

建設機械施工技術の移り変わり (情報化施工・ICT 施工)

森川 博 邦, 藤 島 崇

1. 情報化施工発展の経緯

(1) 建設機械分野への ICT 導入経緯

自動車業界を中心とした機械製造業では既に1980年代には、計測技術の高精度化、制御技術の高度化と相まって機械にCADデータを入力して作業装置を制御するNC旋盤が既に実用化されてきた。

図-1に建設業における自動化技術の発展経緯と、機械製造業における自動化技術との発展経緯の大きな対比を示す。

建設施工分野においても、1970年代の製造業の産業ロボット導入による生産性向上に触発され、1980年代には、建設機械メーカーやゼネコンを中心にロボット技術としての研究・開発が数多く進められた。しかし、建設施工では屋外、単品、受注生産という特性により定型化した自動化システムが利用できないという課題と、位置特定技術、情報通信技術が未発達なために、現場が期待する作業速度、精度が実現できないという課題があった。

1980年代には、トンネル内の内空変位などを計測して、後続の施工に活用する情報化施工（現場計測施工法）が適用されるようになってきた。1990年代に入ると、自動追尾式トータルステーションや衛星測位技術の発展、情報処理技術の高速化、PCの普及が進んだことで、斜面や地盤の変位等を各種のセンサーで連続的にモニタリングすることで迅速に傾向を把握し、次段階の施工に反映させる等、適用範囲が拡大されてきた。

一方、建設機械分野へのICT適用は、大規模掘削が行われる鉱山分野での活用から始まった。その後、1990年代の半ば以降、自動追尾式トータルステーションの汎用化やRTK-GNSSの機器費のコストが下がってきたこと、無線通信の高速化により屋外でも位置情報をリアルタイムに取得できるようになったこと、建設機械の油圧制御も電子化されたことなどから、土木工事や道路工事に利用される汎用機械（ローラ類、ブルドーザ、油圧ショベル等）の位置や姿勢をリアルタイムに算出すると同時に、建設機械に3次元設計データを搭載することで建設機械の作業装置を誘導あるいはコン

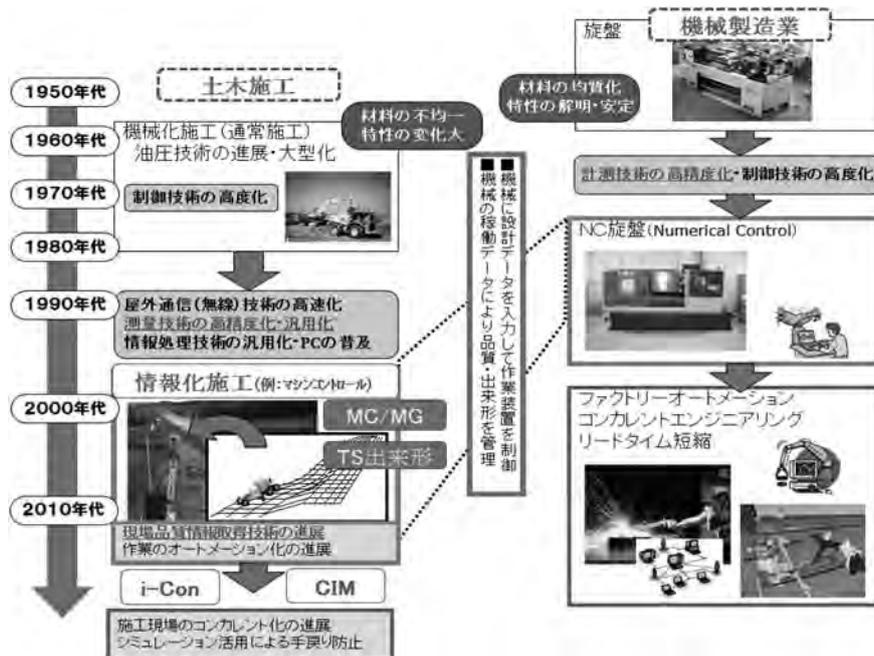


図-1 建設機械に関する情報化施工技術の変遷

トロールするマシンガイダンス技術やマシンコントロール技術が用いられるようになってきた。その後、これらの技術は確実な施工品質の確保に向けた意識の高まり、少子高齢化、熟練技能不足といった社会課題に対応する技術の一つとして着目され、2008年以降は、国土交通省が発表した情報化施工推進戦略、i-Construction（以下、i-Con）により、本格的な普及促進が進められている。

(2) 情報化施工の定義

情報化施工という言葉は、かつては現場計測施工法として施工現場の情報を活用し、次段階や次工程の作業計画や対策の検討を支援する手法を指してきた。その後、施工現場の情報を各種センサ技術を用いて取得できるようになったことから各種センサを用いる手法が広く情報化施工と呼ばれるようになった。2001年3月に発表された情報化施工のビジョンでは、「建設事業の調査・設計、積算・発注、施工、維持管理という実施プロセスの中から施工に注目し、各プロセスから受け渡される電子情報と施工中に得られる電子情報を活用して、施工や施工管理の効率化、品質の均一化、安全性向上、環境負荷低減など、施工の合理化を実現するシステム」として用いることが提唱された。

その後に発表された情報化施工推進戦略により、今日では、情報化施工は機能面から大きく2つに分類されている。

- ① ICT を用いて建設機械などの作業機械の自動化を図る機能
- ② 施工で得られる各種の情報を一元管理あるいは連続的に可視化し、現場実務に携わる技術者判断の高度化に利用する機能

2. 情報化施工から i-Con へ

情報化施工が、施工の合理化を支援する技術として用いられるようになると同時に、国土交通省においても情報化施工への期待や情報化施工技術の普及を図るプロジェクトが実施されてきた。

(1) 情報化施工のビジョン (2001.3)

「情報化施工促進検討委員会」(委員長：大林成行 東京理科大学教授(当時))から提言されたもので、情報化施工を構築する技術(センシング技術、情報の処理、保存、通信技術、機械制御技術)を分類・整理し、これらを適用、活用した6工種(土工、舗装工、ダム堤体工、トンネル工、基礎工、橋梁上部工)の情

報化施工による将来像と効果を示し、技術開発への期待や方向性を提言したものである。

当時は、衛星測位技術を建設機械の走行軌跡の管理に活用する技術が大規模な土工事で活用され始めた段階であった。

(2) 情報化施工推進戦略 (2008.3)

「情報化施工推進会議」(委員長：建山和由 立命館大学教授)において、普及に向けた3つの重点目標と工事発注者、施工企業、その双方別に28課題が示された。

本プロジェクトにより、ブルドーザや油圧ショベルに位置計測技術と3次元設計データを搭載したマシンコントロールやマシンガイダンスを行う建設機械(以下、ICT建設機械)の認知度が高まり、利用環境の整備が進んだ。

〈3つの重点目標〉

- ① 情報化施工の普及：直轄の道路土工、河川土工、舗装工について2012年度までに情報化施工を標準的な施工・施工管理として位置づける
- ② 機器・システムの普及：目標①に必要な情報化施工機器、建設機械を調達可能な環境を整備する
- ③ 人材育成：目標①の実現のために必要となる情報化施工機器・システムに対応できる人材を育成、2012年度までに1,000人以上を目標とする

(3) 第二期情報化施工推進戦略 (2013.3)

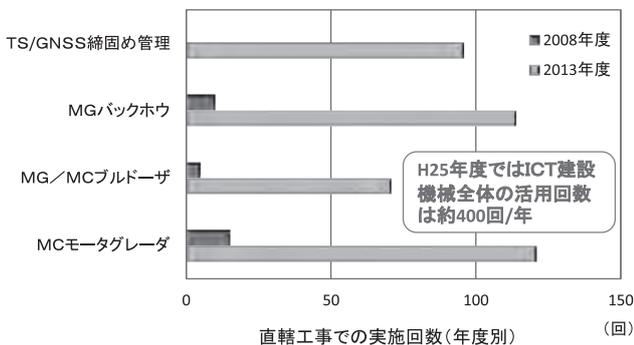
前述の第一期推進戦略期間の5年間を経て、第二期情報化施工推進戦略では、情報化施工を「使う」から「活かす」取り組みに移行することとし、5つの目標と10の取り組みが示された。

第一期および第二期の情報化施工推進戦略により、国土交通省が発注する直轄工事におけるICT建設機械の活用数、活用率が飛躍的に高まった(図-2参照)と同時に、ICT建設機械を取扱う技術者基盤が整った。

〈5つの重点目標〉

- ① 現状の情報化施工技術の高度化と適用範囲の拡大
- ② 情報化施工の効果が一層得られるよう情報化施工の特性をふまえた施工管理、監督検査の実現と設計や維持管理に関する技術基準の見直しとともに施工中に取得できる精緻な質の良い情報の維持管理での活用を目指す
- ③ 既に技術的に確立している一般化推進技術は、3年を目標に一般化を図る
- ④ 公共事業全体の7割を占める地方公共団体等へ情報化施工を普及促進する

⑤情報化施工の特性を活かし、工期短縮や品質向上等の成果につなげられる人材を確保するための教育・教習を充実する



※直轄工事の活用回数調査の母集団
 モータグレーダは、5,000m²以上の路盤工事を調査対象
 ブルドーザおよび締固め管理は、10,000m²以上の盛土工を調査対象
 バックホウは、10,000m²以上の掘削、あるいは10,000m²以上の法面整形工を調査対象
 (数値は国土交通省HPより)

図一 2 ICT 建設機械の直轄工事における活用回数

(4) i-Construction (2017)

2017年にi-Conが提唱され、建設生産性の向上に向けた3つの重点施策の一つにICTの全面活用があげられた。そして、ICTの全面活用には、前述のプロジェクトで推進してきた情報化施工をさらに活かすことで施工プロセス全体での生産性向上に着目したICT活用工事の実施が含まれている。ICT活用工事では、情報化施工で利用されていた3次元設計データや3次元位置情報を、施工だけでなく、施工計画や施工管理、監督・検査にまで活用することで、施工全体の生産性向上を目指す手法となっている。

この結果、2018年度(平成30年度)では、国土交通省が発注する直轄工事での活用割合はおよそ6割、活用件数でおよそ1,000件に達しており、2013年度(平成25年)時点の4機種(モータグレーダ、ブルドーザ、バックホウ、締固め機械)の延べ活用回数である約

400回に比べても2倍以上の回数で利用されるに至っている(表一参照)。

さらに、2018年度からは地方自治体への普及展開にも積極的に動き出している。

3. ICT 建設機械

ICT建設機械は、i-Conや情報化施工の要素技術の一つである。その多くは、建設機械の自己位置と作業装置の位置や傾きを各種のセンサで取得する他、施工目標となる3次元設計データを搭載して作業装置と施工目標との差分を自動計算する機能が組み込まれている。

(1) 締固め回数管理システム

締固め回数管理システムは、締固め作業のムラ削減による施工品質の均一化、必要以上の締固め作業回数の削減による施工の合理化を目的として、締固め機械の位置を衛星測位技術や自動追尾式トータルステーションでリアルタイムに計測して締固め機械の走行軌跡を作成し、施工範囲内の全面を所定の回数で施工したかを車載モニタ等で可視化するシステムである。これにより、運転技能者は、施工と同時に所定回数で施工範囲全体を施工したことを即座に確認することができ、作業のムラを防止できる。また、作業履歴は施工管理者も確認することが可能となっている。

図一3に締固め回数管理システムの機器構成とシステムの概要を示す。締固め回数管理システムは締固め機械に搭載したRTK-GNSS等の座標を用いて車載PC上で走行軌跡を算出し、ローラ幅を加えて走行範囲を求める。次に作業範囲を正方形(国土交通省の施工管理要領では、締固め機械がローラの場合は1辺が50cmとされている)に分割したメッシュ上の通過回数を判定してリアルタイムに色分け表示を行う。

(2) マシンガイダンス・マシンコントロールシステム

①マシンガイダンスとマシンコントロールの機能

ICT建設機械の機能の違いとして、大きくマシンガイダンスとマシンコントロールがある。図一4にマシンガイダンスとマシンコントロール技術の違いを示す。

マシンガイダンス技術とは、建設機械の作業装置(例えばブルドーザの排土板)の位置をリアルタイムに計測し、建設機械内のコンピュータに搭載された設計データとの高さの差や傾きの差を算出し、その結果を運転席のモニタ上で運転技能者に情報提供する。運転

表一 1 ICT 活用工事の実施状況 (数値は国土交通省 HP より)

(直轄工事) 単位: 件

	公告件数	実施件数	実施割合
H28年度	1625	1625	36%
H30年度	1675	1675	57%

(地方自治体) 単位: 件

	公告件数	実施数	実施割合
H30	2428	523	22%

※: 調査対象は、1,000m³以上の土工を含む直轄工事の公告件数(地方自治体は、回答のあった地方自治体のみ)

※: ICT活用工事は、施工のプロセスにおいて、3次元起工測量、3次元設計データ作成、ICT建設機械による施工、3次元出来形管理、3次元データの納品を行う工事

＜ RTK-GNSS を用いて締固め機械の位置を計測する場合の例＞



＜ 締固め機械の走行軌跡を可視化するイメージ＞

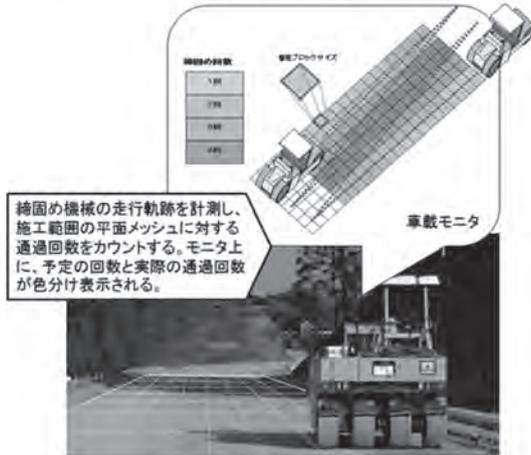


図-3 締固め管理システムの機器構成例 (上) とめ方締固め回数の色分けの概念図 (下)

技能者は、土砂の運搬方向や、機械本体の操舵および速度の操作等を実施する。現時点における建設機械のマシンコントロールは、完全な自動化ではなく、作業装置の動きの一部を自動制御する仕組みとなっている。

② ICT 建設機械の機器構成

3次元のマシンガイダンスやマシンコントロールを行うためには、建設機械および作業装置の位置や向きを取得するための各種センサ、目標となる3次元設計データとの差を算出・表示するコンピュータ、設計との差分データを操作に変換する油圧バルブ等のハードウェアが必要となる (図-5 参照)。

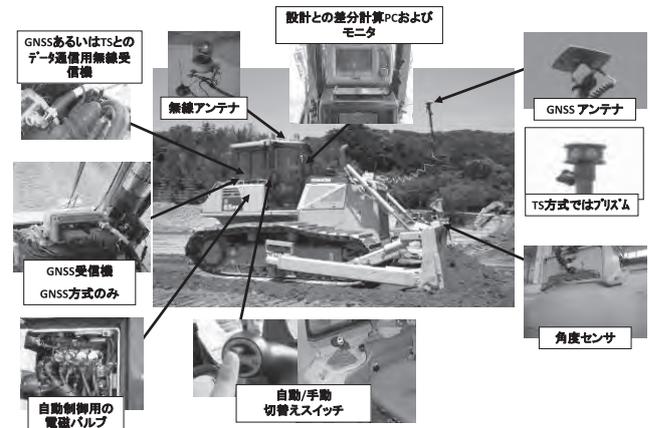


図-5 マシンコントロールに必要な機材 (例)

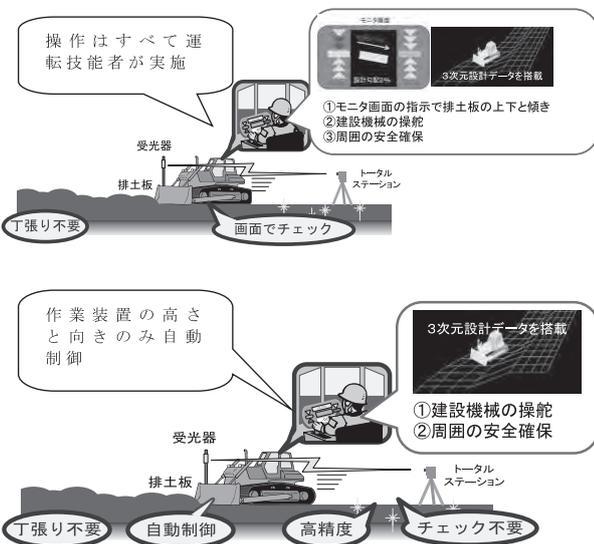


図-4 マシンガイダンス (上) とマシンコントロール (下) 技術のイメージ (ブルドーザ)

技能者は、モニタ上の差を確認し、設計値との差がなくなるよう操作を行う。

一方、マシンコントロール技術は、マシンガイダンス技術と同様に設計データとの高さの差や傾きの差を算出した後、設計データどおりの傾きや高さになるように建設機械の作業装置の油圧を自動制御する。運転

マシンガイダンスやマシンコントロール技術の導入当初は、通常の汎用機に測量システムや制御システムを後付けするタイプが多く見られたが、最近では、標準機械として各種のセンサが設置されており、標準機械として2Dのマシンガイダンスやマシンコントロールに対応する他、3次元位置の計測技術を後付けするだけで3Dのマシンガイダンスやコントロールシステムに変更できる機種が多く展開されている。

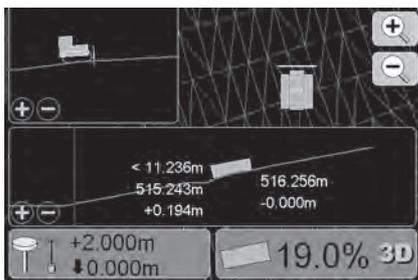
マシンガイダンスやマシンコントロールを行うためには、ハードウェアの設置に加えて、目標となる3次元設計データの作成とシステムへの搭載が必要である。3次元設計データは不等三角網で構成される面データが用いられることが多く、データ形式としてはLandXMLが用いられることが多い。図-6に、ICT建設機械に搭載する設計データのイメージと、車載モニタ上での設計値と作業装置の差分の表示例を示す。

③ ICT 建設機械の導入効果

図-7に ICT 建設機械 (マシンコントロールブルドーザ:GNSS方式) の導入効果例について示す。マシンコントロール等の導入により、作業前に設置が必要な丁張り作業の削減、施工中の誘導員や施工後の確



点線：搭載される設計データのイメージ



モニタ画面例：運転席に設置されたモニタ上に、建設機械の位置と向き、目標となる3次元設計データの差が表示される。ブルドーザのマシンコントロールでは、ブレードの高さ、傾きが設計値との差が"0"になるように自動制御される

図-6 建設機械に搭載する設計データイメージとマシンコントロールのモニタ (例)

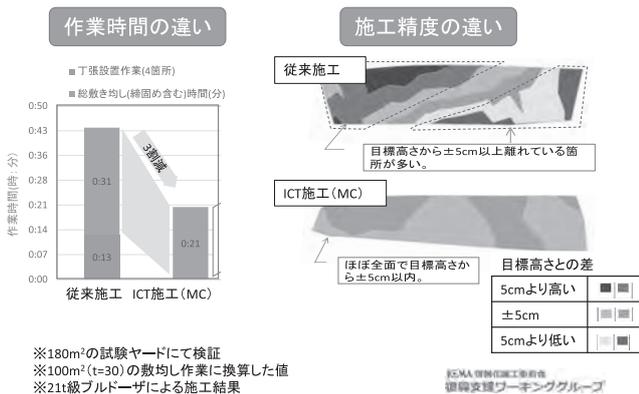


図-7 ICTブルドーザによる効果事例

認作業の省力化、作業時間の短縮などの効果に加え、施工精度の面でも均一な施工が実現されることが多数報告されている。

④ ICT建設機械の種類

ICT建設機械の種類は、モータグレーダ、ブルドーザ、油圧ショベル、アスファルトフィニッシャ、路面切削機など、多くの機種に展開している。図-8に代表的なICT建設機械の機種を示す。

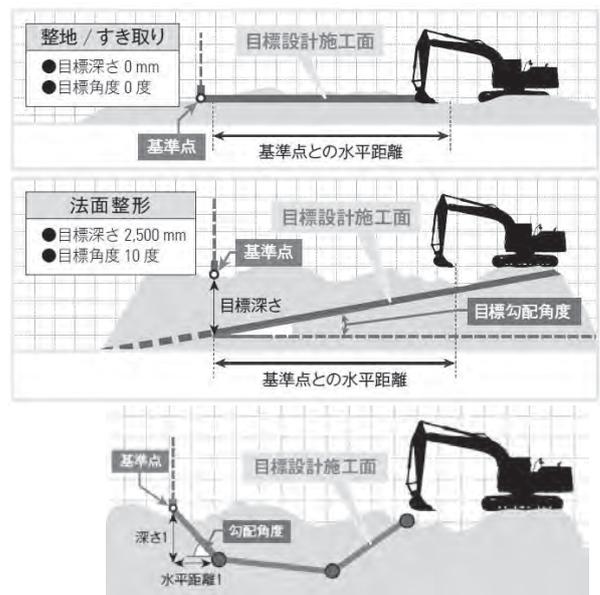
(3) ICT建設機械の高度化

① 2Dシステムの標準装備と低コスト化

2Dシステムは、作業中に基準となる位置からの相対位置でマシンガイダンスやコントロールを行う技術であり、3次元計測装置の設置や3次元設計データの作



図-8 主なICT建設機械



図は、キャタピラー社油圧ショベルカタログより
 図-9 バックホウの2Dシステム (例)

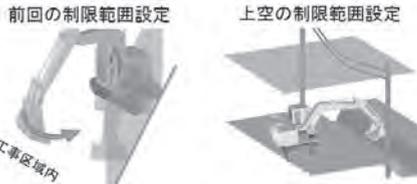
成が不要なことから、運転技能者の操作支援技術として幅広く活用が期待できる機能である (図-9参照)。

最近では、マシンガイダンスやマシンコントロールに必要なセンサ類の標準装備化が進んでいることから、RTK-GNSSなどの位置計測装置を装備しない場合でも2Dシステムとして活用できるICT建設機械も展開されている。さらに、簡易な後付(配線不要)装置によるマシンガイダンス技術(2D)も開発されている。

②安全機能としてのICT活用

バックホウに2Dシステムが標準装備化されたこと

2Dシステムを活用した、作業範囲の制限



全周カメラ等による障害物・作業員の認識



図はカナモトカタログより

図一10 バックホウの安全装置 (例)

により、安全装置としての活用にも期待されている。これは、あらかじめ自己位置に対して作業装置の可動領域を設定することで、作業装置の歩道への張り出しや、架線への接触を防止できる機能となっている (図一10上参照)。

さらに、最近では360度カメラ等による障害物や作業員の認識、走行や旋回速度制限や緊急停止機能等の新たな安全装置の設置が積極的に実施されている。これらの安全対策については、i-Conでの今後の取組にも位置づけられており、更なる発展が期待されている (図一10下参照)。

③新たな機種への展開と現場適用性の向上

最近ではチルトバケットを搭載した油圧ショベルのマシンコントロール技術 (図一11) や、舗装工向けに3次元設計データを設計標高ではなく、施工指示値 (厚み) でコントロールする技術 (図一11下) なども開発されており、現場施工への適用性の向上が進められている。

4. 現場マネジメントシステムとの融合

ICT建設機械の機能面や機種の拡張の他に、情報化施工のもう一つの機能面においても、ICT建設機械の役割は大きく進化している。従来は、施工現場の情報を一元的に収集・管理するためには多大なシステム費用に加えて、運用体制の構築が必要となるため、大規模工事での導入事例が多かった。



図はコベルコ建機 (株) カタログより



図は (株) トプコンカタログより

図一11 マシンコントロール技術の適用拡大

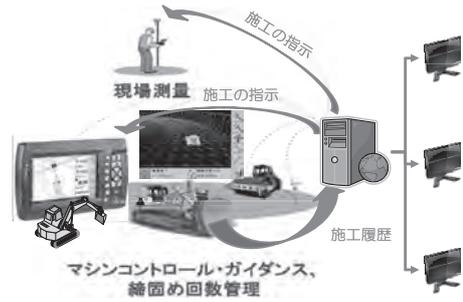
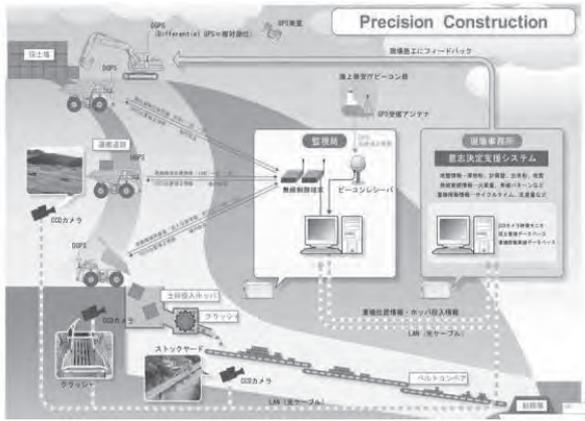
しかし、ICT建設機械が広まってきたことで、多くのICT建設機械の位置や施工後の地形等の情報を取得することが可能となり、現場マネジメントシステムの要素技術として利用されるようになってきた。

(1) 大規模工事での実施事例

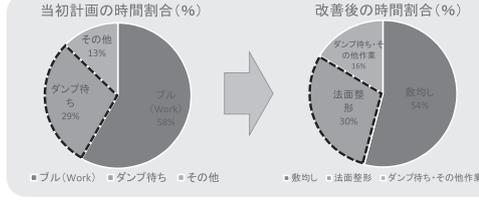
代表的な事例としては、建山ら^{1), 2)}が発表したコンクリートエンジニアリングの事例がある。建山らは、埋立て用の土砂採掘現場において、運搬を行う運搬機械の位置、掘削に利用する火薬量、掘削機械の稼働率、破碎機械の稼働率などの情報をリアルタイムに収集、一元管理するシステムを構築し、全体システムとしてロスのない機械配置と掘削量の調整を実現した。図一12に、建山らが発表したコンクリートエンジニアリングのシステム構築事例と効果を示す。報告によれば、本システムの運用により、日あたりの平均出荷量で21%向上、1m³当たりの掘削に要するCO₂排出量で24%の削減を実現した。

(2) ICT建設機械の稼働履歴を用いた現場マネジメント事例

図一13は、ICT建設機械から得られる稼働情報や地形情報を用いることで、施工現場の見える化を図り、全体のムリ、ムダの削減につなげた事例である。現場で利用している機械の稼働率を自動収集して分析した結果、ブルドーザの待機時間が多いことが明らかとなり、待機時間を有効活用して別作業 (法面部の整形) を実施する作業フローに変更した。これにより工期の



ICT建設機械を用いた現場情報収集システム

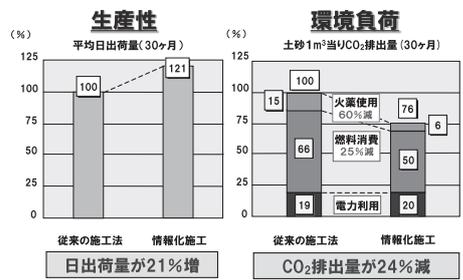


クラウドシステムを利用した稼働時間の可視化



施工現場の状況 (左) と空き時間での法面施工状況 (右)

図一 13 ICT 建設機械の稼働管理を用いて現場改善を実施した事例



(図は、建山氏より提供)

図一 12 コンクリートエンジニアリングの事例

短縮が実現した。この様に、従来では大規模工事では構築できなかったシステムが、通信インフラの充実とICT建設機械の高度化により簡単に構築、利用することが可能となっている。

5. 今後の展開

ICT建設機械については、システムの標準搭載などが進んでおり、より操作性の高い機械の開発が進んでいくと予想される。さらに、小型機械へのシステム搭載なども期待されている。

さらに、近年は無人での自動施工まで踏み込んだマシンコントロール技術なども実施されており、今後、建設機械とICTの組合せは一層加速していくことが

推察される。

一方、通信インフラの環境の充実に伴って、ICT建設機械が、作業機械であると同時に現場情報を集めるセンサとしての役割にも注目が集まっている。建設機械の稼働履歴等を用いて現場の地形や資機材の動きを可視化し、AI技術を活用して全体マネジメントの効率化を支援する技術等、今後の開発動向が注目される。

【参考文献】

- 1) 建山和良: ITと建設施工 — Precision Construction の試み —, 建設の機械化, No.625, pp.3 ~ 7 (2002.3)
- 2) 建山和良他: 建設工事における環境保全技術 (社団法人 地盤工学会), 第8章 環境負荷低減への新しい取組み, pp.215 ~ 230

【筆者紹介】



森川 博邦 (もりかわ ひろくに)
 国土交通省 国土技術政策総合研究所
 社会資本マネジメント研究センター
 社会資本施工高度化研究室 室長



藤島 崇 (ふじしま たかし)
 (一社) 日本建設機械施工協会
 施工技術総合研究所 研究第3部 次長