

昇降・搬送用機械を対象とした基本安全技術の検討

岡部 康平*1 呂 健*2 齋 藤 剛*1
芳 司 俊 郎*1 池 田 博 康*1

第3次産業における昇降・搬送用機械の労働災害を抜本的に防止することを目標とする基本安全技術の提案および実用性の検証結果を示す。災害分析より昇降・搬送用機械の典型災害事例の特徴を明らかにし、災害防止のための技術課題を述べる。そして、それらの技術課題を解消するための保護方策とそれを実現する保護装置等を具体的に述べ、保護方策の実現性を検討した結果を詳述する。検討結果では、問題とする技術課題が既存の技術で解消可能であることを示す。

キーワード: エレベータ災害、扉制動、衝撃力、フォークリフト災害、運転者保護、周囲作業員保護

1 はじめに

本誌巻頭の概要でも述べられたとおり、第3次産業で発生した機械設備による死亡災害を分析した結果、廃棄物処理機械と昇降・搬送用機械が主な起因物であることが明らかとなった。そこで、昇降機及び搬送用機械に起因する第3次産業の労働災害を抜本的に防止することを目的とする基本的な安全技術を個別に検討し、実現性を検証する研究に取り組んだ。本報告では研究で得られた主要な知見として、昇降機と搬送機の各典型災害事例に対する安全技術の検討結果を夫々示す。研究成果の詳細は各節に記載の参考文献^{1) 6) 16) 19) 20)}を参照されたい。

本報告では、まず、次の第2節において、昇降機を起因物とする労働災害の発生状況を概説し、第3次産業における典型災害事例として、エレベータ/リフトの扉に挟まれる事例について詳述する。そして、扉挟まれ災害対策への検討結果を第3節で述べる。

搬送用機械の労働災害として、第4節では、災害多発機械であるフォークリフトの災害発生状況を示し、本研究で検討した災害対策案を、続く、第5節、第6節で詳述する。第5節では、フォークリフトの運転者保護装置として提案した身体はみ出し検出システムの実装例と検証結果を示す。第6節では、荷役作業員などのフォークリフトの周囲作業員保護装置として提案した、無線式存在検知による安全運転支援の実装例と検証結果を示す。

2 昇降機を起因物とする労働災害の分析

昇降機に起因する労働災害の事例分析より、災害防止のための課題を明らかにした。災害要因の検討に基づき技術的課題を示しその対策を考察した¹⁾。分析対象は、平成18年のエレベータ/リフトを主な起因物とする労働災害283件から、機械設備の不備が災害要因と判断されない38件を除いた合計245件である。昇降機に起因する労働災害は、発生件数は比較的少ないものの休業見込日数1ヶ月以上となる重篤な災害事例が多い。

1) 災害の発生状況

産業分野別の災害発生件数は、第1・2次産業の総数104件に対して、第3次産業は総数141件と若干多い。

表1 産業分野別の事故類型

| | 第1次・2次 | 第3次 |
|-----------------|--------|-----|
| 挟まれ、 巻き込まれ | 53% | 60% |
| 墜落、転落 | 27% | 24% |
| 飛来、落下 | 10% | 3% |
| 激突され | 3% | 4% |
| 動作の反動、 無理な動作 | 3% | 2% |
| 激突 | 2% | 3% |
| 転倒 | 2% | 4% |
| 崩落、倒壊 | 1% | 0% |
| 切れ、こすれ | 0% | 1% |

事故型別の構成率を表1に示す。両産業分野とも、挟まれ・巻き込まれと墜落・転落の災害が多くを占めており、典型的な機械災害であることが分かる。休業見込日数別の構成率を図1に示す。両分野とも1ヶ月近くの休業災害が多い。第3次産業の発生状況について詳細を次に示す。

第3次産業の141件の発生状況を下記の区分で分類した。

- 閉まりかけた扉と扉、あるいは、扉と台車の一部との間に手指等を挟まれた(29件)
- 昇降機の外において搬器に挟まれた(16件)
- 昇降機の扉を開けたところ、搬器が無く、あるいは、着床しておらず転落した(14件)
- 被災者以外の作業員が昇降機又は搬器を動かした(13件)
- 誤って搬器から転落(12件)
- 扉を(手動で)開ける際に負傷した。搬器の動作は関係しない(9件)
- 搬器と床(作業面)の段差によるもの。転倒、積荷が崩れて当たったなど(8件)

*1 労働安全衛生総合研究所 機械システム安全研究グループ

*2 労働安全衛生総合研究所 人間工学・リスク管理研究グループ

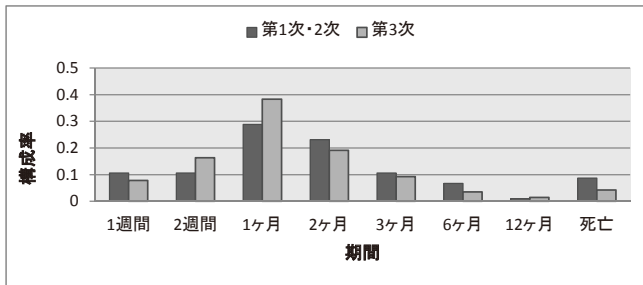


図1 休業見込日数別の分布

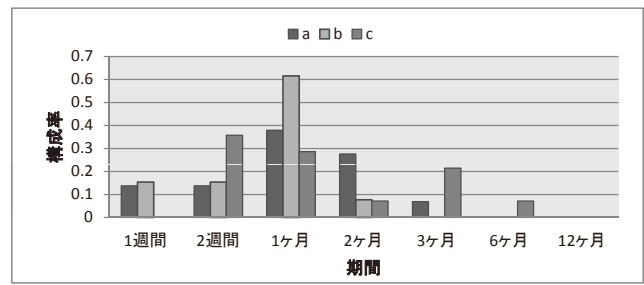


図2 災害発生状況別の休業見込日数

- h) 一人で点検、調整中に挟まれ・巻き込まれ (7 件)
- i) 搬器に搭乗中、搬器と建物の床、あるいは、昇降路内の梁などとの間で挟まれた (7 件)
- j) ワイヤ/ロープが切れた/ほどけた (7 件)
- k) 障害物により停止した搬器が、障害がとれ、落下した (4 件)
- l) 搬器に搬入する際、あるいは、搬器を作動させた際に、荷や台車が倒れた (4 件)
- m) その他/分類不能 (11 件)

閉まりかけた扉に挟まれる災害事例 a) が最も多い。この事例は、第 1・2 次産業では合計 4 件しか発生しておらず、第 3 次産業特有の災害である。

2) エレベータ/リフトに起因する労働災害

第 3 次産業の 141 件について、起因物を

- エレベータ/リフト (114 件)
- 自動車用リフト (10 件)
- 立体駐車設備 (6 件)
- ゴンドラ (6 件)
- その他 (5 件)

に細分し、発生状況の総休業見込日数を算出した。本稿では発生件数が 114 件と最も多いエレベータ/リフトの詳細を示す。他の種別については割愛する。

エレベータとリフトを起因物とする 114 件について

表 2 エレベータ/リフトの休業日数と災害件数

| 発生状況 | 死亡含む (件) | 死亡含まず (件) |
|------|----------|-----------|
| a) | 938 (29) | 938 (29) |
| b) | 333 (13) | 333 (13) |
| c) | 671 (14) | 671 (14) |
| d) | 7930 (4) | 430 (3) |
| e) | 406 (9) | 406 (9) |
| f) | 233 (9) | 233 (9) |
| g) | 232 (8) | 232 (8) |
| h) | 7694 (5) | 194 (4) |
| i) | 7858 (6) | 358 (5) |
| j) | 185 (4) | 185 (4) |
| k) | 150 (4) | 150 (4) |
| l) | 65 (2) | 65 (2) |
| m) | 8068 (7) | 568 (6) |

表 3 傷害と傷害部位の総休業見込日数

| 傷害 | 部位 | 件数 | 日数 |
|---------|-----|----|-----|
| 骨折/剥離骨折 | 手 | 1 | 28 |
| | 手首 | 5 | 219 |
| | 指 | 5 | 182 |
| | 胸 | 1 | 60 |
| | 太腿 | 2 | 111 |
| | 骨盤 | 1 | 60 |
| 捻挫/ヘルニア | 頭/顔 | 1 | 21 |
| | 手首 | 1 | 42 |
| | 背中 | 1 | 30 |
| | 骨盤 | 2 | 74 |
| 打撲 | 指 | 2 | 29 |
| | 手 | 2 | 10 |
| 創傷 | 頭/顔 | 1 | 7 |
| | 指 | 3 | 65 |
| | 頭/顔 | 1 | 30 |

算出した結果を表 2 に示す。死亡災害を含む発生状況が特出している。そこで、死亡災害 4 件について内容を精査すると、いずれも設備側の不備/欠陥ではなく、作業者の不安全行動が原因とされる事例であった。工学的対策を検討する本研究の目的から外れているため、死亡災害を除外した日数を検討することとした。

最も休業見込日数が多い項目は発生状況 a) である。発生件数が多く、かつ、休業見込日数が 1 ヶ月近くか、それ以上の重傷となっているためである。休業見込期間別の構成比を図 2 に示す。エレベータ/リフトを起因物とする災害に対しては、閉まりかけた扉と扉、あるいは、扉と台車の一部との間に手指を挟まれる危険事象に着目した。災害対策については次節で述べる。

発生状況 a) の傷害と傷害部位の詳細を表 3 に示す。傷害は骨折 (剥離骨折を含む) が多く、総じて重傷である。骨折 15 件のうち、11 件が上肢を被災したもので症状が重篤化する傾向にある。また、この 11 件のうち 7 件が、閉まりかけた扉と台車の一部との間に上肢の一部を挟まれた事例である。傷害部位別の総休業見込日数と、日数を発生件数で除した平均値を図 3 に示す。手指周辺で全日数分の 6 割以上を占める。平均値でみると胸部、

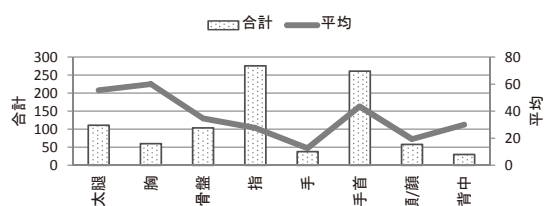


図3 障害部位別の休業見込日数

大腿部、手首が重篤化しやすいことがわかる。手指、特に手首の保護が必要である。

3)エレベータ/リフト災害対策の検討

エレベータ/リフトを起因物とする第3次産業における災害の典型事例は、前述の発生状況 a) に示した手指の挟まれである。閉まりかけた扉と扉、あるいは、扉と台車に手指を挟まれ、骨折/剥離骨折する事例が多い。手首は特に重篤化しやすい。

災害要因として扉の接触式センサなどの安全装置の有無が、まず、挙げられる。建築基準法施行令では、扉（出入口の戸）について、下記の基準が規定されている。

- 自動的に閉鎖する構造の引き戸である昇降路（かご）の出入口の戸は、150N以下の力により閉じるものであること。ただし、出入口の三分の一が閉じられるまでの間はこの限りでない²⁾³⁾。
- 自動的に閉鎖する構造のかごの出入口の戸は、反転作動（人又は物が戸に挟まれ、又は挟まれるおそれがある場合において、戸の閉鎖を自動的に停止し、当該戸を開くことをいう）ができるものであること³⁾。

これに対して、労働安全衛生法のエレベータ構造規格では、扉との接触や衝突に対する安全装置の規定はない。

現行の法規制では、人が搭乗しない荷物専用のエレベータ（簡易リフト）の扉には安全装置の設置義務はない。政策的課題として、荷物専用エレベータ（簡易リフト）についても、建築基準法令の準拠が望まれる。

一方で、建築基準法令の規定だけでは充分ではないおそれがある。発生状況 a) の29件中7件では人が搭乗するエレベータであろうと推定され、さらに、2件では扉のセンサは正常であったとの報告がある。技術的課題として、建築基準法令に基づく設計の有効性検証が挙げられた。

そこで本研究では、図4に示す機材を用いて簡単な測定実験を行い、扉の閉じる力、すなわち定常的な挟圧力と、接触時の瞬時的な衝撃力（挟圧力のピーク値）とを確認した。測定装置はKMG-2000-L⁴⁾を使用し、これを台車（幅500mm）に高さ1100mmの位置で設置した。衝突面はアスカーC硬度0、厚さ3mmのウレタンゲルシート⁵⁾で覆った。成人の手の甲を想定したものである。

実験は一般の用人用エレベータ（小型：開口幅800mmの片開式、大型：幅2000mmの両開式）に対して実施



図4 測定機器の構成

した。挟圧力は建築基準通りに150N以下で制動されていた。一方で衝撃力は台車を開口部のほぼ中央部に配置して衝突させた場合に、反転作動が働いていても小型で400N以上、大型では1,500N以上と高い値が測定された。

大型で値が高くなった要因の1つに両開式であることが考えられる。特に、反転動作が有効に機能せずに左右の扉に台車が挟まれた場合には、強い衝撃が加わる傾向がある。計測値だけで考えると、大型は自動回転ドアの規定値1,400N⁶⁾を超えており、大型に対して規定の見直しが必要となる結果であった。

衝撃においては速度の影響も重要であり、自動回転ドアやガードと同様に、速度の制御、あるいは、運動エネルギーの制限などの検討が必要である。

3 昇降機の扉制動基準の検討

現行のエレベータ/リフトの規制や安全設計はエレベータ/リフトの典型災害を防止する方策としては不十分である可能性がある。まず、現行の規制では、人が搭乗しない荷物専用のエレベータ（簡易リフト）の扉には安全装置の設置義務はなく、荷物専用とするエレベータについても、建築基準法令の準拠（反転動作、位置に応じた力制御）が望まれる。また、建築基準法令の規定を満足していても過大な衝撃力が生じる可能性がある。そこで本研究では、上肢の骨折に対する生体力学特性から、昇降機における扉の制動基準を検討した⁶⁾。

1) 扉の制動に関する規定の調査

基準値として下記の規格と法規を参考とした。

- 自動回転ドア（JIS A 4721:2005）⁷⁾
- ガード（ISO 14120:2002）⁸⁾
- IADs: Intelligent Assist Devices（RIA BSR/T15.1 2002）⁹⁾
- 防火設備（建設省告示第2563号）

ガードとIADsの規定は産業用機械を対象とするものであり、自動回転ドアと防火設備は公共の場で使用される設備を対象とするものである。想定される被害者や被害の受容性は各々に異なるため、本来、一概に数値を同列に示すことは適切ではないが、各規定値を参考とした。

調査時に参照できなかった

表4 規定項目対応一覧 (*F*: force, *F_p*: peak force, *M*: mass, *V*: velocity, *K*: kinetic energy, *R*: reverse-stop operation)

| | <i>F</i> | <i>F_p</i> | <i>M</i> | <i>V</i> | <i>K</i> | <i>R</i> |
|-----------|----------|----------------------|----------|----------|----------|----------|
| 自動回転ドア | ✓ | ✓ | | ✓ | | |
| ガード | ✓ | | | | ✓ | ✓ |
| IADs | ✓ | | | | | |
| 防火設備 | ✓ | | ✓ | | ✓ | ✓ |
| ロープ式エレベータ | ✓ | | | | ✓ | ✓ |

● ロープ式エレベータ (JIS TS A 0028-1:2011)¹⁰⁾の規定も本稿では追記しておく。

各規定項目の一覧を表4に示す。基本事項として挟圧力については全ての規定で基準が設けられている。挟圧力は不可欠な基準である。

(1) 挟圧力の規定 挟圧力の規定値を昇順で示す。

75N: ガード (反転機能なし)

80N: 自動回転ドア (残力)

150N: 自動回転ドア, 防火設備,
ガード (反転機能あり),
ロープ式エレベータ

267N: IADs

反転機能を持たない可動ガードの規定値が最も低い。規定値の根拠について、IADsでは女性がアクチュエータを制止できる力の5%タイル値に対応すると記載されている⁹⁾。その他の規定では、参照した文献に理由の記載がなく確認できていない。

(2) 反転・停止動作 反転・停止動作 (項目*R*)についてはガード, 防火設備, ロープ式エレベータで規定しており, ガードとロープ式エレベータは反転を, 防火設備は停止を要求している。

防火設備は設備の質量について, 15kg以下を基準としているが, 実際に適合できるのは限られるため, 停止 (危険防止装置) の措置による除外規定が一般に適用されることとなる。

(3) 衝撃力 衝撃については, 自動回転ドアが動的ピーク力 (項目*F_p*)と速度 (項目*V*)で規定し, ガード, 防火設備, ロープ式エレベータが運動エネルギー (項目*K*)で規定していると捉えられる。

自動回転ドアではドア部分 (戸先)と固定枠部分 (先頭方立端)との隙間の大きさに応じて, 挟まれ対象となる人体部位が下記の区分により規定されている¹¹⁾。

200mm: 側頭部, 上腕; 400N

300mm: 頭部前後; 700N

500mm: 胴体; 1,400N

隙間, すなわち, 開口部が500mm以上の場合については規定されていない。これらの値はせん断状態を想定したものであり, 検証実験により妥当性を確認していると報告されている。

なお, これらの値が適用できるのは, バネ定数を500N/mmとする所定の機構を備え, 所定の仕様に校正された測定装置で衝撃力 (挟圧力のピーク値)を計測した場合のみに限られる。ピーク値の測定は装置の処理速度などの特性に依存するためである。前節で述べた簡易実験でもこの測定装置を用いた。

(4) 運動エネルギー 運動エネルギーの規定値を次に示す。

4J: ガード (反転機能なし),

ロープ式エレベータ (反転機能なし)

10J: ガード (反転機能あり), 防火設備,

ロープ式エレベータ (反転機能ありで平均)

23J: ロープ式エレベータ (反転機能ありで最大)

反転機能の有無によって規定値が異なる。これらの根拠については確認できていない。

2) 上肢骨折の力学特性調査

(1) 衝撃試験 文献調査から上肢の衝撃荷重に対する耐性について検討する。献体前腕の骨折を落錘型試験で検証したもので, 試験条件の詳細が把握できる次の3文献を参考とする。

O1982¹²⁾: 無皮肉前腕骨圧縮荷重試験

B1999¹³⁾: 前腕3点曲げ荷重試験

D1999¹⁴⁾: 前腕3点曲げ荷重試験

文献O1982は転倒時の典型例であるコーレス骨折を想定し, 骨のみの状態と筋肉を部分的に模擬した状態とで実施されている。B1999とD1999は皮肉を残した状態のまま実施されている。O1982において, 皮肉の状態 (筋肉の有無)で耐性が変わることが検証されている。

荷重条件を表5に示す。いずれの試験においても高齢者の前腕が使用されており, かつ, 質量15kg以下の錘により骨折が確認されている。これより, 防火設備の規定にある質量の基準は, 労働災害防止において必ずしも充分でないことが示唆される。

衝突時の物理量を表6に示す。押しつぶす力 (項目*C*)は, ガードの最小値75N以下でも骨折が確認されている。扉との衝突では, 狭圧力だけの規定を満足す

表5 荷重条件 (*M*: mass [kg], *H*: height [m],

A: acceleration [m/s²], *G*: gender, *Y*: average of age)

| | <i>M</i> | <i>H</i> | <i>A</i> | <i>G</i> | <i>Y</i> |
|-------|----------|----------|----------|----------|----------|
| O1082 | 15.0 | 0.5 | 9.8 | F/M | 63.3 |
| B1999 | 4.40 | 0.5 | 9.8 | M | 6.32 |
| D1999 | 9.48 | 1.4 | 4.9 | F | 61.4 |

表6 衝突時の物理量 (*C*: crush force [N], *V*: impact velocity [m/s], *P*: momentum [kg · m/s], *K*: kinetic energy [J])

| | <i>C</i> | <i>V</i> | <i>P</i> | <i>K</i> |
|-------|----------|----------|----------|----------|
| O1982 | 147.0 | 3.1 | 47.0 | 73.5 |
| B1999 | 43.7 | 3.0 | 13.4 | 21.9 |
| D1999 | 46.3 | 3.6 | 35.1 | 62.5 |

るだけで十分とは言えない。対して、運動エネルギー（項目 *K*）については 20J 以上で骨折が確認されており、値だけから判断すると、10J 以下とするガードなどの基準は妥当であると考えられるが、ロープ式エレベータの最大値 23J は骨折の危険性があり、より詳細な検討を必要とする。

試験で報告された動的ピーク力の結果を表 7 に示す。文献 D1999 では動的ピーク力ではなく最大モーメントで記載されているため記載していない。表が示すとおり 1kN を超えると骨折のおそれがある。測定装置が統一されていないため、厳密には比較することはできないが、値だけから判断すると、自動回転ドアの上腕に対する規定 400N は安全側に配慮された基準であることが確認される。

同じ試験条件において、測定値には大きな開きがある。測定装置の仕様の問題だけでなく、上腕の粘弾性に強く左右される動的ピーク力が基準として適切な物理量であるのか、今後、綿密な検討が必要であるものと推察される。

(2) 耐荷重試験 微速で連続的に加圧された場合の耐性についても、耐荷重試験の結果から確認する。耐荷重試験は文献 B1999 の 3 点曲げ条件のみで報告されているため、新たに次の文献を追加する。

G2008¹⁵⁾：無皮肉前腕骨圧縮荷重試験

これは O1982 と同じくコーレス骨折を想定し、微速で圧縮試験したものである。試験結果のうち狭圧力を表 8 に示す。骨の細い部分や固定部分（手首の付根）では比較的微速、微力の条件でも骨折が生じたことが報告されている。

表より、300N 以上の挟圧力では手首骨折のおそれがある。平均値から判断すると、1kN 以上の狭圧力では重篤な骨折を生じるおそれがある。

3) 制動基準の考察

労働現場で使用される昇降機の扉との衝突に起因する

表 7 動的ピーク力 (*AF_p*: average of peak force [N], *LF_p*: Minimum of peak force [N], *UF_p*: Maximum of peak force [N])

| | <i>AF_p</i> | <i>LF_p</i> | <i>UF_p</i> |
|-------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| O1982 | 3280 | 1058 | 5968 |
| B1999 | 2581 | 1180 | 4530 |

表 8 圧縮荷重 (*AC*: average of crush force [N], *LC*: Minimum of crush force [N], *UC*: Maximum of crush force [N])

| | <i>AC</i> | <i>LC</i> | <i>UC</i> |
|-------|-----------|-----------|-----------|
| B1999 | 1079 | 365 | 1480 |
| G2008 | 1386 | 1100 | 1760 |

上肢骨折を防止するための安全基準を、現行規格の規定

値と既存の上肢骨折の力学特性の試験結果との対比から検討した。

今回参照した骨折の力学特性においては、自動回転ドアの規定は衝突による上肢骨折の危険性に配慮したものであるとして、その妥当性が確認された。その一方で、質量、または、狭圧力いずれかのみの規定値を充足するだけでは、衝突による危険性に対して必ずしも十分ではないことが示された。

扉との衝突による上肢骨折を防止するには、挟圧力、動的ピーク力、運動エネルギー（運動量）を統合して規定すべきである。少ない文献数からではあるが、得られた知見をまとめると下記になる。

- A) 狭圧力は、現行の建築基準法令にある 150N 以下とする規定（自動的に閉鎖する構造の引き戸であって出入口の 1/3 以上閉じた場合²⁾）に準拠するのはもとより、耐荷重試験の報告より、それ以外でも 300N（項目 *LC* より）以下とするのが望ましく、最大でも 1kN（項目 *AC* より）は超えてはならない。
- B) 衝撃力（動的ピーク力）は、1kN 以下（項目 *LF_p* より）とすべきである。特に、開口部が 200mm 以下のときにおいては自動回転ドアの規定値である 400N 以下が望ましい。ただし、測定装置の特性や固定方法、上腕の粘弾性などの影響でその値が大きく変化することに注意が必要である。
- C) 運動エネルギーは、最大でも 20J 以下（項目 *K* より）とすべきであり、ロープ式エレベータ等の規定値である 10J 以下とするのが望ましい。ただし、扉の構造や材質、緩衝材の有無などの影響で、上肢に与える衝撃力は大きく変化することに注意が必要である。

上記の A) 及び C) から、扉の動作に関する規定として、扉の速度を運動エネルギーが指標内 (10J ないし 20J 以下) に収まるようにし、かつ、扉を閉じる力（挟圧力）を位置に応じて制限することが提案できる。

挟圧力は扉を閉じる初動時と、ある程度に加速した後とは必要な大きさが異なると考えられる。よって、その規定としては、現行の建築基準法令に加え、例えば、「出入口の 1/3 が閉じられるまでの間は 300N 以下とする。ただし、初動の微速時には限定的に 1kN 以下とする」のが合理的と考えられる。全ての領域で 150N 以下にすることが理想ではあるが、実用面から困難であると予想される。微速として良い速度の条件については、精査する必要がある。

なお、上記の内容は、労働現場で使用される昇降機に対する推奨であり、公共設備のような子供の利用が想定される昇降機に対しては、別の検討が必要である。

今後の課題として、上記の扉制動の実現性と衝撃力との整合の確認、ならびに、接触検知による反転・停止動作の有効性確認があげられる。

4 搬送機を起因物とする労働災害の分析

中央労働災害防止協会が公表した平成 18 年の労働災害事例によると、搬送機を起因物とする災害事例約 4800 件のうち半数以上がフォークリフトによるものであった。第 3 産業においては 7 割近くにまでのぼる。フォークリフトに起因する災害の防止は、大幅な労働災害の削減となる。そのため本研究ではフォークリフトの災害対策を検討した。

1) 災害の発生状況

中央労働災害防止協会が公表した平成 18 年の労働災害事例より休業 4 日以上フォークリフトを起因物とする労働災害事例（死亡を含む）を抽出し、表 9 に示す類型の区分を行った¹⁶⁾。

類型の上位は挟まれ・巻き込まれ、激突され、墜落・転落、激突の 4 つであり、合計で 87% を占める。これらの災害事例を防止できれば、フォークリフトの災害は 9 割近く削減されることになる。しかし、同じ災害類型でも、具体的な発生状況は様々であり、求められる具体的な対策も異なる。そこでフォークリフトの装備として実装可能な技術的対策を列挙して検討を行った。

2) フォークリフト災害対策の検討

(1) **運転者在席検出** 運転者がフォークリフトに挟まれる（巻き込まれる）災害として、運転者が運転席で立ち上がり、ヘッドガード前面から顔を出している際に、マストのレバーに身体や服が触れてしまい、マストとヘッドガードの間に顔や首を挟まれる典型事例がある。労働安全衛生規則（第 151 条の 11）では、運転位置から離れる場合の措置としてフォークを最低降下位置に置き、エンジンを止めブレーキをかけることを定めている。労働現場でこの措置が守られていれば、このような災害は防止できたはずである。法令や安全管理による対策には限界がある。

設備側の対策として挙げられるのが、運転者在席検出による運転許可である。運転者が正しい運転位置に居る時のみ、走行と荷役の許可を出す安全装置を装備する。この装置については平成 17 年以降に改定された ANSI/ITSDF B56.1¹⁷⁾ に規定があり、国内でも平成 19 年前後から既に装備され始めている。その効果に関する報告はなされていないが、平成 15 年から 19

表 9 第 3 次産業フォークリフト災害発生状況

| 類型 | 総数 | 構成率 |
|-------|------|---------|
| 挟まれ | 659 | 40.63% |
| 巻き込まれ | | |
| 激突され | 390 | 24.04% |
| 墜落、転落 | 197 | 12.15% |
| 激突 | 165 | 10.17% |
| 飛来、落下 | 94 | 5.80% |
| 転倒 | 51 | 3.14% |
| その他 | 66 | 4.07% |
| 合計 | 1622 | 100.00% |

年の死亡事故 288 件を分析したところ、28 件（約 10%）の災害を防止できたであろうと推計された。運転者在席検出が JIS（日本工業規格）として規定され、広く普及すれば災害防止に大きく貢献すると期待される。

(2) **投げ出され防止** フォークリフトの横転や転落などにより、運転者がフォークリフトから投げ出されたり、地面などに激突したりして被害を負う災害事例も多い。対策として挙げられるのは、運転席にキャビンガードを設け、フォークリフトが横転・転落した際や、壁などに激突した際に、運転者がキャビン内に止まるようにする装備である。運転者の視界に支障がでない範囲で、扉などの覆いをするのが望ましい。対策としては容易である。平成 15 年から 19 年の死亡事故を分析したところ、46 件（約 16%）でこのような装備が有効であったであろうと推計された。

(3) **身体はみ出し検出** 後退運転中に運転席から顔や手を横へ出し、フォークリフトのキャビンとパレットトラックなどの支柱に挟まれる災害も多い。このような事故の対策として挙げられるのはキャビンからの身体はみ出し検出である。ヘッドガードやキャビンに光線式センサなどを取り付け、運転者の身体部位がキャビンからはみ出た際に、危険を検知して警報や走行停止の制御を実行する。このような装置の有効性については、平成 15 年から 19 年の死亡事故のうち、7 件で有効であったであろうと推計された。

身体はみ出し検出はまだ実用化されていない。古くから知られている災害事例であるにもかかわらず、未だに技術的対策が確立されていない。そこで、本研究では透過形の光電保護装置を用いて身体はみ出し検出を実装し、フォークリフトの制動を行う制御システムの課題検証を行った。詳細は後述する。

(4) **危険認知支援** 激突されや巻き込まれによる周囲作業員の災害の多くが運転席の視界不良を原因とする。そのため、運転者の危険認知を支援する対策が必要である。例えば、ヘッドガードやキャビンにカメラやレーザ式センサを取り付けることで、フォークリフトの走行経路や周辺環境情報を運転席にモニターで表示したり、衝突などの危険時に警報を出したり、さらには、走行停止の制動制御をも実行する装置が挙げられる。このような装置の有効性については、平成 15 年から 19 年の死亡事故のうち、53 件（約 18%）で有効であったと推計された。

本研究では、運転席の視界不良に起因する衝突や挟まれなどによる労働災害を防止するため、無線通信を用いた保護方を提案し、保護方を実現するために開発した試作機の機能とその基本性能を示した。詳細は後述する。

5 身体はみ出し検出によるフォークリフト災害対策

1) 運転者保護装置の提案

最近のフォークリフトでは、運転者が腰を浮かせて



図5 危険な身体はみ出し



図6 光電保護装置の搭載

身体を乗り出すと、自動的に運転操作が無効化されるように着座センサなどで運転者在席検出機能が搭載されはじめています。しかし、図5に示すように、小型のフォークリフトでは、運転者が着座したまま上半身を横に晒し出せる場合が多く、その状態でフォークリフトを走行させて側壁等に激突する災害の恐れがあります。そのため、着座センサに加えて、身体のはみ出しを光学的センサで検出する方法を提案して、その構成方法とセンサ検出領域の設定方法を検証しました。

(1) **光カーテンを用いた身体はみ出し検出** まず、運転者が着座し、身体の一部がキャビンからはみ出す状態を検出するため、透過型の光電保護装置（以降、光カーテン）を図6のようにフォークリフトに搭載する案を検討した。ただし、光カーテンを用いてはみ出しを検出してから、フォークリフトの走行を禁止したり走行中に停止させたりすると、実用上問題が生じる。フォークリフトの走行通路の周辺障害物が近接しているときに突然身体がはみ出しても安易に急減速させられない。また、周辺障害物が遠方にあるときに身体がはみ出すと無用に停止させてしまう。これらの問題は着座センサの場合も同様に生じるが、一般に着座センサは非着座時の走行禁止を目的としており、走行中からの制動・停止動作の始動を意図していない。

(2) **障害物検出と連動するインタロックシステム** そこで光カーテンによる身体はみ出し検出時、周囲障害物がなければフォークリフトを強制的に減速させ、さらに近接すると完全に停止させる走行インタロックシステムを構築する。そのため、運転席下部のフォークリフト側面に周囲障害物検出用レーザスキャナを追加し（図6）、図7に示すはみ出し検出領域を設定する。このレーザスキャナと光カーテンを連動する走行

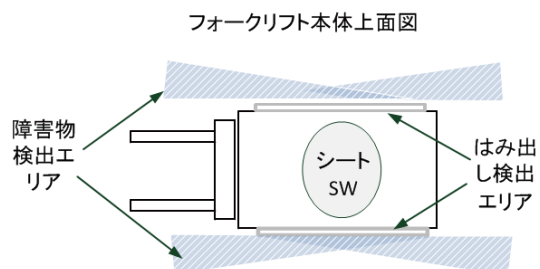


図7 連動システムの検知領域

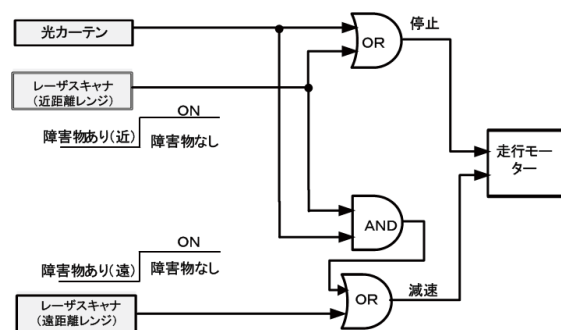


図8 論理回路の構成

インタロックシステムを実現するため、図8に示すような論理回路を構成した。ここでは、フォークリフトの走行と運転者のはみ出しはいずれも定常状態における論理関係のみ表しており、その論理関係を表10に示す。光カーテン、レーザスキャナ共に身体あるいは障害物を検出時にOSSD出力オフとなる保護装置としている。

レーザスキャナの障害物検出領域（監視領域）は、上記の論理を実現するために「近距離レンジ」と「遠距離レンジ」の2つを設定し、これらの位置関係を図9に示す。実際の各領域の設定は、フォークリフトの走行速度と制動・停止特性に依存し、加えてレーザスキャナの応答性も加味しなければならない。レーザス

表10 光カーテンとレーザスキャナを用いた減速と停止の論理

| 索引 | 光カーテン OSSD 出力 | レーザスキャナ | | 速度制限 ("1"で制限無し, "0"で制限有り) | 走行許可 ("1"で許可, "0"で強制停止) |
|----|---------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------------|-------------------------------|
| | | 近距離 レンジ OSSD 出力 | 遠距離 レンジ OSSD 出力 | | |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 2 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| 3 | 1 | 0 | * | 0 | 1 [†] |
| 4 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 [†] |
| 5 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 [†] |
| 6 | 0 | 0 | * | 0 | 0 |

OSSD: センサの検出出力 (0: 検知, 1: 不検知)

*: 値を問わないが、適切な設計下では0のみである。

†: 実用上1と記載したが、安全上は0が望まれる。

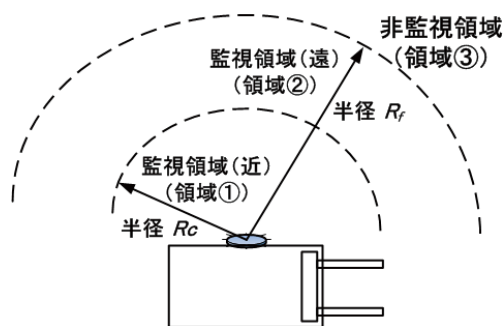


図9 レーザスキャナの2つの障害物検出監視領域の設定

キャナの近距離レンジと遠距離レンジの半径（検出監視領域）を各々 R_c 、 R_f とし、これらの設定のための基本式を求める。

(3) 近距離レンジ R_c の設定 近距離レンジでは、身体はみ出し時に周囲障害物を R_c の位置で検出すると、フォークリフトは R_c より短い距離で停止しなければならない。障害物検出からフォークリフトが停止するまでの停止距離を S_0 とすると、 R_c は次式を満たす必要がある。 $R_c > S_0 + S_p$

ここに、

$$S_0 = V_0 \cdot (T_s + T_e) + S_{over} \quad (1)$$

であり、 V_0 は近距離障害物検出時のフォークリフト走行速度（減速された速度）、 T_s はレーザスキャナの応答時間、 T_e はフォークリフト制御回路の電気系応答時間、 S_{over} は制御回路から停止指令が発せられてからフォークリフトが停止するまでの空走距離（機械系の惰走距離）である。 T_s 、 T_e 、 S_{over} は同定可能であるため、 R_c は V_0 によって規定されることが分かる。なお、 S_p は付加的な距離要素であり、障害物の接近速度やレーザスキャナの取り付け位置などを考慮する変数である。

一方、周囲障害物を R_c の位置で検出後に身体のみみ出しを光カーテンが検出する場合、表 10 の関係より光カーテンの検出前は既にフォークリフトは減速状態にあるが、停止過程には至らず定速状態にある。すなわち、障害物がフォークリフト直前になった時点で身体のみみ出しを検出しても、式 (1) と同様のオーバーラン距離を確保することが不可能である。この問題は考察で後述する。

(4) 遠距離レンジ R_f の設定 遠距離レンジでは、身体はみ出し時に周囲障害物を R_f の位置で検出すると、フォークリフトは R_c の位置に到達する前に V_0 の速度に減速されていなければならない。フォークリフトが R_f から R_c まで減速するときの減速度を a （一定）と仮定すると、 R_f は次式で表すことができる。

$$R_f > \frac{V_1^2 - V_0^2}{2a} + R_c \quad (2)$$

ここに、 V_1 は遠距離障害物検出時のフォークリフト走行速度であり、最高速度を設定する。

2) 検証実験

連動システムの実現性を検証するため、1.5t のバッテ

表 11 実測で得られたオーバーラン例

| V_0 (km/h) | S_{over} (m) | S_0 (m) |
|--------------|----------------|-----------|
| 1.06 | 0.37 | 0.40 |
| 1.49 | 0.71 | 0.76 |
| 2.48 | 1.24 | 1.31 |
| 3.04 | 1.60 | 1.69 |

リー式フォークリフト実機を対象に、検証実験を行った。身体はみ出し検知センサとして光カーテン（キーエンス GL-R52H）、障害物検知センサとしてレーザスキャナ（キーエンス SZ-04M）をそれぞれ用いた。図 9 に示した遠距離と近距離の2種類の監視領域は、1台のレーザスキャナ SZ-04M の二つ独立した安全監視領域で対応した。

式 (1) のセンサ応答時間 T_s はセンサの仕様（100ms 程度）として既知である。そこで、電気系応答時間（指令時間） T_e とオーバーラン S_{over} を同定するための検証実験を行った。同定結果を次に示す。

(1) 応答時間 T_e の測定実験 2つのセンサの OSSD 出力を受けてから、フォークリフトが減速又は非常停止を開始するまでの電気回路部の応答時間 T_e を測定するため、安全リレーを用いて図 8 の論理回路を構成し、その応答時間を実測した。測定の結果、 T_e は 9.6ms であった。

(2) オーバーラン S_{over} の測定実験 オーバーラン S_{over} は電気制御回路からの制御信号（停止指令）を出してから、フォークリフトの走行モーターへの通電が遮断され停止し、そのあとフォークが惰走を経て完全に停止するまで走る距離である。実験は 1.5t バッテリーフォークを対象に、反射型レーザセンサを用いて、「停止」指令を受ける直前の速度測定を行い、レーザ測距計によりオーバーラン距離を測定した。その結果と式 (1) より算出される停止距離 S_0 の値を表 11 に示す。

3) 制動制御の考察

はみ出し検出がなされた際の、フォークリフトと障害物との距離を S_d とする。この距離と近距離レンジ R_c との関係からシステムの制動を考える必要がある。

(1) 近距離レンジ以上の場合 ($S_d \geq R_c$) 障害物が監視領域②のときに、はみ出し検出が発生すると表 10 の索引 5 の行に示す真理値の状態となり、速度制限指令（信号「0」）が発行される。はみ出しが継続し、障害物が監視領域①にまで達すると、表 10 の索引 6 の行の状態となり、「停止」指令（信号「0」）が発行される。速度制限を経てから領域①に達するときの速度を V_c とすると、障害物の手前に停止できる条件は

$$R_c > S_0 (V_c = V_0) \quad (3)$$

である。ここに、 $S_0 (V_c = V_0)$ は、 V_c が V_0 の値をとり、 V_0 に基づき式 (1) で算出される停止距離 S_0 を示す。

例えば、領域①に入る時の時速を $V_c = 1.06$ と規定するならば、 $S_0 (V_c = 1.06) = 0.4$ より、 R_c は 0.5m 以上と設定すればよい。これは監視領域②への侵入時点から

速度を V_c (例では 1.06km/h) に抑制 (減速) することを前提とする。はみ出し検出が発生していなくても、領域②の時点で速度制限が必要である。また、領域②の範囲を決める R_r を適切に設定する必要もある。

(2) 近距離レンジ未満の場合 ($S_d < R_c$) 障害物が監視領域③から①にまで推移し、領域①内に侵入した時点で、はみ出し検出が発生した場合、表 10 の索引 4 の行の状態となり、停止指令及び減速指令の両方が発行され、停止指令が優先的に実行される。

障害物との距離 S_d が R_c 未満であるため、はみ出し検出が発生した場合に、障害物の手前で停止できない状況が生じうる ($S_d < S_0$)。そのため、領域①に入る直前から「はみ出し注意」または「障害物注意」のような警告機能をシステムに追加する必要がある。また、 $V_{min} \ll V_c$ となるような低速 V_{min} を維持するための速度制限も不可欠となる。

システムの実装にあたり、下記の注意が必要である。

- A) 監視領域①の手前で十分に減速しておくために、はみ出し検出が無くても、監視領域②に侵入した時点から速度制限 (減速) を行う必要がある。
- B) 障害物の手前で停止できない状況を避けるべく、障害物が監視領域①に侵入した時点で、一旦、停止の制動をすることが望ましい。
- C) 障害物が監視領域①に侵入した状況で、運転を許可する際には、速度を十分に低速に自動で抑えるとともに、身体をはみ出さないよう警告を出す必要がある。

さらなる改善として、今回の停止指令は走行モーターの停止としたが、フォークリフトのブレーキシステムに連動させる制動制御が望まれる。本稿では実験上、モーター停止で例示したが、無励磁作動ブレーキでシステムを構築することが今後の課題に挙げられる。

6 無線式存在検知によるフォークリフト災害対策

視界不良により周囲の作業者が被災する事例は建設機械でも多く、建設機械の接近を周囲の作業者に通報する警報装置が既に幾つか考案されており、その有効性が報告されている¹⁸⁾。本研究ではフォークリフトを対象に、危険な接近を運転者と作業者に通報する警報提供による安全運転支援の実現性を検討した^{19) 20)}。

1) 無線式存在検知による安全運転支援

本研究では、図 10 に示すような災害発生状況を想定し、フォークリフトが周辺の作業者に特定の距離 (3m~7m) を想定) にまで接近した場合、周辺の作業者にフォークリフトの接近を知らせるとともに、運転者にも作業者の存在を通報する無線式安全運転支援装置を開発した。通報手段には 2 種類の電波を用いた。

本研究で開発した支援装置は、建設機械の警報装置²¹⁾と同じく、

- 機械の周辺に交番電界を発生させて作業者の存在を検知するための領域を生成する発信機

- 電界を検知して微弱電波で返信する応答機の無線通信により存在検知の基本動作を成す。発信装置を親機、応答装置を子機とする。親機はフォークリフトに設置し、子機は作業者が携帯する。

安全運転支援として、運転者への警報提供だけでなく、



図 10 災害発生状況の想定例

子機からの返信方向を特定して運転者に視覚的に呈示するための方向探知機も検討した。また、親機と子機の通信が正常に動作しているかを確認するための監視機の開発も行った。

2) ノイズ源調査

無線通信で利用する電波の周波数帯を選定するため、フォークリフトから発せられるノイズを実測で確認した。測定はエンジン車とバッテリー車の 2 台で行った。測定環境は屋外と屋内である。

(1) 親機の周波数帯 親機の接近信号を伝達する電波は回折効果が期待される長波 (LF 帯) とし、周波数 30 kHz~130kHz の帯域で調査した。エンジン車では通信に影響の電圧強度のノイズは測定されず、車体から約 0.5m 以上離れるとノイズは測定されなかった。

一方のバッテリー車では、バッテリー配線付近と電子表示器付近から送信妨害しうる程度の電圧強度が確認された。スイッチング電源からのノイズと判断される。車体から約 1m 以上離れるとノイズは測定されなかった。ノイズ源から距離のあるキャビンガードの屋根部分ではノイズの影響は無視できる程度であった。

(2) 子機の周波数帯 子機の応答信号を伝達する電波は消費電力の観点から極超短波 (UHF 帯) で調査した。エンジン車ではイグニッションノイズの影響が確認された。受信妨害が懸念されるためエンジン車で

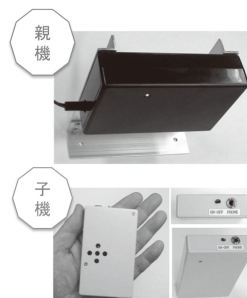


図 11 試作した親機と子機

表 12 試作装置の諸元

| | 親機 | 子機 |
|------|-----------------|----------------------|
| 外形 | 125×80×32 mm | 95×58×18 mm |
| 質量 | 200g | 80g |
| 電源電圧 | 12V | 3V |
| 送信信号 | 31.25kHz | 303.4MHz |
| 受信信号 | 303.4MHz | 303.4MHz 31.25kHz |
| 変調方式 | ASK | FSK |

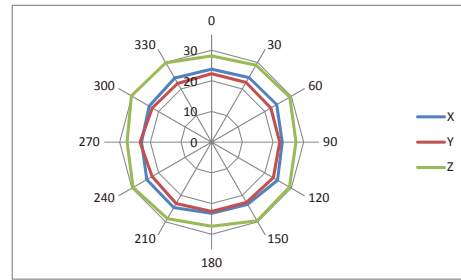


図 13 LF 帯の磁界強度

も設置位置は屋根部が最適と判断された。バッテリー車では電子表示器から高い電圧強度のノイズが確認された。返信の受信帯域を狭めて限定することで対応する必要があると判断された。

3)無線式存在検知装置の基本性能

(1) 存在検知装置の試作 試作した親機と子機の外形を図 11 に示す。親機と子機の基本的な諸元を表 12 に示す。親子ともに微弱無線で通信する。微弱無線の通信装置は文字通り非常に弱い電波（電界強度）で信号を送受信するため、反応距離を長くするのが難しい欠点がある。しかし、無線装置を利用するために免許を必要としないため、誰でも自由に装置を使える利点がある。

親機は電波が障害物などの背後に回り込む回折現象を期待して LF 帯の電波信号を常時発信する。親機は自身の識別番号 (ID) を接近信号として発信し、子機から自分宛の UHF 信号を受信すると警報を鳴動させる。試作装置では活用していないが、親機は UHF 帯の送受信が可能である。

子機は LF 信号を受信した場合に警報を鳴動させる。長時間携帯できるように、電力消費が小さい UHF 帯の電波信号を一定時間だけ返信する。

(2) 試作装置の性能 親機は電力消費が大きいいため電力はフォークリフトから外部供給する。子機は単 4 電池で稼働し、8 時間以上、連続で鳴動し続けることができる。

試作装置の反応距離を図 12 の電波暗室で測定した。親子ともに高さ 70cm の発泡スチロール台に設置し、子機の受信感度を最大にした場合の反応距離は約 7m であった。設計時の目標距離は達成された。反応距離

の誤差は反応距離を 5m に設定した場合で、反応距離のおよそ 5%程度以内であった。電波暗室外では反応距離はおよそ 1 割程度減衰し、最大で 6.5m 程度となった。

親機をフォークリフトに搭載し、子機を高さ約 80cm の木台に置いた状態で、子機が鳴動する距離を測定した。その結果、反応距離は設定よりも約 1 割程度短くなった。フォーク（爪）先端からの最小距離は鳴動 5m 設定で約 1m、7m 設定で 3.5m であった。実用を考えると反応距離を延ばす必要がある。フォークのマスト部が親機からの通信を阻害するようで、鳴動 5m 設定時に、フォークを昇降させた際のマスト位置によっては鳴動しない状況が確認された。子機は周囲を金属に囲われていない限り通信に影響は現れなかった。

反応距離が不安定であると運転者や作業者が的確な時機に危険の存在を認知できなくなる。そのため、試作装置は反応距離の正確さと再現性を重視している。親機からの LF 送信は無指向性を意図して設計されており、図 13 の磁界測定結果に示すように、指向性は低く抑えられている。子機には多少の指向性があるが、親子を併せて誤差 5%程度の指向性で反応距離が確保されており、高い実用性が期待できる。真球状で反応させることも今の技術水準で充分可能である。

電波を利用する利点として、超音波や光線では障害物などで遮蔽されて通信困難な部分にまで信号が回り込んで伝搬される回折現象が期待される。回折現象の確認として衝立板を介在させた場合の影響を電波暗室で検証した。

衝立板は高さ 2m 幅 2m の金属性を用いた。図 14 に示すように、親機から 4m はなれた地点に磁界測定のアナテナを設置し、中間地点に衝立板を介在させた。

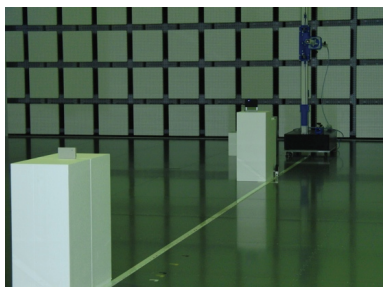


図 12 電波暗室での距離測定

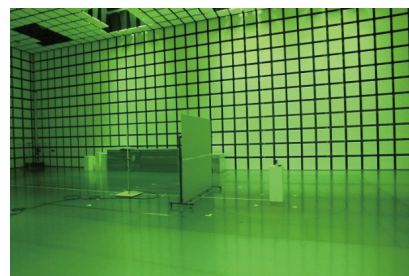


図 14 衝立板を用いた検証試験

磁界強度は衝立板が介在しても最大で4dB程度しか減衰せず、子機の反応距離や反応範囲に変化は確認されなかった。LF帯の回折効果は十分大きいと言える。一方で、子機のUHF帯は減衰が大きく、親機と同じ条件で測定したところ14dB近くの減衰が確認された。親機にUHF信号が届かず、親機が鳴動しない地点が存在した。UHF帯の回折効果は十分とまでは言えない。子機の返信もLF帯を利用することが理想であるが、電力消費量が増大するため、VHF帯などの環境により影響されにくい電波を用いることが望ましいと言える。

4) 実用化に向けた改良

実用化に向けて子機の改良を行った。改良では図15に示す警報機と監視機の2種類を開発した。警報機としての主な改良内容は、反応距離の拡充、通知情報の拡充、充電方式の拡張である。監視機としての改良は警報機の改良に加えて、安全性の拡充も行った。

(1) 警報機の開発 警報機は子機の受信感度を改良して長距離用と短距離用の2種類を開発した。長距離用は反応距離を10mまで延長した。短距離用は反応距離を2mから5mの範囲に感度を合わせた。短距離用は荷役補助などでフォークリフトに接近する必要のある作業を想定したものである。

情報表示灯は

- 青灯：起動状態
- 赤灯：近接情報受信状態
- 黄灯：ノイズ妨害状態

を示す3種類をLEDで備えた。ノイズ妨害状態の表示は、ノイズが多く通信状態が悪い環境では、親機からの接近情報を正確に受信できなくなるため、子機（警報機）が適切に使用できない状況にあることを作業者に注意喚起するための表示である。

子機の試作では電池駆動としたが、実際の運用を考えて電池交換の作業が不要な非接触式の無線給電の充電方式とした。充電器の上に警報機を置くだけで自動充電される。子機から形状が拡大したのは無線給電のためである。

(2) 監視機の開発 監視機は親機の故障（不作動）を検知するための装置である。親機のLF信号が正常に送信されていることを独立して常時確認するために設置する。親機のLF信号を受信出来ない場合に警報を発する。監視機の装置としての物理構成は警報機と



図15 改良後の子機

同じであり、鳴動の制御プログラムのみが異なる。

監視機の利用方法として、例えば、親機をキャビンの屋根に設置し、操作盤付近に監視機を設置すれば、運転者に親機の異常（不作動故障）を警告することができる。

5) 安全運転支援機能の検証

本研究で開発した無線式存在検知装置は親機・子機とも警報を発する安全運転支援機能を持つ。この警報機能により、作業者がフォークリフトの接近に気付き自己で回避すること、ならびに、フォークリフトの運転者が警報により回避操作することで、作業者とフォークリフトとの衝突や接触を防止するものである。この安全運転支援機能が、実際の使用環境に存在しうる阻害要因で損なわれないことを試験で検証した²⁰⁾。

安全運転支援機能の阻害要因として、

- 親機と子機の移動による通信環境の変化
- 電磁雑音等の通信妨害源の介入

などを想定した。

(1) 移動に伴う通信環境の変化 親機・子機の位置関係等により通信感度は変化する。通信感度が著しく低下すれば通信は成立せず、警報が動作しない危険性が想定される。このため、使用条件内では必ず通信が可能であること、あるいは、通信不能場合でも危険な状態にならないことが安全運転支援機能に必要な性能として要求される。

試験の結果、親機から子機へのLF帯の通信は、警報装置が使用される距離の範囲において、安定して機能することを磁界強度の測定により検証できた。一方、子機から親機へのUHF帯の返信は、壁や地面の反射波による干渉（フェージング）が存在し、警報の範囲においても、親機に近接感知の信号が返信できない状態がきわめて稀ではあるが確認された。

(2) 電磁雑音による通信妨害 無線通信を用いる機器は外来の電磁波から妨害を受けると、通信感度が低下して通信困難となる。試作装置では妨害波により警報が動作しない危険性が想定される。このため、使用環境に存在しうる電磁波に対して、警報機能の喪失が無いことが安全運転支援機能に必要な性能として要求される。

試作装置を使用が想定される環境で動作させたところ、子機が電力線やスイッチング電源の極めて近くにある場合には反応距離範囲内でも警報が動作しない場合があった。

6) 実用性についての考察

試験の結果、警報機能が完全に損なわれる状況は稀であるにしても存在し、機能維持の性能は十分ではないことが確認された。これらの無線通信に特有な阻害要因に対する機能維持能力を装置に組み込む必要がある。

安全機能を維持するためには、一般に機能の正常性の確認が求められる。同様の考えから、

- 阻害要因の存在、あるいは、阻害要因による通信への影響を常時確認する監視機能。

- 阻害要因の影響を受けていることを感知した場合に、警報が適切に動作しない状況であることを作業者に情報提示する警告機能。

を無線式存在検知装置に組み込むことで、安全運転支援機能を確保することが可能となる。開発した装置においては、例えば、下記の実現方法がある。

- 親機と子機の間で定期的に双方向通信を行う。親機は UHF 帯の通信機能も備えている。それを利用して、親子の間で通信機能の確認を行う。この定期的な通信が確認できなくなった場合、警報が動作しない状況であることを警告する。
- 子機が受信する LF 帯の信号が、親機から送られてくるものと同じ特徴かどうかを確認する。異なる特徴の信号であった場合それは雑音と考えられ、雑音が存在し警報が動作しない可能性があることの警告を行う。

雑音の警告機能は子機の改良で述べたとおり、警報機で既に対応済みである。安全運転支援機能として向上すべき課題はまだ残されているが、無線通信技術としては基本的な実用性を十分に備えていると言える。無線式存在検知による警報提供はフォークリフトの災害防止としても有効な手段として期待される。

7 おわりに

本報告では昇降機と搬送機の各典型災害事例に対する基本安全技術の検討結果を示した。検討で得られた主な果は次のとおりである。

- 1) 第 3 次産業における昇降機の典型災害は、エレベーターリフトの扉で手指等を挟まれる事例である。閉まりかけた扉と扉、あるいは、扉と台車等に手指を挟まれ、骨折/剥離骨折する事例が多く、また、1 ヶ月以上の休業を要する事例が大半である。
- 2) 昇降機の扉との衝突に起因する上肢骨折を防止するための安全基準を、規格などの規定値と既存の上肢骨折の力学特性の試験結果との対比から検討した。現行の規定値は衝突による危険性に対して必ずしも十分ではない可能性が示された。扉との接触や衝突による上肢骨折を防止するには、挟圧力、衝撃力（動的ピーク力）、運動エネルギー（運動量）を統合して規定する必要がある。
- 3) フォークリフトの運転者に対する保護方策として、身体はみ出し検出による安全装置の検討を行った。ヘッドガードと車体側面に透過形の光線式安全装置を取り付け、運転者の身体が運転席空間から車外に出た際に、必要に応じて走行禁止の制御を可能とする検知装置を実装した。さらに、車体側面に取り付けられたレーザ式センサで壁などの周囲の障害物の存在を確認し、この条件に応じて緊急停止や減速を判断する制御システムを組み込むことにより、運転者の安全を確保しつつ、機械の不要な停止を減らして実用性を高めた。
- 4) フォークリフト周囲の作業者に対する保護方策と

して、無線式存在検知を用いた安全運転支援装置を開発した。実用化するには安全機能のさらなる向上が必要であるが、運転者が周囲の作業者を視認できないときの対策として、無線式存在検知の技術は十分な水準にあると判断された。

文 献

- 1) 岡部, 齋藤, 呂, 池田. 昇降機を起因物とする労働災害の防止に向けた基本課題の把握. 安全工学シンポジウム講演予稿集. 2010 ; 439-441.
- 2) 平成 20 年 12 月 10 日国土交通省告示第 1454 号.
<http://www.mlit.go.jp/common/000034833.pdf>
- 3) 平成 20 年 12 月 10 日国土交通省告示第 1455 号.
<http://www.mlit.go.jp/common/000034832.pdf>
- 4) 販売元.
http://www.excelinc.co.jp/html/safety_tester/kmg-2000-l.html
- 5) 販売元.
http://www.exseal.co.jp/products/kansho/hitohada_sheet.html
- 6) 岡部, 齋藤, 呂, 池田. 昇降機の扉による労働災害防止に向けた安全基準の考察. 産業応用部門大会講演論文集. 2011 ; SY00012-11 : 1-3.
- 7) 日本規格協会. 自動回転ドア-安全性. 2005 ; JIS A 4721.
- 8) 国際標準化機構 : Safety of machinery — Guards — General requirements for the design and construction of fixed and movable guards. 2002 ; ISO 14120.
- 9) 米国ロボット工業会. Personal safety requirements for intelligent assist devices. 2002 ; BSR/T15.1.
- 10) 日本規格協会. 昇降機の安全要求事項 (第 1 部 ロープ式エレベータ). 2011 ; JIS TS A 0028-1.
- 11) 向殿, 池田. 自動回転ドアの安全規格. セイフティエンジニアリング. 2005 ; 1-6.
- 12) 尾原. 腕骨骨折の発生機転に関する研究. 体力科学. 1982 ; 31 : 323-342.
- 13) P. C. Begeman et al. Bending strength of the human cadaveric forearm due to lateral loads. Proc. of 43rd Stapp car crash conference. 1999 ; 343-350.
- 14) S. M. Duma et al. Dynamic injury tolerances for long bones of the female upper extremity. J. Anat. 1999 ; 194 : 463-471.
- 15) K. Gdela et al. On colles' fracture: An experimental study involving structural and material testing. J. Applied Mechanics. 2008 ; 75 : 0310020-1-10.
- 16) 呂, 岡部, 池田, 齋藤. フォークリフトによる労働災害の分析と災害防止策の検討. 安全工学シンポジウム講演予稿集 ; 2011 : 318-321.
- 17) 米国国家規格協会. Safety standard for low lift and high lift trucks. 2009 ; ANSI/ITSDF B56.1.
- 18) 西ヶ谷. 建設機械接近警報装置による事故防止. 建設の施行企画. 2008 ; 701 : 41-46.
- 19) 岡部, 池田, 齋藤, 呂. フォークリフトの安全運転を支援する無線式存在検知装置の開発. 安全工学シンポジウム講演予稿集. 2012 ; 444-445.
- 20) 風間, 岡部, 池田. 無線式近接警報装置の性能評価. 日本

機械学会．生産システム部門研究発表講演会．2013；
13-6：23-24.

- 21) 松石，三浦，小笠原．重機周辺の作業者認識システムの開発．土木学会年次学術講演会講演概要集．1996；6-51：
68-69.