

CMI 報告

D-GPS を用いた 建設機械（草刈機）の稼働状態 把握システムの開発検討

榎園 正義

1. はじめに

現在、北陸技術事務所が開発中の無人・有人対応型草刈機の施工調査において、試作機（開発機）の作業能力の評価を行うためには種々の現場で性能試験を行い、詳細な稼働状態を把握する必要がある。また、草刈機の作業形態は線状の施工であり、少しでも実作業に近い状態での調査が望ましいが、調査のために試験区間（距離）を設定したり、カラーコーン等の目標物を事前に配置して常に調査員が開発機を目視確認して、作業時のレーン変更や所要時間をストップウォッチを用いて記録しているのが現状である。この方法は、人的ミスの発生が懸念されたり、多大の労力（省力化）を要するなどの問題がある。

本開発は、今後新規に開発される建設機械（特に線状施工形態）等での長期間使用を目的とした現地適応性試験時等において、機械の詳細な稼働状態を把握する手法として、経済的な D-GPS（GPS コンパス）と各種センサの情報および ICT（情報通信技術）を用い、遠隔で自動計測するシステムの開発に向け、草刈機への適用検討を行ったものである。

2. 検討概要

本開発は、次の 2 つのテーマについて検討を行うこととした。

- ① D-GPS（GPS コンパス）の精度検証を目的とした、自己位置把握の基礎実験
- ② D-GPS を用いた草刈機の稼働状態把握システムの検討（開発中）

2.1 自己位置把握の基礎実験

(1) 実験概要

草刈機（ベースマシン）の自己位置把握技術として、単独測位（S-GPS）、D-GPS（GPS コンパス）および RTK-GPS を用いた測位精度に関する比較実験を行い、本システム開発の基礎資料とする。

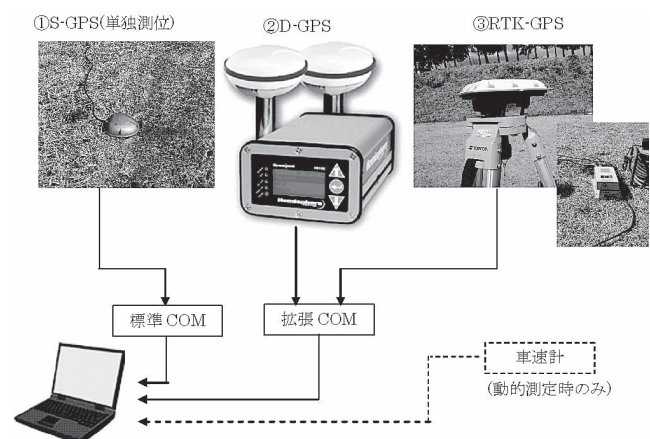
(2) 実験方法、実験条件および評価方法

1) 実験方法

3 種類の測位方式の機器仕様を表—1 に、測定システムの構成を図—1 に示す。また、各 GPS システムのデータ出力条件は表—2 に示すとおりとした。

表—1 測位方式と測定システムの構成

測位方式	測定システムの構成	主な仕様
①単独測位 (S-GPS)	・ GPS アンテナ ・ GPS 受信器	・ 外部への出力が可能なタイプ ・ カーナビ相当 (SiRFStarIII) ・ 周波数: L1 (1575.42 MHz), C/A コード ・ 水平精度: 10 m ・ 更新レート: 1 Hz
②D-GPS	・ D-GPS アンテナ ・ D-GPS 受信器	・ 周波数: L1, C/A コード ・ GPS コンパス (VS100 シリーズ) ・ SBAS 等の補正情報に対応 ・ 水平精度: 0.6 m 以下 ・ 更新レート: 10 Hz
③RTK-GPS	・ 移動局 RTK-GPS アンテナ ・ 移動局受信器 (MS-750) ・ 固定局 GPS アンテナ ・ 固定局 GPS 受信器 (MS-750)	・ 周波数: L1, C/A コード, L1/L2 (2 周波) ・ リアルタイム測位 ・ 位置精度: 水平 2 cm, 垂直 3 cm ・ 更新レート: 20 Hz



図—1 測定システムの構成

表一 2 測位方式とデータ出力条件

測位方式	出力条件 データ更新レート (サンプリング速度)	
	静的 (静止)	動的 (移動)
① SGPS (単独測位)	1 Hz	1 Hz
② D-GPS	1 Hz	5 Hz
③ RTK-GPS	1 Hz	5 Hz
<参考>④車速計	-	2 Hz

表一 3 実験条件

実験内容	実験条件	測定項目	走行速度
(1) 静的 (静止) 精度の検証	・テストコース上に測点を設定し、各GPS測位方式で同時に一定時間測定し、その座標を測定する。	①座標 (X, Y, Z)	・静止
(2) 動的 (移動) 精度の検証	①テストコース上のセンターライン走行 (座標比較)。	①座標 (X, Y)	・5 ~ 50 km/h (約5 km/h ピッチ)
	②テストコースの左車線 (反時計回り) 内の走行 (座標比較)。	①座標 (X, Y)	・5 ~ 50 km/h (約10 km/h ピッチ)
	③テストコースの左車線 (反時計回り) 内の蛇行走行 (座標比較)。	①座標 (X, Y)	・任意速度にて

2) 実験内容と実験条件

主な実験内容と実験条件は、表一 3 に示すとおりとした。また、使用機器一覧表を表一 4 に示す。

3) 評価方法

①静的 (静止) 測定データ

定点での測位データの経時変化を把握し、誤差 (精度) の評価を行う。

②動的 (移動) 測定データ

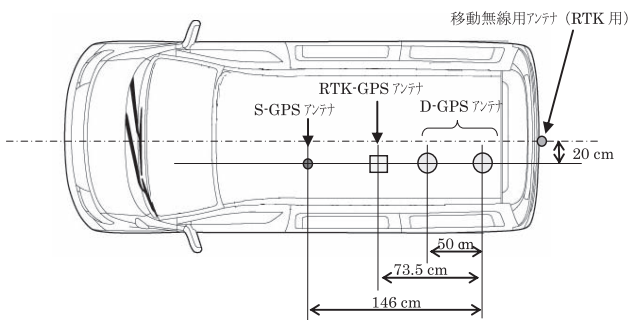
車両に各GPSアンテナを搭載し、走行位置を変えた条件でテストコース (750 m) の周回でデータを取られ、RTK-GPSデータを真値として差異を評価する。

表一 4 使用機器一覧表

種別	機器名称	主な仕様	数量	備考
(1) GPS システム	① S-GPS (単独測位)	・SiRFStarIII チップセット ・周波数: L1 (1575.42 MHz), C/Aコード ・トラッキング感度: -159 dBm ・水平精度: 10 m ・更新レート: 1 Hz	1 台	
	② D-GPS (GPS コンパス)	・VS100 シリーズ: L1, C/A コード ・GPS 方位精度 < 0.1° RMS ・更新レート, 最大 20 Hz ・SBAS (MSAS, WAAS) 等の補正情報に対応 (専用の静止衛星からの補正データを利用する方式) ・水平精度 < 0.6 m (95%)	1 式	・(株) ヘミスフィア
	③ RTK-GPS	・MS750: 2周波形GPS受信機 (基地局用, 移動局用) ・GPS アンテナ ・水平精度 2 cm, 垂直精度 3 cm ・更新レート, 最大 20 Hz ・基地局による補正情報	1 式	・トリンプル
(2) 速度計測システム	①空間フィルタ式速度検出器 (LC-1100)	・測定範囲: 1.5 ~ 320 km/h (中速, 高速用)	1 台	・(株) 小野測器
	②非接触速度計 (LC-1500)	・速度 (アナログ出力)・距離 (パルス出力)	1 台	・(株) 小野測器
	③外部表示器 (LC-0180)	・速度表示	1 台	・(株) 小野測器
(3) データ収録装置	①パソコン	・Windows XP (ハイパーターミナルで収録) ・拡張COM	2 台	
(4) 車両	①エルグラント	・1 BOX	1 台	
摘要	・SBAS (Satellite-based Augmentation System: エスバス) とは、専用の静止衛星からの補正データ (無料) を利用した高精度の測位システムで、日本ではひまわりの後続機である運輸多目的衛星 MTSAT を利用した衛星補強システム MSAS (Multi-functional Transport Satellite; エムサス) が運用される予定。 ・米国では、INMARSAT (インマルサット) を利用した広域補強システムを WAAS (ワース) と言い、欧州では EGNOS (イグノス) と呼ばれている。			

③ GPS の速度データ

別途速度計測システムを車両に設置し、このデータを真値として、各 GPS の速度データを評価する。



図一 二 車両上面へのアンテナ配置



(a) 各 GPS のアンテナ設置状況

(b) 前面から

(c) 後面から

写真一 車両への各 GPS アンテナ搭載状況

(3) 実験結果

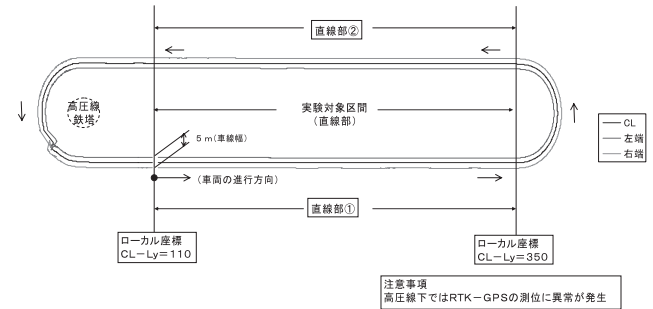
1) 静的（静止）測位精度

- ① RTK-GPS の測位誤差（精密度）は、0.005 m、長時間測定での DRMS（データの 95%）は 0.010 m とバラツキも少なく、非常に高い精度を有している。
- ② D-GPS の測位誤差は、0.089 ~ 0.319 m と比較的良好な結果であったが、長時間測定での DRMS は 0.32 ~ 1.06 m と若干のバラツキが認められる。本 D-GPS は SBAS 利用で表一 4 に示すように 0.6 m（95%）以下としているが、長時間の精度は、周辺環境は比較的良好であることから、衛星配置による影響を受けたものと考えられる。

2) 動的（移動）測定精度

テストコースのセンターライン上の車両走行（低速：5 km/h）による RTK-GPS の測位データを基に、車道幅（片側 2.5 m × 2 = 5 m）を考慮してテストコース全体図を作成したものを図一 3 に示す。また、評

価は図中の試験区間（①，②）の各 GPS データで検証した。



図一 三 テストコースの全体図（RTK-GPS で作成）

- ① センターライン走行時の軌跡（速度 5 ~ 50 km/h）
 - ・ S-GPS の測位差は、最小で 1.0 m、最大で 6.0 m（仕様値 10 m 以内）となった。
 - ・ D-GPS の測位差は、仕様値 0.6 m に対して、最小で 0.1 m、最大で 1.0 m と比較的良好な結果となった。
- ② 片側（左）車線走行時の軌跡（速度 5 ~ 50 km/h）

片側車線走行での逸脱可能性について評価した結果を表一 5 に示す。

表一 五 左車線走行時の逸脱可能性

走行速度 (km/h)	S-GPS		D-GPS		RTK-GPS	
	直線部①	直線部②	直線部①	直線部②	直線部①	直線部②
5	×	○	○	○	○	○
10	△	×	○	○	○	○
20	○	×	○	○	○	○
40	×	○	△	△	○	○
50	△	△	○	○	○	○
備考	・表中の凡例は、以下のとおりとする。 ○：車線の逸脱なし △：車線の逸脱可能性あり ×：車線の逸脱あり					

③ 蛇行走行時の軌跡（速度 10 ~ 30 km/h）

片側車線（2.5 m）内を蛇行走行した場合の車線からの逸脱の有無を評価した結果を表一 6 に示す。この表から、D-GPS と RTK-GPS では車線からの逸脱は認められない。

表一 六 蛇行走行時の逸脱の有無

走行速度 (km/h)	S-GPS		D-GPS		RTK-GPS	
	直線部①	直線部②	直線部①	直線部②	直線部①	直線部②
10 ~ 30	×	×	○	○	○	○
備考	・表中の凡例は、以下のとおりとする。 ○：車線の逸脱なし ×：車線の逸脱あり					

3) 走行速度

速度計 (LC-1100) と各種 GPS による定速度時の比較図の例を図-4 に、車両加速時の速度計と各種 GPS による速度との関係を図-5 に示す。また、この図から次のことが言える。

- ①S-GPS は、図-4 から 25 km/h 以下であれば、ほぼ正確な値と判断される。
- ②D-GPS, RTK-GPS は図-4, 図-5 から 50 km/h 以下の範囲で、ほぼ正確な速度値であると判断される。

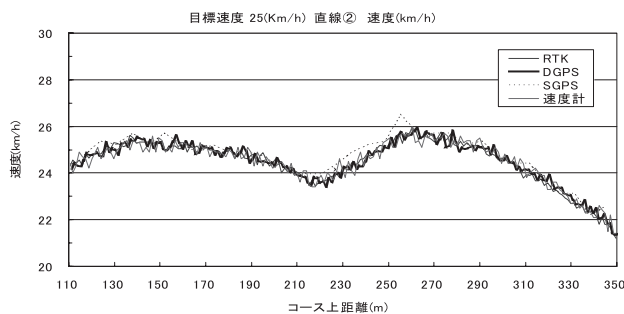


図-4 速度計と各種 GPS による速度比較例

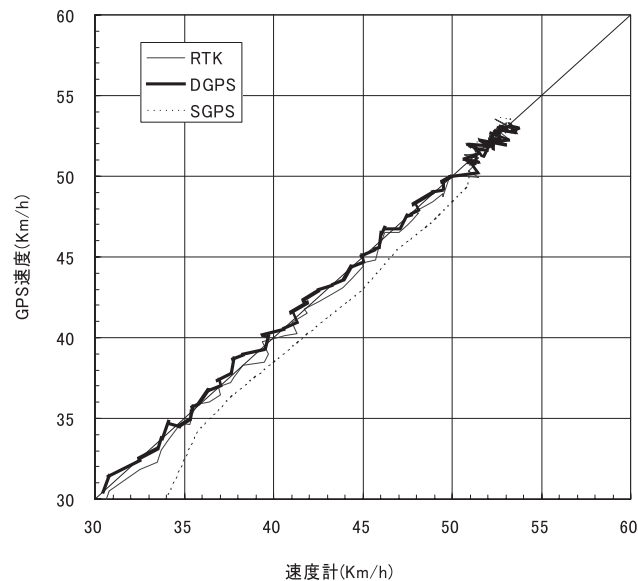


図-5 速度計と各種 GPS による速度との関係 (加速時)

(4) まとめ

各種 GPS を用いた自己位置の測定精度 (水平精度) について、各種の基礎実験を行った結果は、次のとおりであった。

- ①RTK-GPS は、センターライン走行の軌跡から動的測位でも再現性があり、基準データとして十分な精度を有する。
- ②S-GPS は、道路横断方向に対して最小で約 1.0 m 最

大で約 6.0 m の誤差を生じ、片側車線内走行や蛇行走行では車線から逸脱する。

- ③D-GPS は、道路横断方向に対し、最小で約 0.1 m、最大で約 1.0 m の誤差となったが、片側車線走行や蛇行走行では、車線から逸脱することはなかった。
- ④D-GPS, RTK-GPS による走行速度は、50 km/h 以下であれば、ほぼ正確な値と判断される。

以上のことから、草刈機のベースマシン位置を把握するシステムを構築するためには、取扱が簡易で、適切な精度を有し、経済的な D-GPS (GPS コンパス) の適用が有効と考えられる。

2.2 D-GPS を用いた草刈機の稼働状態把握システムの検討

(1) 検討概要

草刈作業試験時の省力化を目的に、現在開発中の無人・有人対応型草刈機に D-GPS, 角度計, AE センサ, 無線 LAN 等を搭載し、遠隔の連絡車内で計測データを無線 LAN で受信することにより、草刈作業の稼働状況をリアルタイムで管理用パソコンの画面に表示するシステムの開発検討を行った。

(2) 検討方法

1) 搭載対象とした草刈機 (開発機)

開発機は、急斜面では転倒時に人的被害を回避するため無人運転を行い、緩斜面では緻密で効率の高い有人運転が行える草刈機で、有効刈幅および走行性能は次のとおりである。

- ・有効刈幅 ; 1,525 mm
- ・最大走行速度 ; 6.5 km/h

2) 測定項目と測定方法および主な仕様

草刈作業における作業試験時の省力化のため、稼働状態を把握するための測定項目と測定方法およびセンサの種類と主な仕様を表-7 にまとめて示す。

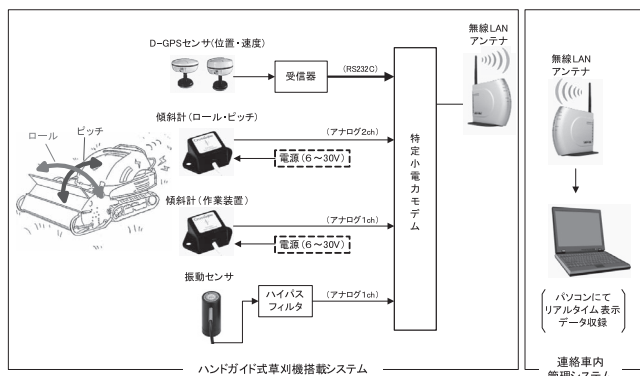
3) 計測システムの構成

計測システムは、図-6 に示すように草刈機搭載のシステムとリアルタイムで表示・データ収録する連絡車内の管理システムで構成する。

また、車内の管理 (計測・表示) システムは図-7 に示すように現地にて推定作業範囲のローカル座標を設定することによって、草刈機の位置や作業状態をリアルタイムに区画全体 (或いは、草刈機から半径 30 m を選択) の軌跡を表示可能な計測・表示ソフトを開発した。なお、画面の表示は機械の端線、中心線、塗りによる軌跡が選択できるものとした。

表一七 測定項目と測定方法および主な仕様（案）

測定項目	測定方法	センサの種類	数量 (ch 数)	型名	主な仕様
①位置 (軌跡)	ハンドガイド式草刈機に D-GPS を搭載し、その位置情報、速度データを利用して、草刈機の運行状況をリアルタイム表示する。	D-GPS	1 セット	(株)ヘミスフィア Crescent Vector VS100	<ul style="list-style-type: none"> ・SBAS によるディファレンシャル補正機能 ・高速出力頻度；最大 20 Hz ・SBAS 利用で 60 cm (95%) 以下
②速度					
③作業距離					
④法面の傾斜	草刈機本体に傾斜計 (2 軸) を装着し、作業中の車体の傾き (ロール、ピッチ) を検出する。	傾斜計	1 台 (2 ch)	SEIKA 社 NG4i	<ul style="list-style-type: none"> ・計測レンジ± 80 度 ・出力；4 ~ 20 mA
⑤作業機の状態 (フローティング)	作業機本体に傾斜計を装着し、作業機のフローティング ON/OFF を検出する。	傾斜計	1 台 (1 ch)	同上	・同上
⑥刈刃の状態	刈刃の回転 (動作) 状態を振動センサ等を用いて検出する。	振動センサ (AE センサ)	1 台	CMI 製	・出力；0 ~ 数 V
備考	① RS232C ↔ LAN 変換器；MOXA 社, NPort5110 ② AD 変換器；MCI エンジニアリング, LX-1816ADC, 入力レンジ± 10 V, 分解能 16 bit ③無線 LAN (草刈機側)；BUFFALO 社, WZR2-G300N, 2.4 GHz 帯 ④無線 LAN (連絡車側)；BUFFALO 社, WLE-NDR, 2.4 GHz 帯 ⑤データ収録装置 (パソコン, 草刈機稼働状態把握ソフト)				



図一六 D-GPS を用いた自動計測システムの構成

(3) 開発した自動計測システムおよび計測・表示ソフトの検証

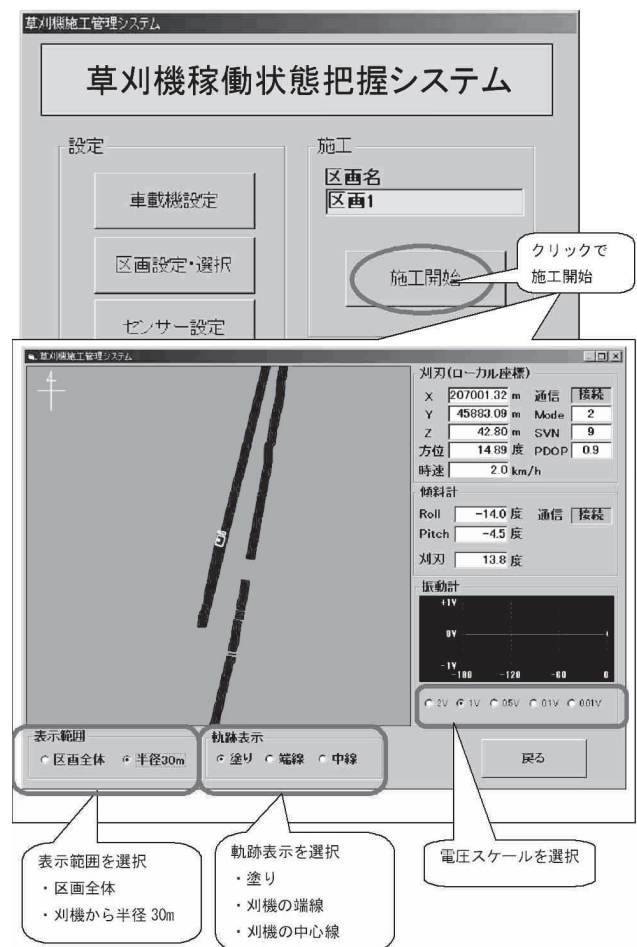
開発機に自動計測システムを搭載し、研究所構内にて計測・表示ソフトを用いた基礎実験を行った。その結果は、次のとおりである。

1) 車両速度, 移動距離 (D-GPS)

項目	実測値	計測値	誤差	評価	
速度 (km/h)	アイドリング	2.4	2.4	0.0	良好
	低速	4.6	4.6	0.0	良好
	中速	6.1	6.1	0.0	良好
距離 (m)	200	200.3	0.3	良好	

2) 車両のピッチ方向の傾斜 (傾斜計)

状態	実測値 (度)	計測値 (度)	誤差 (度)	評価
静止	7.8 ~ 7.9	7.6 ~ 7.8	0.3	良好
走行	7.9	7.5 ~ 7.8	0.4	良好



図一七 開発した計測・表示ソフトの例

3) 作業機の状態（傾斜計）

<下げ>

状態	実測値 (度)	計測値 (度)	誤差 (度)	評価
静止	0.0	0.0	0.0	良好
走行	0.0	0.0	0.0	良好

<上げ (最大) >

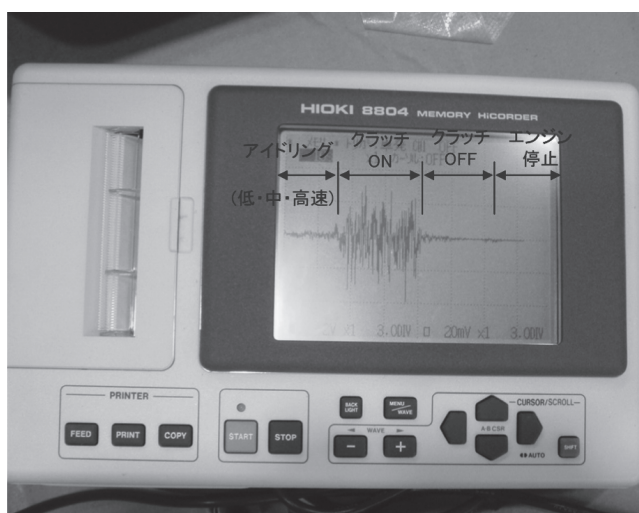
状態	実測値 (度)	計測値 (度)	誤差 (度)	評価
静止	16.8	16.8	0.0	良好
走行	—	17.1	0 ~ 0.3	ほぼ良好

4) 刈刃の回転状態（AE センサ；図—8 参照）

状態	クラッチ OFF	クラッチ ON	評価
静止	振幅小	振幅大	判別可

5) 表示ソフト

概ね、簡易な操作で使用できることを確認した。



図—8 刈刃の回転状態と AE センサ出力状況

3. あとがき

本検討の結果、計測・表示ソフトの開発については、簡易な使い方で運用できるシステムであることをほぼ確認できた。また、本システムは従来の高価な機器（RTK-GPS 等）システムや有料の測位補正データを使用せず、D-GPSを採用し、最も経済的（安価）なシステムとして構築したことが大きな特徴である。

今後は、実際の堤防法面勾配（約26～36°）条件下で、草刈機に搭載した状態（法面の勾配や凹凸による振動条件）で、D-GPSや各種センサの適用性と測定精度、さらに通信システム等を検証することにより、従来の局所的な管理から、連続的な計測データによる管理とすることで、より効率的、合理的な施工調査手法の確立を目指せるものと考えている。

最後に、本開発の実施にあたり、ご協力頂いた西尾レント(株)、(株)シンクウェアの関係者の方々にお礼を申し上げます。

J C M A

[筆者紹介]

榎園 正義（えのきぞの まさよし）
 (株)日本建設機械化協会
 施工技術総合研究所
 研究第四部 技術課長

