特集≫≫ 災害対応，災害復旧・復興

振動ローラの自律走行の実証

建設技術研究開発助成制度を活用した次世代無人化施工システムの開発

青 木 浩 章

従来の無人化施工は，建設機械のオペレータが作業機械及び機械周辺に設置された複数の動画カメラの映像を見ながら，絶えず操縦桿を操作する映像に依存したラジコン型操作である。従って，操作の熟練度・カメラ車など複数の支援機械・動画伝送のための高速通信網などが必要であった。それに対し，作業機械に人間の五感に代わるセンサ類を搭載し，得られたセンサ情報を基に機械自ら判断・作業する自律制御型の無人化施工機械により，先述の問題を解決する未来型の無人化施工システムを研究・開発した。

本研究開発は，平成 24 ～ 26 年度と継続採択されている「国土交通省建設技術研究開発助成制度」を活用しているものである。本稿では平成 25 年度に実証した安価な MEMS 装置を搭載し，独自の自律制御アルゴリズムにより複雑な挙動を示すアーティキュレート型の走行機構を持つ 11 t 級の振動ローラの転圧走行について，従来の無人化施工における転圧走行と比較しても遜色の無い走行をした事について述べる。

キーワード：無人化施工，自律制御，MEMS センサ，慣性航法，アーティキュレート機構

1. はじめに

無人化施工は，雲仙普賢岳（長崎県）や有珠山（北海道）といった火山関連の災害復旧や，全国各地の台風・豪雨後の土砂災害復旧工事等の自然災害復旧等に適用されている。無人化施工は，主に雲仙普賢岳の復旧工事で 90 年代中盤から現在も継続的に実施されており，施工技術発展の大きな原動力となっている。施工機械の開発や，ICT 機器の普及もあって施工技術は年々発展しており，経過・特徴は下記の通りである。なお，雲仙普賢岳は 1990 年代初頭の災害であったため，当初から第 2 世代程度の技術を適用して施工していた。

・第 1 世代…　～ 1990 年（直接操作方式）
　：目視による遠隔操作
・第 2 世代…　～ 2000 年（モニタ操作方式）
　：カメラ映像を用いた遠隔操作
・第 3 世代…　～ 2006 年（情報化施工方式）
　：GPS や TS による測位技術と設計データを利用したソフトウェア支援による遠隔操作
・第 4 世代…　～現在（ネットワーク型遠隔操作方式）
　：情報化施工に対応した通信方式を導入し，通信範囲や伝送情報が拡張した現在の主流となる方式

90 年代中盤より前記の雲仙普賢岳や有珠山等で無人化施工を行っており，施工面はもちろん，技術面・経済面・安全面等の様々な場面を経験しているが，この無人化施工技術が災害復旧等に対して盤石な技術と言い切れるかというところに疑問を持っている。

また，雲仙普賢岳では所期の目的を果たしているが，将来（次世代）に向けて更なる劣悪環境に対応する無人化施工技術が必要であるという思いから，「次世代無人化施工システムの開発」を課題に，社会へ有効に還元される事を目標に取り組んでいる。

2. 研究の背景

(1) 無人化施工の概要

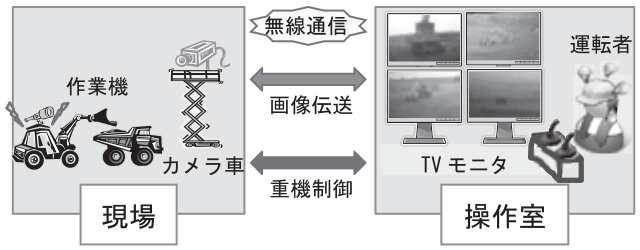
無人化施工は，ラジコンで建設機械を操作する無線操縦システムと，オペレータが建設機械を操作して作業するのに必要な現場周辺の画像を伝送する画像伝送システムの 2 つを組み合わせて，安全な場所から建設機械を遠隔操作して作業を行うことである（**図―1**）。1994 年の雲仙普賢岳の噴火災害復旧工事では，どちらのシステムも確立された技術ではなかったため，雲仙普賢岳の復旧と共に様々な技術を考案し，問題を解決しながら，無人化施工技術として確立してきた[1)]。

(2) 現在の無人化施工の問題点と自律型制御

現在，長崎県雲仙普賢岳等で行われている無人化施工は，現場から送られてくる建設機械の作業状況の映

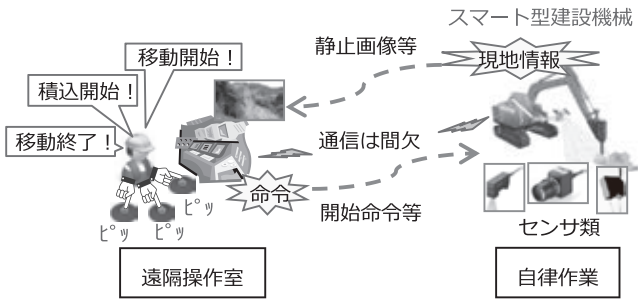
図―１　無人化施工のイメージ

像を複数のモニタ画面を見ながら遠隔操作を行うため，オペレータは作業箇所周囲の状況を直接五感で感じながら操作する事が出来ない。したがって，有人施工とは違った運転技術が必要となり，オペレータの技量によって作業の出来が大きく異なることもあるため，緊急な現場や複雑な操作を必要とする状況には対応が困難である。また，複数の画像取得のための装置と通信環境が必要といった点も無人化施工適用の障害となっている。さらに，こういった技術を継承する現場自体も少ないのが現状で，このままでは今後の自然災害等の対応を，無人化施工にて対応する事が厳しくなると目される（**図―２**）。



図―２　従来型無人化施工（モニター方式）

そこで，前述の問題を解解決するために，作業機械に人間の五感に代わるセンサ類を搭載し，作業開始命令を与えれば自ら判断して作業を行う「自律制御技術」を適用した次世代型の無人化施工システムの開発を行う（**図―３**）。



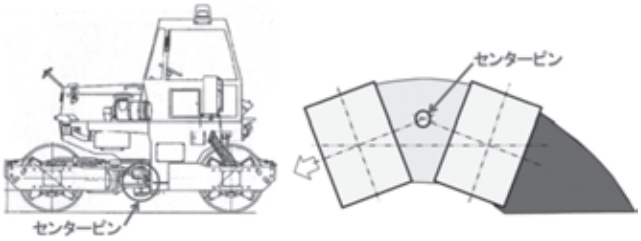
図―３　次世代型無人化施工

これにより，機械が自ら判断して作業を行うため常時操作が不要となり，従来より簡単操作となる。また，多角的な映像が不要となりカメラ車といった支援機器が削減されるため，通信量も削減できる。本編は，平成 25 年度に実証した振動ローラの自律走行について述べるもので，独自の自律制御アルゴリズムによる自律走行精度，車体中央の屈曲点を関節として操舵するアーティキュレート機構の機械制御に加え，走行中の振動がセンサ類の機械装置や制御にどのような影響を与えるのかが研究の要点であった。

3. 振動ローラの作業分析

(1) 構造上の特徴

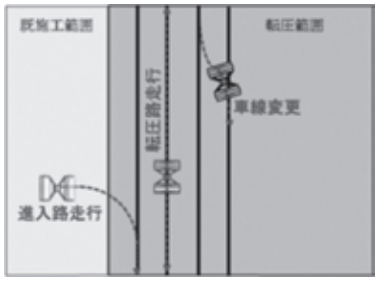
振動ローラ固有の特徴として，鉄輪を振動させて地面を転圧する点が挙げられる。そのため，設置機器には耐振動・耐衝撃性などが必要となる。また，ステアリングがアーティキュレート機構のため，ステアリングが変化した際に，前後輪が変化するため機体の方向はステアリング角度に向かず，地面と鉄輪との間の摩擦を無視した場合，ステアリング角度の 1/2 の方向となる。これは，転動時に前後輪が同一軌跡を通るようにするためである[2]（**図―４**）。そのため，前後輪が同じ角度変化することを，後述する自律走行アルゴリズムに反映した。



図―４　アーティキュレート型

(2) 自律走行アルゴリズム

振動ローラの施工中の走行は，進入路走行，転圧路（1 レーン）走行，車線変更に分類することができる（**図―５**）。進入路走行とは転圧エリアに進入する走行の

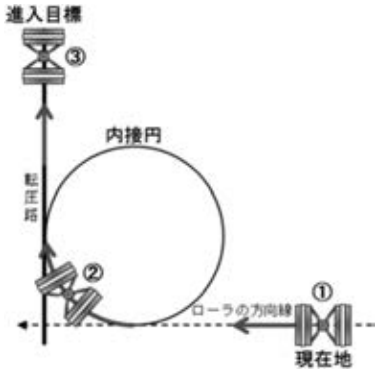


図―５　振動ローラの走行経路の種類

ことである。また，転圧路走行とは，転圧作業にともなう1レーンの前後進の走行であり，車線変更とは1レーン終了後に2レーン目に移動することを指す。今回は，これらの走行経路の種類を個別にアルゴリズム化した。

（a）進入路走行

振動ローラは，転圧エリア内を前後進して転圧を行うため，転圧路に進入した際にローラの方向線と転圧路が平行になることが望ましい。そのため，振動ローラの進入経路は，振動ローラの方向線と転圧路に内接する円を用いて算出する方法とした（**図**―6）。これにより，現在地から振動ローラは，ローラの方向線と内接円が接する点まで前進し内接円上を通過するだけで，ローラの方向線と転圧路が平行な状態で転圧路に進入することが可能となる。



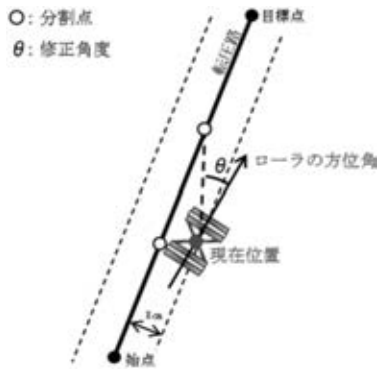
図―6　内接円を用いた進入

（b）転圧路走行

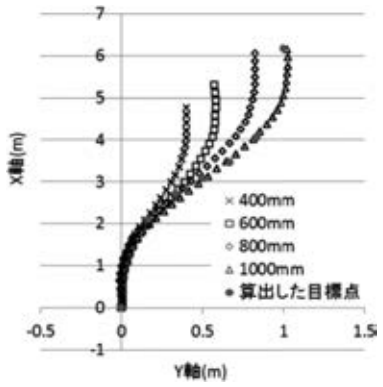
振動ローラは，転圧のムラを無くすために，1レーンの同じ範囲を転圧回数分だけ前後進する必要があり，計画した転圧路から機体の位置が大きくずれた場合は施工ムラができる。そのため，計画した転圧路と機体の位置が近い場合は，目標点に機体の方向を向けて走行し，転圧路と機体の位置が遠く離れてしまった場合には，ステアリングを大きく曲げて転圧路上に最短距離で戻すアルゴリズムとした（**図**―7）。また，1レーンの始点と目標点間が長い場合には，目標点に向かって走行した際に修正が遅くなってしまうため，分割点を設けることにより適切に機体の位置を修正できるようにした。

（c）車線変更

次レーンへの車線変更は進入路走行と同様，機体の方向が次レーンの方向と一致する事が望ましい。よって，相応の曲率と曲線長を持ったS字カーブを描きながら車線変更を行う事とした。**図**―8は車線変更幅400・600・800･1000 mmの走行軌跡である。



図―7　転圧路走行の制御



図―8　走行軌跡と計算値

（d）アルゴリズムの問題点と解決方法

進入路走行，転圧路走行，車線変更のアルゴリズムを用いて振動ローラの自律走行を行った結果，以下の問題が発生した。

①ステアリングの制御指令角度の値が細かく制御周期が早いため，次々と変わる制御指令角度にステアリングが追従し，激しく左右に動いた。

②機体の方向が目標点から外れているにも関わらずステアリング制御が行われない。

③障害物が発生した際の回避方法。

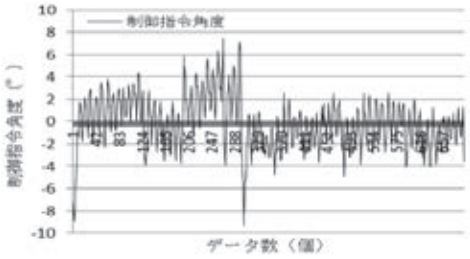
上記の問題を解決するために，以下のアルゴリズムを構築した。

・閾値を用いた角度制御

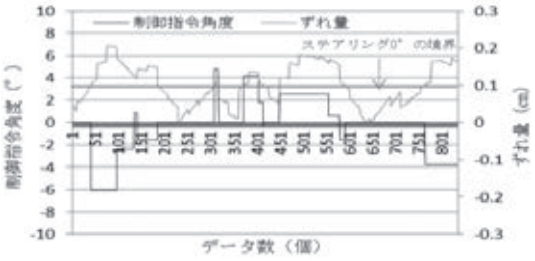
ステアリングが左右に激しく変化する現象（**図**―9）の対処方法として，制御指令角度が一定角度以上変化した場合のみ制御命令を行うように閾値を設けた。しかし，これだけでは機体が転圧路上に乗った場合に，一定角度で転圧路上から外れてしまうため，転圧路上に機体が乗っている場合は，ステアリング角度が0°になるようにした（**図**―10）。

・プリズム位置の補正

機体の方向が目標点から外れているにも関わらずステアリング制御を行わない原因として，プリズム位置が影響を与えていることが判明した。**図**―11に示す

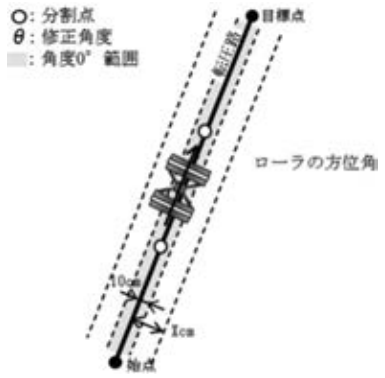


（閾値無し）

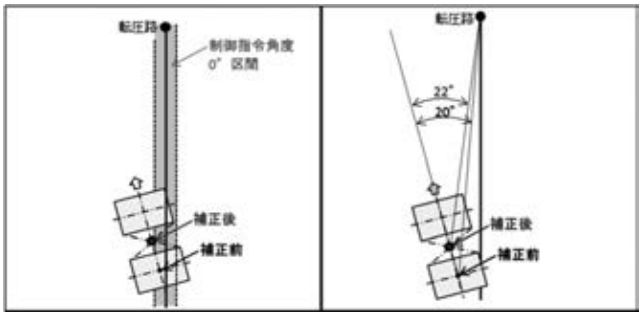


（閾値あり）

図―９　閾値を用いた角度制御



図―10　ステアリング 0° 範囲



図―11　プリズム位置の補正

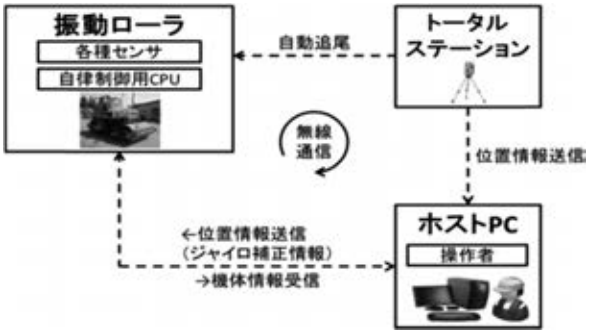
ように，プリズム位置が制御指令角度 0° 範囲内の場合，機体の方向が外れているにも関わらず，ステアリング 0° で走行を続ける。また，振動ローラはセンターピンの位置でステアリングが曲がるため，センターピンの位置を基準に修正角度を算出する必要がありプリズム位置が鉄輪の上では，正しい修正角度が算出されないことも判明した。これらの，対処方法として機体に設置したプリズムの位置をセンターピンの真上になるように位置補正を行った。

4. 振動ローラの自律走行システム

本研究では，開発したアルゴリズムを以下のシステムに実装した。また，振動ローラの自律化を行うためにはセンサが必要であり，選定したセンサおよび選定基準を以下に記す。

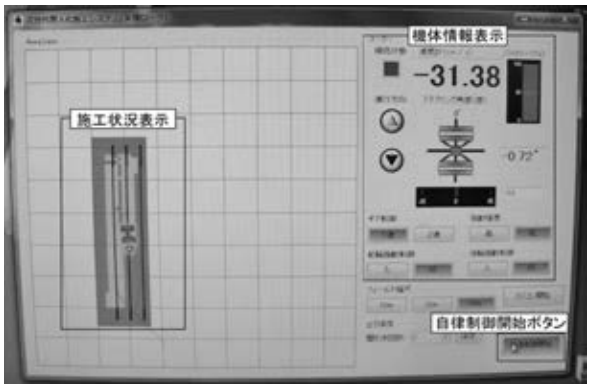
(1) システム概要

本システムの構成を**図**―12 に示す。トータルステーション（以下 TS と記），振動ローラ（11 t 級），ホスト PC で構成されており，機器間は Wi-Fi で通信を行う。TS はジャイロ補正情報取得のため，常時測距を行いホスト PC 側に位置情報を送信している。一方，振動ローラでは自律制御用 CPU にて，取得したセンサ情報を基に駆動部の制御量の演算を行い，更にホスト PC から送信されてくる情報を基にジャイロ補正を演算し，振動ローラを目標へ自己誘導を行う「慣性航法」にて走行～転圧作業を行う。



図―12　システム構成図

図―13 にホスト PC に表示される画面を示す。ホスト PC の表示画面では，振動ローラによる転圧回数における施工状況および振動ローラの機体情報を表示する。また，画面上のボタンにて，振動ローラに自律制御開始命令を送信することができる。



図―13　ホスト PC 表示画面

(2) センサの選定

今回実証に使った振動ローラには，人間の五感に代わる以下のセンサ等の機器を搭載した（**図―14**）。実機は，これらセンサ情報等を簡単に制御に反映できるよう，油圧弁制御が電子制御型となっている機体として，雲仙普賢岳等で実際に使用している遠隔操作仕様の 11 t 級の振動ローラを使用した。

以下に，振動ローラ（11 t 級）に搭載したセンサおよび選定基準を示す。

―搭載センサ―

・姿勢検出センサ（MEMS 型ジャイロ）
　：姿勢検出角度は± 30° 以上とする。
・速度検出センサ（ロータリーエンコーダ）
　：検出速度は 3 km/h 以上とする。
・ステア角度検出センサ（ポテンショメータ）
　：検出角度は± 60°（絶対角）以上とする。
・前方探査センサ（2D スキャナ）
　：検出範囲は前方および後方 3 m とする。
・車載カメラ（ネットワークカメラ）
　：設置条件として雲台を設置する。
・全周プリズム（トータルステーション）
　：測定距離として自動追尾が 30 m 以上可能なものとする。

5. 振動ローラの自律走行の実証

(1) 検証実験

本システムの自律走行精度を検証するための実験を行った。以下に設定した施工条件を示す。また，**写真―1** に実証実験の様子を示す。

・転圧回数：有振動 2 回／レーン
・レーン長：25 m
・転圧路：3 レーン
・施工重複幅：0 mm

写真―1　実証実験の様子

・走行速度：1 km/h

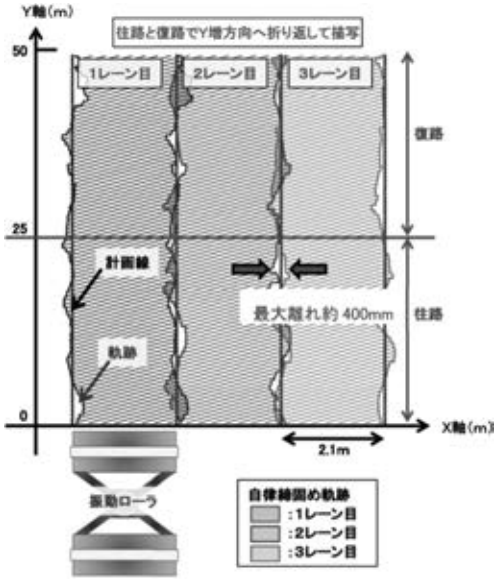
(2) 実験結果

有振動と無振動の自律作業を比較した結果，走行精度に大差はなく，搭載センサ類の耐振動性も十分であった。また，アーティキュレート機構の機械制御においては，車体中央が屈曲する際に前後輪間で発生する不規則な挙動を，演算を工夫することで制御を行うことができた。

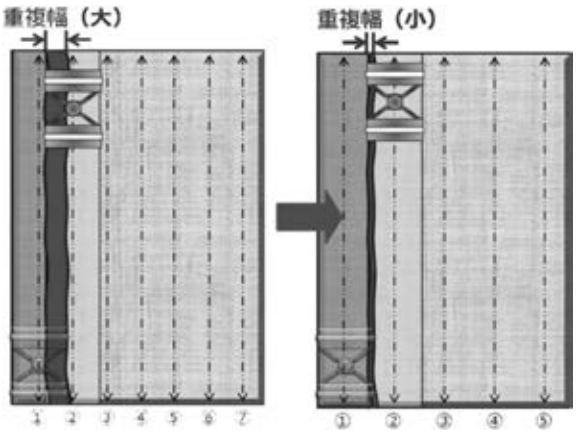
さらに，**図―15** に示すように，隣り合う 2 つのレーン間の最大離れ（未転圧幅の最大値）は，約 400 mm であった。そのため，現在の無人化施工における振動ローラの施工重複幅の基準が 500 mm（雲仙普賢岳周辺砂防ダム等特記仕様書等より）であることから，本システムを導入すれば現行の施工重複幅を 20％程度減らすことが可能である。その結果，走行レーン数が減るため施工効率が向上すると考えられる。**図―16** に施工効率向上のイメージ図を示す。

今回の実証で，アーティキュレート機構の建設機械において，安価な MEMS ジャイロを使用した場合でも，独自の自律制御アルゴリズムを用いることによって遠隔操作時と同等以上の走行ができる事が確認でき

図―14　振動ローラと搭載センサ



図―15　走行軌跡



図―16　施工効率向上のイメージ

た。ただし，今回は無人化施工仕様の振動ローラを使ったため，油圧制御が単純な ON-OFF 制御となっていた。理想的にはステアリングの油圧シリンダに比例制御を採用すれば，更なる走行精度の向上が期待できると考えられる。

6. 油圧ショベルの割岩作業について

また，本稿で述べた平成 25 年度に実証した振動ローラの自律走行に引き続き，平成 26 年度は油圧ショベルの割岩作業の自律制御化の研究を行っている。油圧ショベルは先端のアタッチメントを交換することで，多様な作業が可能となる大変便利な機械である。遠隔操作による無人化施工においても，アタッチメントを交換してコンクリート構造物の破砕・圧砕，鉄骨・配管等の切断はもちろん，緑化のための大型樹木の把持やロボットアームとして資材の移動等にも用いられている。大半の運転者は，バケット作業においては扱うものが土砂であることから，操作の正確性は高く要求されないため短時間で適応できる傾向にあるが，バケット以外の作業への適応については，扱うものが製品であったり，カメラ映像を見ながら土砂取扱い時以上の正確性を求められる事に難を持っている者が少なくない。そこで，無人化施工において油圧ショベルのアタッチメントで最も使用頻度がある「ジャイアントブレーカー」の割岩作業に注目して研究のターゲットとした。本原稿の執筆時点では実験中で，熟練運転手と自律制御の作業時間の比較も行っている（**写真**―2）。

写真―2　小型油圧ショベルを用いた室内実験

7. おわりに

無人化施工技術は，雲仙普賢岳等で行ってきた除石工・砂防堰堤構築等の土木工事の施工技術だけではなく，あらゆる酷所環境下における作業技術として多用され，改良・発展していくことが期待されている。しかしながら，適用工事は一般工事と比べて格段に少ないため，熟練者不足対応や対応建設機械・設備の所有のあり方等について，施工者側が躊躇せざるを得ない状況もある。近年，国土交通省は各地方整備局に油圧ショベル等の遠隔操作式重機を配置し，災害発生時における活用を行うようになっている（**写真**―3）。2014 年 6 月に施工した，和歌山県伊都郡かつらぎ町にて発生した土砂崩れによる国道復旧工事において，発注者の和歌山県は，早期復旧のため半崩落斜面下における作業に無人化施工を適用し，近畿地方整備局から機械貸与を受け無人化施工を無事成功させた。施工者としてはこういった課題に一石を投じるもので，大変有難い事例である。また，本稿で述べた自律制御式の無人化施工も，これらの課題に対応する技術の一つであり，今後も無人化施工技術が適正に維持され国土の安全・安心に寄与していくことを期待したい。

写真―３ 近畿地方整備局貸与機械による土砂災害復旧状況

謝 辞

本技術開発にあたり技術的な支援を頂いております産官学委員会メンバーに感謝の意を表します。

《参 考 文 献》

1）栗原庸聡・宮崎裕道・青木浩章・片山三郎：振動ローラの自律走行の実証，大成建設技術センター報，第 47 号，2014.
2）ローラー運転者特別教育用教本（締固め用機械），キャタピラー教習所㈱，20p.

［筆者紹介］
青木 浩章（あおき ひろあき）
大成建設㈱
技術センター土木技術開発部 先端技術開発室
建設 ICT チーム
課長