

歩行者の危険を「見える化」する ステレオカメラ型視認支援装置

西 篤 史・村 瀬 敦 啓

災害の見える化は、安全衛生の管理に携わる人々によって長らく追い求められてきたテーマである。約90年前にハインリッヒが見つけた災害損失の科学的法則性は、現代では数多の試算モデルへと発展し、人々に安全衛生管理が企業の将来への投資として認知されるための、大きな助けとなった。災害損失リスクの大きい建設業では、新技術の導入が積極的に進められている。本技術は、歩行者を危険から守り、その危険原を見える化することで、現場未経験者の生産性の向上、熟練者の就労長期化へと貢献することを目指したものである。

キーワード：労働災害、危険、見える化、ステレオカメラ、人検知、歩行者、ヒヤリハット、建設業

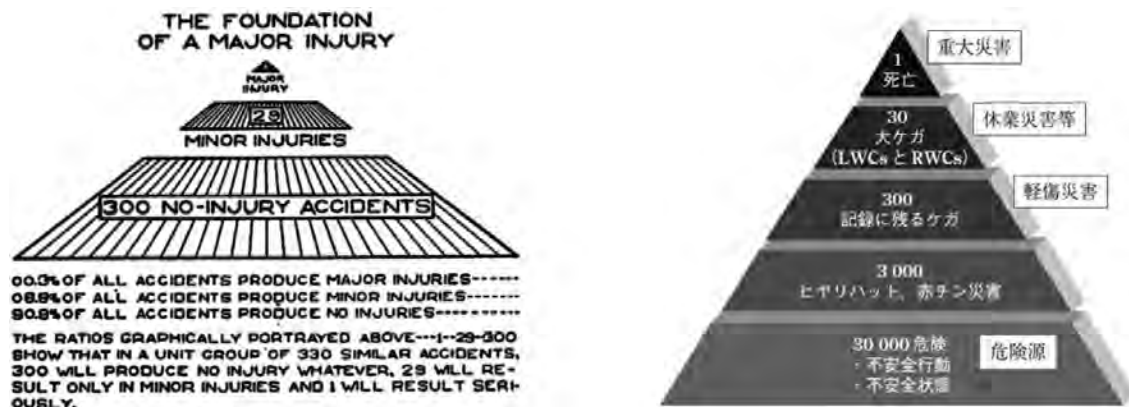
1. はじめに（市場背景）

「300：29：1の法則」と聞けば、多くの方がハインリッヒ（Herbert William Heinrich, 1881-1962）の名を思い浮かべるだろう。彼が所属していたのは、1864年に米国で初めて損害保険を始めた企業トラベラーズ損害保険である。後に「ハインリッヒの法則」と呼ばれる冒頭の法則を説くまでに、複数におよんだ彼の研究論文は、実に約1万件から7万5千件の事故データの分析が基となっている。三上（2011）¹⁾は、彼の1926年から1929年までの3つの論文報告の意義を、「災害の見える化」にあるとした。具体的には、労働災害のコスト、安全対策による効果、災害の規模分布を数値化することで、安全衛生に携わる人たちに活動の費用対効果について、科学的な認知を容易にした。これにより安全衛生活動は、安全担当者以外の現場職員に

とつてもその意義に対する理解が深まることとなり、より実践的な安全向上策へと繋がっていくのである。

先の法則は、別名災害ピラミッドと呼ばれることもある。デュボン(株)の代表取締役会長を務める W. Donald (2008)²⁾ は、図—1にて「300：29：1の法則」をさらに分解した災害ピラミッドを示し、記録に残る災害（重大災害、休業災害等、軽傷災害）は、その下の基礎部となっている危険原（ヒヤリハット、不安全行動、不安全状態）が積み重なった結果であることを指摘している。重大災害1件に対し、3,000件のヒヤリハット、30,000件の不安全状態が発生しており、これらの危険原を見えるようにすることが、現場職員の安全衛生行動の向上に繋がるとした。一層の危険原の見える化にはICT/IoTといった新技術が期待されている。

危険原を見える化し、災害リスクを抑えることは、



図—1 ハインリッヒの法則とデュボンの災害ピラミッド

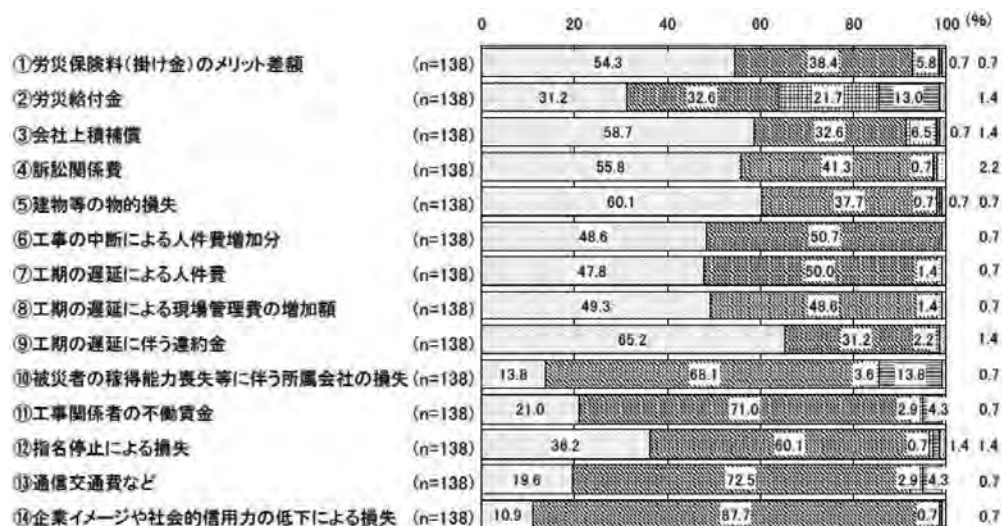
企業の事業継続性の向上に貢献する。ハインリッヒは企業にとって労働災害のコストは、機会コストなどの間接損失費を含めると、被災した労働者への補償額の4倍に相当するとし、「Rule of four」として有名になった。同様に、D. Reese (2015)³⁾は米・労働安全衛生局の調査レポートを引用し、企業が負う直接損失費と間接損失費の比率は1:1～20におよぶとして、間接損失費の影響力が大きいことを強調している。業種別の金額比でみると、米国の建設業における労働災害によるコスト試算の例(M. Waehrer 他, 2007)⁴⁾では、建設業の平均損失額(致死、休業、不休災害を含む)は被災者の家計生産性の低下による損失まで含めると約\$27,000、全産業の平均が約\$15,000と約2倍となっており、建設会社にとって安全衛生の管理は死活問題であるといえる。参考までに、致死災害における建設業の平均損失額は\$3,954,669である。

一方で、高木、嘉納(2008)⁵⁾は、我が国の建設業における労働災害損失額に関する研究(2008)において、図一2で示す通り、建設会社の多くが労働災害損失項目⑩から⑭といった間接損失費を把握できていない現状を指摘している。

企業の経営に与えるインパクトが斯くも大きく、しかもそのリスクの根っことなる部分の殆どが見えていない現状に対し、安全衛生管理を励行する企業は、会社の将来性への投資を続けているといっても過言ではない。特に建設業の場合、工事現場で労働災害が発生すると、複数の協力業者、周辺住民や近隣施設、道路

といった社会インフラや生活に、少なからぬ影響が発生する。建設業は地元のインフラを支える地域密着型の事業であることが多く、労働災害を抑えることで、企業価値の向上に繋がるといえる。米・National Safety Council (2014)⁶⁾は、労働災害と安全対策の効果に関する複数の事例に触れ、安全対策が死傷率を減らした結果を災害件数(あるいは被災者数)に換算し、その直接/間接損失費と投資費用を比較したところ、安全衛生への\$1の投資が、約\$2～6の効果があつたと報告した。この傾向は、災害損失費用の内、間接損失費比率の高い建設業や、安全衛生投資が不十分な企業などで大きくなるとも指摘している。

では、建設業においてはどのような安全支援装置が望ましいと言えるだろうか。日本建設機械施工協会の建設機械事故調査WG(2017)⁷⁾が157件の事故・災害事例をまとめた報告書によれば、現場における人と重機の分離を安全管理の基本とし徹底を進める一方で、現状は建設機械が単独で施工することはまれであり、人力による付帯作業と並行しての施工が多い実態を指摘している。事故・災害の発生要因の多くは、不用意な施工機械への接近や不安全な操作といった“人の行動”にあると分析した。さらに、人と施工機械との接触防止対策として、施工機械への①作業半径内(後方)に作業員を感知すると機械が停止する装置、の取付けや、⑦安全装置等は容易にオペレータが切り替えできない構造、を付加することを提言している。



- ☐ 企業の損失ととらえており、災害発生後にその金額や時間数、人工数などの数量を把握している
☐ 企業の損失と考えられるが、金額や時間数、人工数などの数量までは、特に把握していない
☐ 企業の損失とは考えられないが、金額や時間数、人工数などの数量は把握している
☐ 企業の損失ととらえておらず、金額や時間数、人工数などの数量も把握していない
☐ 不明

図一2 労働災害損失項目の認識と把握の状況

2. 現場の課題と安全支援技術

上記の提言に対し、従来の安全支援技術と、本論にて説明する新技術を比較し、新技術を導入するに至った背景を説明する。比較を行う前に、先の提言を振り返ることで要点を整理したい。災害・事故事例をまとめた報告書によれば、事故・災害の発生要因の多くが“人”と施工機械の接近といった状況の上に存在している。建設現場の現状を推し量るに、施工機械は常に新機能を搭載した最新鋭機ばかりで施工されるわけではなく、施工業者が保有する機械や、レンタルで調達した従来機械により作業が行われることが主流と言える。加えて、施工機械に標準で搭載されるバックカメラ等には、録画機能は含まれない。これは、安全衛生管理の進んだ建設現場において、その管理を更に進める上で必要となる危険原(ヒヤリハット, 不安全行動, 不安全状態)の検知やその後の分析には、従来技術の貢献は限定的であると考えられる。以上の3点を、建設現場が直面している課題の要点とした場合、新技術に必要な要件は以下の3点と考える。

- I. 歩行者を検知し、歩行者および施工機械の運転者に知らせる(場合によっては機械を止める)機能
- II. 施工機械の種類を問わず、システムの後付けを可能とする機能
- III. 危険な状況が発生した場合に、その状況を記録する機能

上記3つの観点を用いて、3つの従来技術と1つの新技術の比較を行う。

(1) 標準的なカメラ

一般的に、運転時の可視領域を拡大するために用いられる。後付けが容易で、ドライブレコーダーなど上位モデルでは状況の記録が可能となっているが、歩行者に対する警報は困難となっている。

(2) レーダー、超音波センサなど

全ての障害物を検知でき、多くの実績を持つ。一方で、歩行者と障害物の判別や記録には高度なプロセッサが必要となり、車両向けには一般的でない。せまい環境では警報が鳴り続けることがある。

(3) 無線通信式(電磁式、電波:タグ式)

壁に隠れている作業員も検知が可能で、不特定多数が出入りしない建設現場などに向く。システムの後付けも容易だが、結果を映像で確認できないことと、発信器を持たない危険原は捉えられない。

(4) 新技術・ステレオカメラ型視認支援装置(ブラクステール)

仏・原子力・代替エネルギー庁が開発した技術を

用い、対象物を立体的に捉え判断する。2015年より国内導入が始まり、歩行者の検知、システムの後付け、状況の記録に対応する。

ステレオカメラは、近年普及の著しいi-Constructionにおいて一般的になりつつあるPhotogrammetry(写真測量)の技術を用いており、視差情報を解析して被写体の寸法・形状・距離を求めることが可能な点から、上記の結果が得られた。技術の内容や効果については後述するものとし、改めて建設現場の課題とその解決策について振り返りたい。

3. 解決策

様々な状況で施工機械が使用される建設現場において、業務上の安全を確保するために解決されなければならない課題は前出の通りであるが、それらを解決するための機器類は、同時に以下のような制約をクリアするものが望ましいと言える。

- ・外的環境の影響を受けることなく、周辺機器に与える影響も少ないこと
- ・検知エリアや警報タイミングを細かく調整することで、状況に応じたリスクの許容範囲を変更し得ること
- ・簡単に使用できて管理しやすいもの

これらの要求を満たすことで誤報や低リスク警報を低減し、過剰な警報を避けることで、使用者にとって安全支援装置は有用なものとなり得る。本技術の特徴の一つが、過警報を避けることによる実用性の向上にある。

本技術は建設・土木現場に存在する資材や構造物などと作業員・歩行者を瞬時に判別し検知・警報のタイミングを任意に変更できることで、オペレータの感覚や実際のリスクと乖離した頻繁な警報を減らすことが可能である。このことは、オペレータの「警報への慣れ」や「思い込みによる判断」を低減する上でも非常に効果的である。オペレータにとって違和感が少ないことで、精度の低い警報が頻繁に鳴ることに対応する工数やストレスがなくなり作業効率の向上にも寄与する。

オペレータが置かれた環境や、経験年数の如何を問わず、その感覚に寄り添う形で効果を発揮することを目指す本技術は、「働き方改革」が推進される中において未経験者の早期戦力化、熟練者の就労長期化へ貢献する新たなテクノロジーの一翼となることが期待される。

4. 技術概要

ブラクステールは、高精度なステレオカメラを使用して取得した映像情報から、画像ピクセル毎の距離情報を取得することにより、対象物までの距離の他、対象物の立体形状・サイズを瞬時に把握することを動作原理としている。

フランス政府機関であるCEA（原子力・代替エネルギー庁）によって開発された映像認識アルゴリズムを使用して「立体形状」のみで「ヒト」の判別が可能であり、動作・衣服の色・体温などの情報は必要としない。このことにより、様々な現場で作業者の着衣や動作から受ける影響を低減し、気温などの作業環境からの影響を回避することで「ヒト」と「モノ」を分類することを可能にしている。

シンプルな機器構成かつ通信などを必要としない仕様を採用することで、スタンドアロンでの動作を実現しており、現場での管理が簡便であることと、確実な運用がなされることを設計の前提としている。

使用する情報が映像のみであることがTOFカメラなどと異なっており、対象物に対して光線や電波などを発射する必要がなく、極めて高速なリスク情報の取得が可能となっている。尚、基本的な機器構成について図—3にて、仕様については表—1にて示す。図—4は一般的な油圧ショベルにブラクステールを搭載した場合の検知範囲を図示化したものである。

本技術は様々な場所へ設置されることが想定されたことから、その構成機器は、ステレオカメラ、映像認識・解析を行うプロセッシング・ユニットを含むいずれの機器も防塵・防水仕様となっている。

高感度カメラは20ルクスでの動作が保障されてお

り、土木学会・トンネル標準示方書（切羽作業70ルクス以上、通路の最暗部20ルクス程度）に基づくような暗い現場環境下でも動作する。

録画機能を保有し、検知範囲AまたはBにおける検知イベントを通じて、警報が発生した状況の動画を外部へ出力することが可能となっている。この機能により、使用者または安全担当者はいつ、どこで、どの

①ブザー付モニター



②プロセッシング・ユニット



③ステレオカメラ



図—3 1カメラ、1モニターによる機器構成

表—1 仕様

検知方式	ステレオカメラによる3D画像認識技術
電源電圧	DC12～24V
最大検知距離	奥行き：0.3～6m、横幅：4m
使用照度	標準センサ：100（推奨300）～80,000 Lux 高感度センサ（オプション）：20～80,000 Lux
検知角度	120（H）×90°（V）
センサーヘッド （ステレオカメラ）	使用温度：－40～75℃ 保護等級：IP69K 耐衝撃・耐振動性能：50G 寸法：262（W）×122（D）×133（H）mm（フード含む） 質量：3.7kg（フード含む）
プロセッシング・ユニット	使用温度：－10～40℃ 保護等級：IP67 寸法：221（W）×260（D）×37（H）mm 質量：3.7kg
ブザー付モニター（7インチ）	使用温度：－20～70℃ 保護等級：IP52（IP67オプション）



写真—1 検知範囲を増設した例



写真—2 夜間工事向けに高感度センサを採用した例

程度の頻度で歩行者と施工機械が接近したかを、振り返ることができる。

本技術は取付け対象の車両を選ばないが、①大型機械や旋回する機械など特に広い検知範囲を必要とする機械や、②前後進ともにステレオカメラによる警戒を必要とする道路機械などに特に適合させるために、ステレオカメラやプロセッシング・ユニットを増設したバリエーションも存在する（写真—1, 2）。

5. 効果

開発国であるフランス労働局の統計によると、年間1,000件以上の歩行者と建機との接触事故が発生しているとされ、うち150件が重傷事故、10件が死亡事故であるが、歩行者を検知できていれば防げたはずの事故が、事故全体の約61%を占める（2012年CNAMによる）。事故発生時の処理コストも高騰していることから、高額な事故処理を避け、工事中断による機会損失を防止するための投資として本技術の導入が進んでいる。

フランスで開発された本技術が我が国へ導入されてから3年が経過し、現在では月間100台以上が出荷されており、人身事故発生現場へ再発防止策として導入されることも少なくないが、本技術を装着した車両による人身事故の報告は日本導入以来0件であり、本技術の導入が人身事故発生の抑制に少なからず貢献していると考えたい。

6. おわりに

労働災害の多くにはヒューマンエラーの影響が少なからず存在している。様々な状況が起こり得る建設現場であるからこそ、人の判断や知覚を支援するテクノロジーは、今後その活躍の場を広げていくものと思われる。こと安全衛生に関していえば、テクノロジーは人の判断を代替するものを常に是とすべきとは限らないだろう。W.Donald (2008) 曰く、デュポン社200年の安全ノウハウにおけるリスクマネジメントモデルは、「何か問題が起こったとき（事故が起こるとか、誰かがケガをしたとき）だけではなく、継続的に積極的な形でリーダーシップが存在しなければならない」と説いている。人類の災害リスクとの戦いには、「目に見える」ほどのリーダーシップが常にそばに在った事実を慮ると、テクノロジーはその意思や感覚をこそ拡張させるものが、求められているのかもしれない。

《参考文献》

- 1) 三上喜貴. 2011. 「ハインリッヒの「産業災害防止論」」『安全安心社会研究』長岡技術科大学, 88-90 頁
- 2) W.Donald Johnson. 2008. 「デュボン社 200 年の安全ノウハウに基づくリーダーシップ」『安全工学』, 69-70 頁
- 3) Charles D. Reese. 2015 「Ch.10 Injury and Death Cost」『Occupational Health and Safety Management』CRC Press, 136-137 頁
- 4) Greetha M. Waehrer 他. 2008. 「4 Discussion」『Costs of Occupational Injuries in Construction in the United States』
- 5) 高木元也・嘉納成男. 2008 「6 労働災害損失額計測手法のニーズ」『建設業における中小企業の安全意識向上に資する労働災害損失額の計測手法の構築に関する研究』労働安全衛生研究, Vol. 1, No. 1, 9-16 頁
- 6) National Safety Council. 2014 『Injury Facts 2014 Book』
- 7) 建設機械事故調査 WG 「4. まとめ」『建設機械（クレーン以外）の事故・災害事例分析報告書』日本建設機械施工協会, 10-11 頁

[筆者紹介]

西 篤史（にし あつし）
エウレカ㈱

村瀬 敦啓（むらせ のぶひろ）
日立建機㈱
顧客ソリューション本部 戦略企画部

