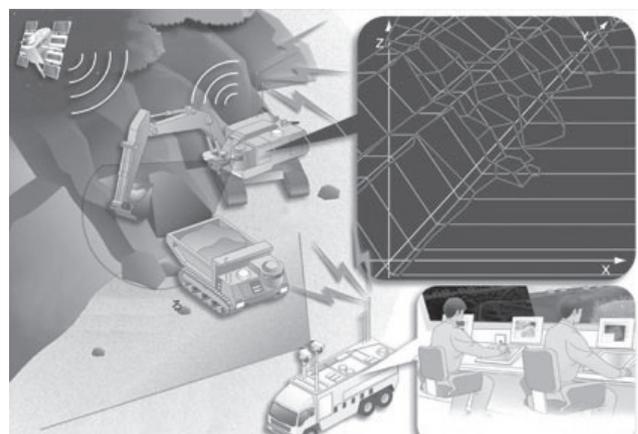


図-14 無人ダンプトラック群管理

(10) ロボット等による IT 施工システムの開発(2008年)

情報通信技術とロボット技術活用による施工の効率化を企図したロボット総プロでは、3次元設計情報と3次元地形情報を基にした動作計画に基づいて施工機



志田文伸 [技術紹介 建設機械の自動化技術の検討] Advance No.26

図-15 建設機械の IT 施工技術

械の自律運転を行う研究が行われた。システムは、設計と施工現場の3次元情報管理機能、ロボット建設機械への遠隔指令・遠隔操縦機能、無線通信機能、ロボット建設機械の自動制御システム等で構成されている(図—15)。

### 3. 終わりに

エレクトロニクス総プロでは、調査、計画・設計、施工、維持管理の4ブロックにおける個別作業のエレクトロニクス化を情報の相互有効利用を通じて統合することが提言された。これを実現するために、①作業の単純化・標準化、②作業の連続化・複合化、③施工性を考慮した構造形式の選定が必要であるとしている。作業の単純化・標準化の一手法として、センサによって得られた情報を用いた設計基準等の採用など具体的な手法も提案されている。

その後のセンサ技術の進展が機械の位置や姿勢、コンピュータ技術の進展が情報の高度化と相互利用を促進し、ロボット総プロの成果に結実したと言える。

ロボット総プロにおいて油圧ショベルの自動運転の研究が展開されている。転圧機械、ダンプトラックの自動運転は実現している。単一機種の施工機械については、群管制の研究も行われている。施工の全工程を形成する複数機種の機械群管制システム、工程移行時の段取、機械の入替えなどの自動化が残された課題である。

個々の作業機械の自動化による生産性の達成は難しい。ロボット機械導入のメリットを達成するためには、作業機械群全体の生産性目標を個々の機械制御に帰還し、最適化する仕組みが前提である。

J C M A

#### 《参考文献》

- 1) Sato, Hisatake : UNMANNED SYSTEM FOR HEAVY CONSTRUCTION EQUIPMENT, The ISRC (1988.6)
- 2) 建設省：建設総合技術開発プロジェクト エレクトロニクス利用による建設技術高度化システムの開発 報告書 (1984.3, 1985.3, 1986.3, 1987.3, 1988.3)
- 3) 小笠原保・藤原正雄, 他：締固め機械の自動運行システム, 三菱重工技報, 25 [5] (1988.9)
- 4) ミリ波センシングシステムの開発に関する調査研究委員会：ミリ波センシングシステムの開発に関する調査研究報告書, (財)無線設備検査検定協会 (1987.3, 1988.3, 1989.3, 1990.3, 1991.3)
- 5) Sato, Hisatake : AUTONOMOUS LAND VEHICLE USING MILLIMETER WAVE SENSING SYSTEM, The ISRC (1988.6)
- 6) 建設技術開発会議施工合理化部会施工合理化技術開発専門部会：施工合理化技術開発のビジョン, 建設技術開発会議 (1990.3)
- 7) 廣瀬：ダンプトラックの無人フリート走行システム, 建設の機械化, pp.51-54 (1993.5)
- 8) 滝澤・油田：建設車両自動運転システムの開発(第4報) - 複数台無人車両の運行管理システムについて -, 第4回建設ロボットシンポジウム論文集, p.43-48 (1994.7)
- 9) 岡本：ロボテック研究所の設立目的と研究の現状 - ミリ波有効利用のために - (建設用インテリジェントロボット研究⑧), 計測技術 (1991.8)
- 10) 古川(新キャタピラー三菱)・杉浦(間組)・大島(コマツ)：無人ダンプトラック事例紹介 (建設用インテリジェントロボット研究⑩), 計測技術 (1991.12)
- 11) 浅山芳夫：コマツの建設機械情報化への取組み, 建設機械 (2002.4)
- 12) 建設無人化施工協会技術委員会：無人化施工の推移と展望, 建設の施工企画 (2008)
- 13) 山元弘, 他：油圧ショベルの自律化に向けた基盤技術について - ロボット等によるIT施工システムの開発 -, 第11回建設ロボットシンポジウム論文集 (2008.9)

#### 【筆者紹介】

久武 経夫 (ひきたけ つねお)  
 (株)インロッド・ネット  
 代表取締役

