

緊急ブレーキ装置搭載コンバインド型振動ローラ (搭乗型 2.5 t/4 t クラス) の開発

コンバインドローラの作業環境に適した 79 GHz 帯ミリ波レーダ

遠藤 涼平・森岡 則雄

近年、自動車業界では緊急時の自動ブレーキが標準化へと向かっており、建設業界においても i-Construction の中で生産性を向上させる重要な要素として建設現場の安全性の向上が求められている。そのため、建設機械にも注意喚起システムだけではなく、緊急時に自動でブレーキを作動させる安全装置が開発、販売されている。しかしながら、施工作业が主となる建設機械では、緊急時のみ緊急停止できる安全性と通常作業時に従来通り作業ができる施工作业性の両立が重要かつ不可欠であり、緊急ブレーキ装置 Guardman シリーズの開発コンセプトとなっている。小型機種に該当するコンバインド型振動ローラ(搭乗型 2.5 t/4 t クラス)では、その使用環境や搭載環境などを考慮して検知センサに 79 GHz 帯ミリ波レーダを搭載することにより、「安全性と作業性の両立」を実現させた。

キーワード：安全装置、緊急ブレーキ、自動ブレーキ、転圧機械、舗装機械、ミリ波レーダ

1. はじめに

建設業における死亡災害件数は年々減少傾向にあるものの依然として、毎年およそ 300 件¹⁾も発生している。その中で、令和元年(平成 31 年)における締固め機械では、2 件¹⁾の死亡災害が発生しており、休業 4 日以上ケガを含めた場合、66 件¹⁾もの死傷災害が発生している。図-1 にその内訳割合を示す。締固め機械の事故の多くは、衝突・巻き込まれ事故に分類され、77%¹⁾も占めている。

締固め機械である転圧ローラの作業現場では、転圧ローラはゆっくりと動いており、一見危険な状況は少

なく見える。しかし、舗装作業時や端部の締固め作業時など、オペレータは常に転圧ローラの運転と路面品質の確認など、路面に注視して作業することが多く、また、周囲作業員も転圧ローラ近傍での作業が必要であり、お互いに注意をしても巻き込まれ事故を完全に防ぐことは難しい。また、重機の動作状況別の事故発生割合では、後進時²⁾がもっとも多くを占めており、転圧ローラにおいても後進作業時の巻き込み事故が多く発生している。

コンバインド型(搭乗型 2.5 t/4 t クラス)の振動ローラ(以下、コンバインドローラと称す)に着目すると、コンバインドローラは小型特殊自動車に分類され、車体が小さく運転がしやすいことから、意図せずに車速が速くなってしまうことがある。また、運転席からの視界性も良く、車両自体に圧迫感がないため、作業員が車両に接近して作業をしてしまうことがある。そのため、巻き込まれによる死傷災害は他の大型ローラと比較して多い傾向にあり、より安全性を重視した緊急ブレーキ装置の搭載が望まれていた。

一方で、前輪に鉄輪、後輪にタイヤを有しているコンバインドローラは、その利便性により小規模な舗装現場においては初期転圧から使用されることが多い。また、鉄輪やタイヤなどへの合材の付着を防ぐため、鉄輪やタイヤに適度に散水しながら転圧作業を行う必要がある。初期転圧では路面温度が高く、かつ鉄輪に比べてタイヤの場合は接地面積が大きいことから濃い

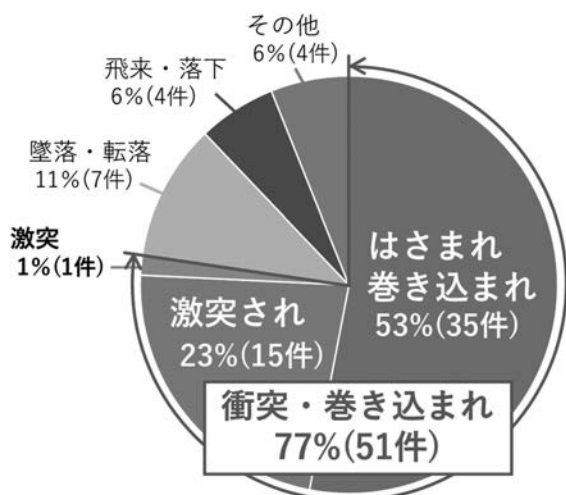


図-1 令和元年(平成 31 年)締固め機械の死傷災害発生割合¹⁾

湯気が発生し、特に寒冷時のアスファルト施工においては顕著である。

これらの理由により、従来、大型機種の転圧ローラで搭載されている緊急ブレーキ装置用の検知用センサとして使用されてきた光学系のセンサ（3D-LiDAR や TOF センサなど）を使用した場合、コンバインドローラの作業環境や小型機種の限られた搭載環境では十分な検知性能が得られないことが懸念された。そのため、コンバインドローラの緊急ブレーキ装置の開発にあたっては、作業環境に適した新たな検知用センサが必要となった。

2. 緊急ブレーキ装置の概要

緊急ブレーキ装置 Guardman は、緊急時の安全性向上を目的とした衝突被害軽減装置であり、安全性と作業性の両立を実現した緊急ブレーキシステムである。後進時に巻き込まれる恐れのある対象物（主に周囲の作業者など）を検知した場合、オペレータと進行方向の作業者に対して注意や警告を行う。それでも、オペレータや作業者が気づかずに回避行動ができない、または間に合わない場合には、緊急ブレーキが作動し転圧ローラを停止させ、衝突の回避もしくは被害の軽減をはかるものである。また、図-2 に示すように車両の作業速度に応じて、緊急ブレーキの作動位置を自動で調整させることにより、オペレータは従来通りの運転操作でより安全に作業を行うことができる。さらに、注意や警告を行う検知範囲も緊急ブレー

キの作動範囲と同様に車速に応じて自動で調整させることにより、警報が頻繁に鳴ることを抑制するとともに、作業者の警報に対する慣れや過信、システムへの信頼性の低下を防いでいる。その他、車両の停止方法には、HST ブレーキを採用しており、緊急ブレーキ作動時にも鉄輪やタイヤをロックさせずに停止させることで、施工路面への影響を必要最小限に抑えて、品質の低下を防ぐことができる。

新たに開発した4tクラスの緊急ブレーキ装置付コンバインドローラに搭載されている主要機器を図-3 に示す。なお、同じく2.5tクラスのコンバインドローラや、前後輪ともに鉄輪となる2.5tおよび4tクラスのタンデムローラの緊急ブレーキ装置付車両も同様のシステムとなっている。検知用センサは車両後端部から対象物までの距離を測定し、車速センサからの情報と合わせて制御コントローラにて、緊急ブレーキや警



図-3 コンバインドローラにおける緊急ブレーキ装置の主要機器

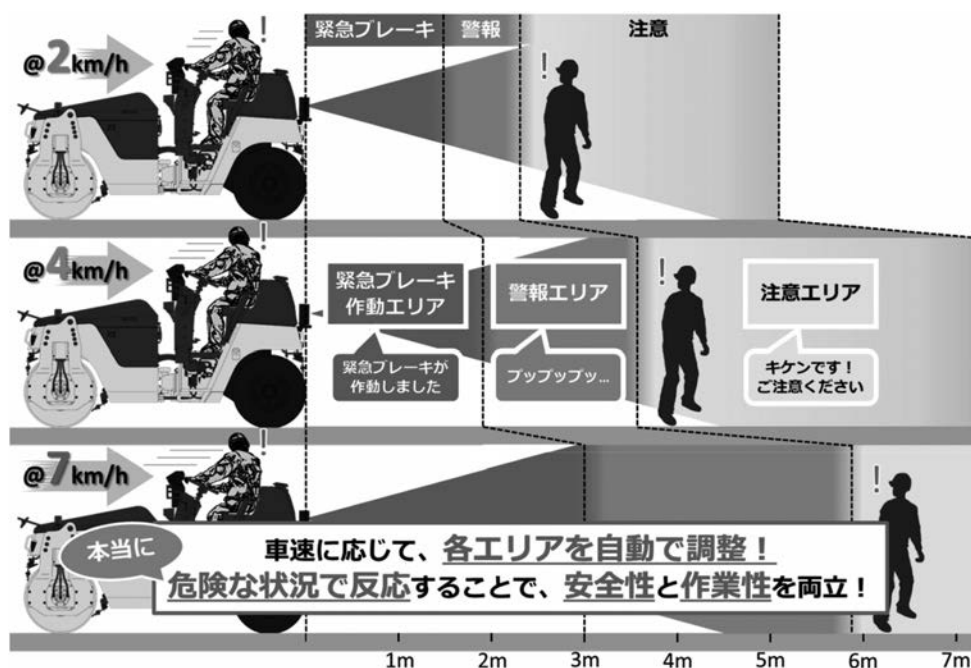


図-2 作業速度における緊急ブレーキの作動イメージ

報の作動を判断している。緊急ブレーキが作動した際には、制御コントローラから緊急ブレーキ用のバルブを制御し、HSTブレーキを作動させ、鉄輪やタイヤをロックさせずに停止させる。急勾配などの傾斜地などではHSTブレーキだけでは完全に停止することができないため、最終的にパーキングブレーキを作動させて車両を停止させる。また、振動ローラであるコンバインドローラでは、施工作业中にローラ部を振動させて施工作业を行うことがあるため、緊急ブレーキが作動した際には振動を自動でOFFにさせることで、施工路面への品質の低下を抑えている。運転席に搭載されているディスプレイでは、オペレータへシステムの状態を知らせる役割に加え、ボタンを操作することで緊急ブレーキ機能のモードを変更することができる。

これらのシステムは、大型機種の緊急ブレーキ装置付転圧ローラも同様であるが、大型機種では後方視界をより安全に確認しやすくするため、バックカメラを搭載している。また、従来では検知精度の高さから3D-LiDARを採用していたが、コンバインドローラの車両特有な作業環境や小型機種での搭載性を考慮し79 GHz帯ミリ波レーダを採用した。

3. 79 GHz帯ミリ波レーダの検知性能

(1) 各種センサの比較

コンバインドローラの開発当初、緊急ブレーキ装置の要となる対象物の検知センサは、下記の3つの方式を検討対象とした。

- ・カメラを使用した画像による物体検知
- ・LiDAR：同軸光学系方式（3D）
- ・ミリ波レーダ（24 GHz帯／77 GHz帯／79 GHz帯）

カメラによる人物検知システムでは、人や車両などを分けて検知することが出来るため、施工現場には非

常に有用である。しかしながら、カメラは可視光線を使用したパッシブセンサであり、外乱光により検知性能が大きく変化する。日中の工事では、朝・昼・夕などの太陽の位置、夜間工事では、車両の作業灯や周囲に設置された作業灯の影響などにより、十分に検知性能を発揮できないことが懸念されたため、開発時点では採用を見送った。

LiDARやミリ波レーダはアクティブセンサである。図-4に示すようにLiDARでは赤外域、ミリ波レーダでは電波を使用している。同軸光学系方式の3D-LiDARの場合、光源と受光部が分離している分離光学系方式やCCD/CMOSイメージセンサ方式のTOFカメラと異なり、光源と同軸上の受光部にて測距している。また、光源となる赤外線レーザーの角度を少しずつ変えており、1フレームに数千点も測定していることから高い耐外乱光性を有する。仮に直射日光があった場合にも、影響を受けるのは太陽光の入射と同軸になるわずか数点のみであり、残りの大多数の測定点は影響なく測定することができる。これは、長い筒を用いて任意の場所を覗いた場合に、少しでも角度が変わると見えなくなる原理と同じである。一方、ミリ波レーダの場合、電波を使用しているため、太陽光の影響をほぼ受けないことが知られている。そのため、3D-LiDARと同様に日中や夜間に関係なくセンシングすることが可能であり、転圧ローラの作業環境に適した検知センサである。

市販の自動車では、車両近傍の近距離用として24 GHz帯、前方などの中・遠距離用として77 GHz帯のミリ波レーダが多く採用されている。近年では、近・中距離用として24 GHz帯に置き換わる79 GHz帯ミリ波レーダが開発されているが、未だ市販車への搭載はわずかである。79 GHz帯ミリ波レーダは、図-5に示すように、24 GHz帯に比べて各分解能が高く、特に転圧ローラのような作業員までの距離が近い建設

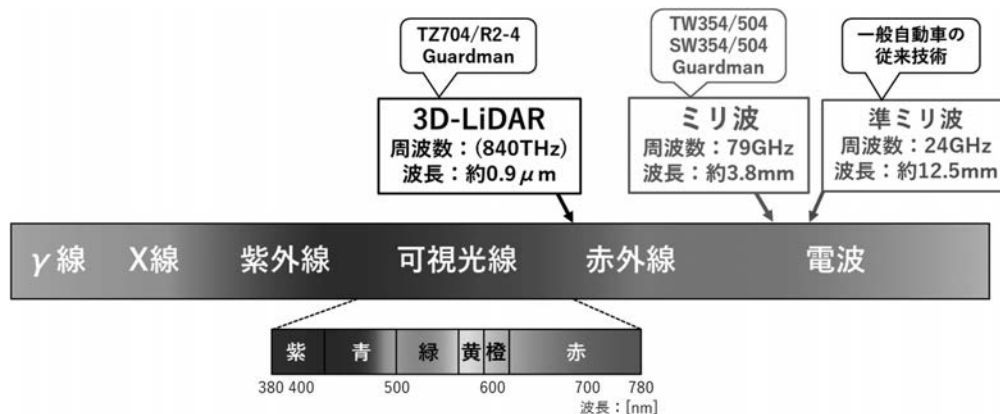
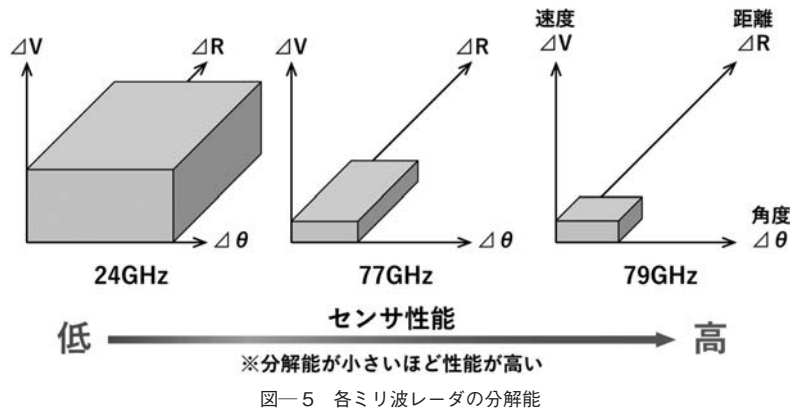


図-4 光と電磁波



機械において、対象物までの距離を精度よく測定することが出来る高性能なミリ波レーダである。

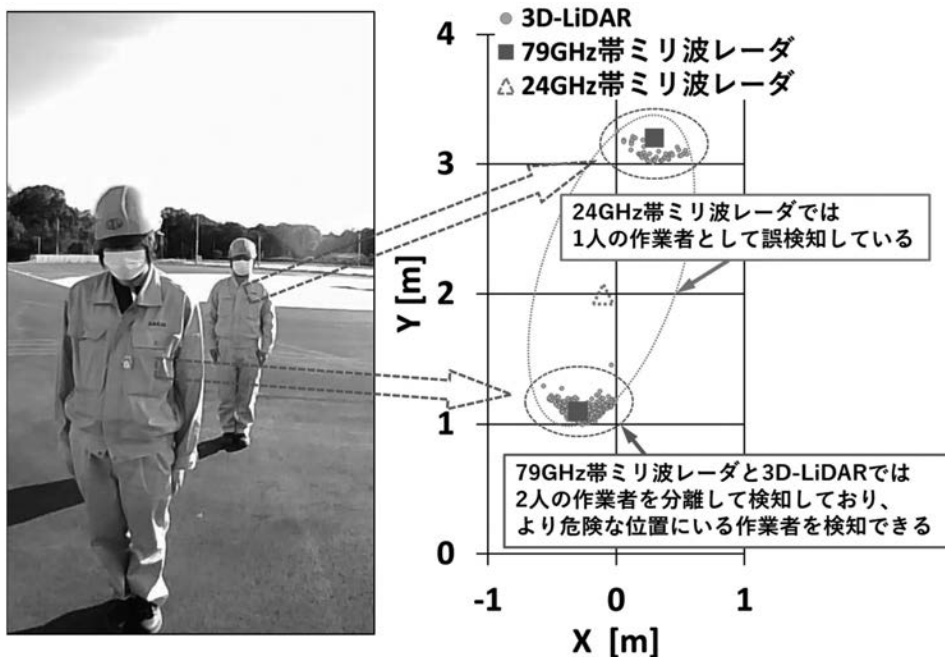
(2) 複数の対象物における検知精度

従来からの 24 GHz 帯ミリ波レーダの場合、単独の作業員や車両のみであれば、クリアに測定することが可能であった。しかし、転圧ローラの施工作业で想定される複数の人が密集して作業をしている場合や、複数の転圧ローラを使用して作業している現場、その他に転圧ローラの近傍に作業員がいる場合などでは、作業員をロストして認識できないことが多い。これは、角度分解能が低く距離の近い物体の分離が難しいことや、電波が反射しやすい対象物（転圧ローラなどの金属物体でレーダ反射断面積の大きいもの）に、一体化して検知してしまうことなどが要因に挙げられる。

一方で、高い分解能を持つ 79 GHz 帯ミリ波レーダは、このような複数の対象物を分離して測定すること

が可能である。さらに、コンバインドローラに搭載した 79 GHz 帯ミリ波レーダでは、より車両近傍の安全性を向上させるために 10 m 以下の近距離において、より精度の高い独自のアルゴリズムを開発・採用している。この 79 GHz 帯ミリ波レーダと 24 GHz 帯ミリ波レーダに加え、比較対象として、従来の 3D-LiDAR の測定結果を図一六に示す。なお、測定対象物は 2 人の作業員とし、検知センサから約 1 m の位置とそこから斜め後方約 2 m の位置に配置した。また、図中のグラフは横方向を x 軸とし、縦方向（奥行き）を y 軸とし、上面からの俯瞰視点で測定データを表している。

3D-LiDAR の測定データでは、2 人の作業員をそれぞれ点の集合体として測定しており、距離精度や作業員の大きさなどを高いレベルで認識できることがわかる。一方で、24 GHz 帯ミリ波レーダでは前述したように手前の作業員をロストしており、1 人の作業員（対



図一六 複数の対象物での検知性能

象物)として約2mの位置に誤検知していることがわかる。最後に、79GHz帯のミリ波レーダでは、2人の作業員(対象物)を分離して検知できており、3D-LiDARと比較すると位置精度が少し劣るものの、巻き込まれる恐れの高い危険な位置にいる手前の作業員を検知できることがわかった。そのため、緊急ブレーキ装置用の検知センサとして十分な検知性能を有していることがわかる。

(3) 濃い湯気が発生する環境下における検知性能

小型特殊自動車となるコンバインドローラでは、大型機種種の転圧ローラと比べて、車両の全高が低い。また、運転席の高さも低く、後方視界を遮らないようにするためには、検知センサをより低い位置に搭載する必要がある。一方で、前述したようにコンバインドローラ特有の作業環境では、路面から濃い湯気が発生することが多く、施工作业中の誤検知による車両停止や誤警報による信頼性の低下を防ぐためにも湯気による影響を検証する必要がある。

冬季の濃い湯気が発生した場合を模擬的に再現し、79GHz帯ミリ波レーダの測定結果に加え、従来の3D-LiDARと比較した試験結果を図7に示す。3D-LiDARでは1m以内に発生している濃い湯気と約2m付近にいる作業員までの距離を測定していることがわかる。従来の3D-LiDARを搭載した大型機種種では、このような湯気が発生した場合においては、湯気を実断、除去して作業員までの距離を測定することで誤検

知を抑制³⁾している。本試験においては、3D-LiDARを大型車両で搭載している比較的高い位置に設置して測定しており、実際にコンバインドローラの搭載を想定した場合には3D-LiDARの設置高さが低くなることから、さらに湯気の影響が大きくなり、十分な検知性能が得られないことがわかった。また、2D-LiDARやTOFカメラにおいてもこうした濃い湯気が発生した状況下では同様の状態となり、その測定原理から、同軸光学系方式の3D-LiDARを超える検知性能は得られないことが推定される。

一方で、79GHz帯ミリ波レーダでは、湯気を検知しないで透過しており、作業員のみをしっかりと検知していることがわかる。そのため、コンバインドローラの作業環境では79GHz帯ミリ波レーダを採用することで、高い信頼性をもつ検知性能と小型機種種における限られた搭載環境に適合することできた。その結果、小型機種種であるコンバインドローラにおいても緊急ブレーキシステムの開発コンセプトである安全性と作業性の両立を実現することができた。

4. おわりに

コンバインド型振動ローラ(搭乗型2.5t/4tクラス)では、その施工環境や小型機種種ならではの限られた搭載環境を考慮すると、従来大型機種種で搭載していた3D-LiDARを搭載するよりも79GHz帯ミリ波レーダを搭載することで、施工作业中に発生する濃い湯気な

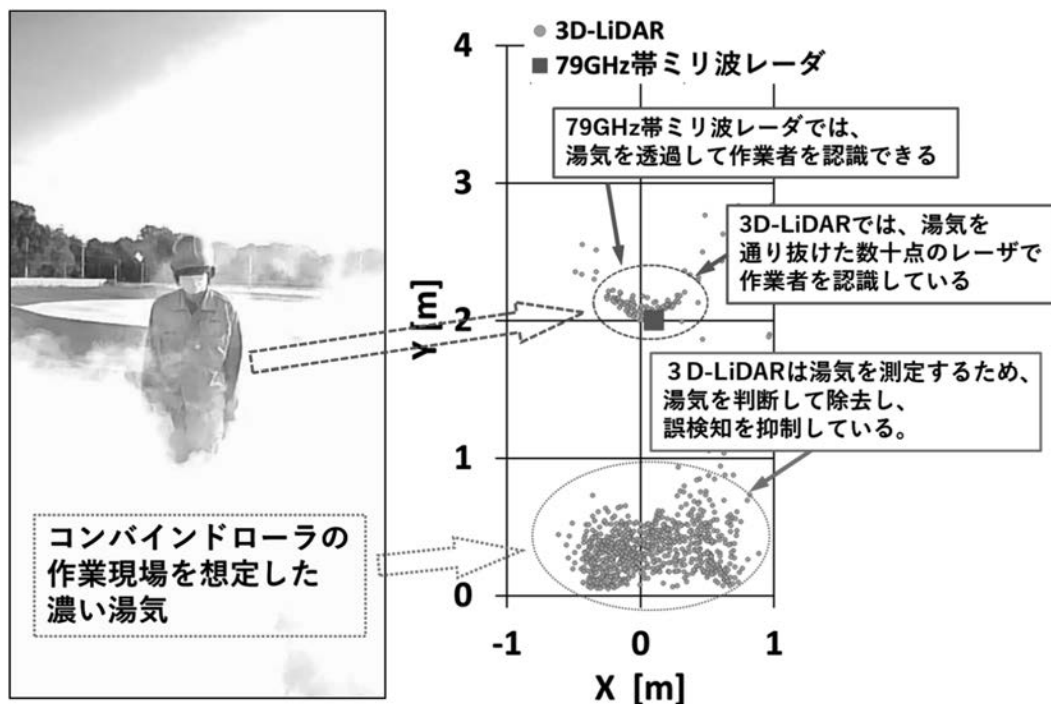


図7 濃い湯気が発生した場合の検知性能

どが発生した場合においても、湯気を透過してその先にいる作業者を検知することができる。そのため、誤検知や誤動作を抑制し、注意や警報の発報や緊急ブレーキの作動を本当に危険な状況下で発生させることで、高い信頼性を有する緊急ブレーキシステムを開発することができた。また、従来からの緊急ブレーキ装置 Guardman の開発コンセプトである「安全性と作業性の両立」を小型機種であるコンパインドローラにおいても実現することができた。

緊急ブレーキ装置にとって検知センサはシステムの要である。カメラ、LiDAR、ミリ波レーダなど様々な方式の検知センサがあるが、建設機械においては実際の施工環境や作業内容、そこに潜む危険な作業状況の他に、機械のサイズ、搭載性や視界性を考慮し、搭載車両に合わせた検知センサを採用することが重要である。また、昨今の乗用車における自動運転技術の発達により、検知センサも日進月歩に性能が向上しているため、今後も更なる安全性の向上を図るとともに、より高いレベルで施工性との両立ができる機械の開発に取り組む所存である。

しかしながら、安全性の向上につながる一番の対策は、作業員ひとりひとりの安全に対する意識である。「安全装置である緊急ブレーキ装置がついているから大丈夫」と慢心して機械に頼り過ぎては逆効果になる恐れもある。そのため、施工作业中に注意や警告が発

報した際や、もし緊急ブレーキが作動してしまう状況が発生してしまったときには、ヒヤリハット事例とし周知することで、改めて安全第一を思い出して頂き、その結果、施工現場における安全性を高めると同時に事故の発生を抑え、いずれは事故を撲滅させる一助になればと考えている。

JCMA

《参考文献》

- 1) 厚生労働省 職場のあんぜんサイト 労働災害統計「労働者死傷病報告」による死傷災害発生状況
- 2) 国土交通省 安全啓発リーフレット（令和元年度版）参考資料 P.2
- 3) 日本建設機械施工協会 安全性と施工性を両立させた緊急ブレーキ装置搭載タイヤローラの開発 令和元年度建設施工と建設機械シンポジウム論文集・梗概集 P.157

【筆者紹介】

遠藤 涼平（えんどう りょうへい）
酒井重工業(株)
開発本部 新技術開発部



森岡 則雄（もりおか のりお）
酒井重工業(株)
開発本部 製品開発部

