

製造現場における IoT を活用した安全管理システムに関する研究

研究代表者

梅崎重夫 独立行政法人労働者健康安全機構労働安全衛生総合研究所

分担研究者

清水尚憲、齋藤剛、濱島京子、北條理恵子（労働安全衛生総合研究所）

芳司俊郎（国立大学法人長岡技術科学大学）

研究要旨

令和元年度（第1年度）は、国内外の先行技術調査を実施した後に製造現場における IoT を活用した階層的安全管理システムの開発に関する研究を行った。得られた結果と考察の要点は次のとおりである。

1) 国内外の先行技術調査は、文部科学省所管の JDream、特許庁の特許情報プラットフォーム、国立情報学研究所の CiNii 及び Google 検索を対象に実施した。その際、当研究所が実施した「IT を活用した安全衛生管理システム構築の手引き」（2009）と、当研究所、厚生労働省及び日本鉄鋼連盟が連携して実施した「IT を活用した新しい安全衛生管理手法の構築に関する実証試験報告書」（2007、2008）に記載された内容を基盤（最先行）技術とした。

その結果、IoT に関しては、著者らも研究を進めてきた人間機械協調システム、経済産業省が進めている Connected Industries、国土交通省が進めている i-Construction、ICT を活用した人体のウェアラブルセンサなどの分野で先行研究が認められた。また、IoT に関する研究では、本研究で提唱している「モノのインターネット」の「モノ」に人を含める研究が前述した日本鉄鋼連盟の傘下にある企業で IoH または IoX と称して進められ、製品化も実施されていた。これに対し、「作業空間内における人と機械の空間状態の把握」及び「作業支援システムの構築」では類似する研究はあるものの、明確な先行研究は認められなかった（第 7.1 節参照）。

2) 国内外の実態調査では、日本国内の次世代型物流施設 1 社と安全装置メーカー 2 社の現地調査、及びドイツとオランダの専門家に対するヒアリング調査を行った。その際、IoT だけでなく、ICT、AI、5G などの技術動向も含めて調査を実施した。

この調査で明らかになったのは、既に日本国内でも IoT を利用して安全衛生管理を行うことが一般的となっていることである。例えば、次世代型物流施設では現場作業員や倉庫内のフォークリフトに IC タグを取り付けて作業の進捗状況などを IoT で把握し、安全管理を行っていた。また、作業員にバイタルセンサや IC タグを着用させ、IoT によって生体情報などを集中管理する熱中症防止用の衛生管理システムの構築も進められていた。さらに、レーザー式のセンサを利用して火災の 24 時間監視を IoT で行う防災システムも開発されていた。同様に、安全装置メーカーでは、全国にある生産ラインの診断情報を IoT やネットワークを介して収集し、AI によって故障や劣化の診断を予測するシステムを構築していた。このシステムは、将来的には海外の工場と IoT やネットワークを介して情報共有を図ることを目指しているとのことであった。しかし、各国毎の規制の違いや膨大な個人情報の保護などの課題は依然として残されているとのことであった。

これに対し、ドイツの専門家は IoT や ICT の安全管理への利用は具体的な規格や規制がないという理由から、機械の安全制御への適用は難しいとの意見であった。この点は「機械災害防止対策の基本は ISO12100 に定める本質的安全設計方策と安全防護（ガードまたは保護装置）であり、ICT や IoT の安全管理への活用は他に適切な代替手段がないときのやむを得ない次善の策として扱われるべき」とする本研究の参加者と同意見であった。以上の点からも、IoT や ICT を活用した安全管理はあくまでも下記 3) に示す支援的なりリスク低減策に限定すべきと考える（第 7.2 節参照）。

3) 本研究では、IoT を活用した階層的安全管理システムを「安全情報を利用して機械の運転許可を行う安全確認型インタロックと、IoT を利用して残留リスクに対する危険回避情報を取得して人や機械

の危険回避を行う疑似インタロックを階層的に構成したシステム」と定義した。このうち後者は、機械安全国際規格に定められた本質的安全設計方策(ステップ1)と安全防護(ステップ2)では除去・低減できない残留リスクを対象に、人の注意力に依存した管理的対策の代替手段として支援的なリスク低減を図ることを目的とする。

このシステムでは、開発に先行して 階層的安全管理システムの定義、階層的安全管理システムで利用される安全関連情報の基本特性の比較、階層的安全管理システムの構成理論、及び 階層的安全管理システムを対象とした危害の発生確率の定量的評価手法の検討を必要とした。このため、本報告書では、まず第3章で階層的安全管理システムの定義を提案した後に、第4章では安全確認形インタロックで利用される安全情報とIoTで利用される危険回避情報の基本特性の比較、第5章では階層的安全管理システムの構成理論、第6章では階層的安全管理システムを対象とした危害の発生確率の定量的評価手法を提案した(第3～6章参照)。

- 4) 本研究では、作業空間内における人と機械の識別と存在位置検知を高い信頼性で行う装置として、独自の可視光通信機能を備えた装置(カシオ計算機株式会社製ピカリコ)を選定した。この装置では、人と機械にLED灯を取り付け、このLED灯の発行色(赤、緑、青)を100msec単位で24個の順列として変化させ(したがって1種類の情報の送信には2.4secが必要)その変化をカメラで受信することで人と機械の識別と存在位置検知を三次元的に行う。したがって、この装置は数10msec単位の迅速な応答が要求される現場には向かないが、外乱の要因となる太陽光(直流光)との識別も可能であり、かつ死角が生じないように複数のカメラを受信器として配置できれば、人と機械の識別と存在位置検知が可能と考えられる。

実験の結果、本装置の水平方向の測定誤差は欠損率が問題にならないという条件の下で400mm程度、垂直方向の測定誤差は20mm程度であり、作業者と機械の危険源の接近検知用として十分な精度で三次元計測を行えることが確認できた。ただし、この装置では三次元位置計測の欠損率と測定誤差はトレードオフの関係にあるため、欠損率と測定誤差の両方を満足できるように最適設計を行う必要がある(第7.3節参照)。

同様に、Bluetoothを用いた測位装置として、センサビーコンシステム(ホシデン株式会社製MEDI TAG)を選定した。この装置は現段階では水平方向の測定誤差は数mと必ずしも十分でないが、今後の改善と実証実験を進めることによって作業空間内における人と機械の識別と存在位置検知を行える装置として発展して行ける可能性も考えられる。

- 5) 本研究で開発した作業支援システムは、前述の可視光通信装置を利用して人と機械の識別と存在位置検知(三次元位置計測)を行い、その結果を基に作業者と機械の危険源の接近を検知し、警報等で注意を促すシステムである。このシステムは危険回避情報(警報など)の生成を目的としたもので、実際の運用にあたっては、別途、安全情報を生成する安全確認形インタロックとの階層化構成を必要とする(第7.4節参照)。
- 6) 本研究では、安全装置の有効性を定量的に把握する装置として、多数の安全装置の無効化や故障に関する情報をリアルタイムに把握できる装置の予備試作を行った。この研究は緒に就いたばかりであり、今後は当研究所に設置している作業支援システムを対象に安全装置の有効性評価を可能とするシステムの開発を試みる。その結果を基に、最終的には公衆回線などを使用して、エンドユーザーの社内ネットワークを介さずに安全装置に関する情報を送受信できるシステムを構築し、安全装置のコホート研究を実施したいと考えている(第7.5節参照)。
- 7) 本研究では、危険点近接作業で使用する重要な装置として、3ポジション・イネーブル・スイッチの論理構成と実験的評価を行った。現段階では被験者数が少ないので今後のデータの蓄積が必要であるが、危険事象がいつ発生するか分かっていれば人は迅速に対応できる可能性があることや、いつ危険事象が発生するか分からなくても、危険事象の具体的内容が分かれば反応時間が短くなる可能性があることが推察できた(第7.6節参照)。
- 8) 本研究では、AI等に関する労働政策審議会の報告書とIoTシステムで利用される情報の基本特性

を考察した。その結果、労働政策審議会の報告書では IoT や AI 等の導入による安全性の問題について言及がなく、この点を本研究の課題とする必要がある。

特に、AI 等を利用した自動運転では、「緊急時に AI 等による判断と人による判断のどちらを優先するか」という問題が存在する。また、IoT を利用したシステムでは、センサや制御システムを含めた故障やトラブルによって「危険を誤って安全と判定」することがある。これらの問題に関しては、安全確保に関する責任問題も含めて検討が必要である。

さらに、労働政策審議会の報告書では AI 等に関する技術進歩を肯定的に捉えている。しかし、AI で必要な「機械学習」では、教師である人間が大量の画像データなどを教材にして「これは何々です」と AI システムに教え込む作業が必要である。この作業に要する時間は AI システムの開発に要する時間の 8 割近くを占めると言われており、作業に従事する労働者にとっては大変過酷な単純労働であると言われている。この点は本報告書の範囲外であるが、AI システムを労働現場に導入する際に配慮すべき重要な課題と考えられる（第 8.1 節参照）。

- 9) IoT システムで扱う情報の基本特性では、IoT で収集する情報が労働者の健康情報を始めとする個人情報である点を考慮する必要がある。この場合の対策としては、セキュリティ対策などの技術的問題だけでなく、人間の尊厳に関連する倫理的問題（例えば、個人情報の保護やプライバシーの侵害防止など、要するに人間の尊厳の尊重）も含めて 社会全体で議論して行くべき課題 と考える（第 8.2 節参照）。

1 研究目的

機械設備に起因する労働災害を防止するには、機械の設計・製造段階で適切な安全方策を実施する必要がある。この方策は機械の危険部分にガードや保護装置（安全装置）を設けるという方策が一般的であった。

しかし、人と機械が共存・協調して作業を行う複雑なシステムでは、ガードのような単純な方策では明らかに限界がある。このため、光線式やレーザー式の保護装置（安全装置）によって人や機械の状態をリアルタイムに把握して適切な安全管理（制御）を行うシステムの開発も進められている。しかし、技術の進歩は日進月歩であり、欧州での Industry4.0 や日本での Safety2.0 及び ICT や AI の成果も踏まえて新たな安全管理（制御）システムの構築を目指す必要がある。

この検討でコアとなるのが IoT である。この用語は internet of things（モノのインターネット）の略で、すべての「モノ」がインターネットにつながり、様々な「モノ」から必要な情報を必要なときに得ることで最適な制御を可能とする技術である。ただし、労働安全の分野では、「モノ」とは製品だけでなく、人、機械、作業環境などの様々な要素を含む。現在、この技術は生産技術の場で利用されているが、労働安全の場でも「モノ」の概念を人にも拡張するこ

とで次のような利用可能性が考えられる（図 1 参照）

- 1) 作業空間内の人と機械の空間状態の把握（主に令和元～2年度）

人と機械の共存・協調作業では、両者の空間関係で様々な危険状態が生じる。そこで、IoT を活用して空間内に存在する人や機械の存在検知、位置検出、固体識別を検討し、人と機械の空間状態の把握を試みる。

- 2) 安全装置の有効性評価（主に令和 2～3 年度）

実際の安全装置では、作業による意図的無効化や安全装置の故障によって安全装置が無効となることがある。そこで、IoT の活用によって実際に使用されている多数の安全装置の無効化や故障に至る情報をリアルタイムに把握し、安全装置の有効性を定量的に把握する。筆者らは、この研究を「安全装置のコホート研究」と呼んでいる。

- 3) 作業支援システムの構築（主に令和元～3年度）

人、機械、作業環境を始めとする様々な「モノ」からの情報によって、安全性と作業性の両立を図りながら、作業者の資格と権限に合わせた最適な作業支援システムの構築を試みる。このシステムでは、例えば RFID などから情報を取得し、最適な作業支援を行えるようにする。

以上の研究は、上記1)～3)の開発に留まらず、申請者らが2009年に公表した「ITを活用した安全衛生管理システム構築の手引き」¹⁾を対象にIoTの活用も含めて高度化を目指す(令和3年度)。

2 期待される成果

本申請研究の実施によって次のような効果が期待できる。

- 1) IoTの活用によって作業空間内における人・機械・作業環境の状態、安全装置の有効性評価、及び作業支援システムの構築が可能となり、労働者の安全を確保する上で重要な意義がある。
- 2) IoTの労働安全分野への活用を機械分野に限らず様々な分野の行政施策に活用できる。
- 3) IoTやAIなどを利用して「安全の見える化」を図るための新しい技術体系を確立できる可能性がある。この点を考慮したとき、中小零細企業に対する波及効果は高いと考えられる。
- 4) 「ITを活用した安全衛生管理システム構築の手引き」をIoTの活用も含めて再検討し、手引きの高度化を図ることで事業場における自主的な安全管理活動を促進でき、労働安全衛生行政の推進に貢献できる。
- 5) 労働災害に起因する損失を減少できるために、長期的に見た場合、企業の競争力が高まる。

本研究の特色は安全管理にIoTの技術を新たに導入する点にある。しかし、実際の現場では依然として旧式の機械に起因する労働災害が多発している。したがって、これらの災害を熟知した申請者らが本研究を担当することで、単に「新技術であれば何でも良い」とする誤った労働安全衛生方策を是正できるという効果を生むことも可能と考える。

3 用語の定義と本研究で実施する事項

3.1 用語の定義

1) IoT

IoT(Internet of things)とは「モノのインターネット」の略で、コンピュータなどの情報・通信機器だけでなく、世の中に存在する様々な物体(モノ)に通信機能を持たせ、インターネットに接続して相互に通信することにより、自動認識や自動制御、遠隔計測などを行う仕組み

をいう(IT用語辞典 e-Words²⁾の記載を基に作成)。

従来の情報通信システムでは、人がシステムに対し入力や操作を行うことでシステムを効率的に制御することを特徴としてきた。これに対し、IoTでは、人がシステムに能動的な働きかけを行わなくとも、モノが情報を自動的に収集し、集積し、解析を行った上でシステムを制御し、新しい価値を生み出すことを特徴とする³⁾。

このようなIoTシステムを実際に運用するにあたっては、新しい価値の創造や効率性だけでなく、安全性、情報セキュリティなどの技術的問題とともに、個人情報の保護やプライバシー侵害の防止などの人間の尊厳に関する倫理的問題を解決する必要がある。

なお、本研究では「モノ」の中に人、機械、作業環境などの様々な要素を含むものとする。

2) 安全確認形インタロック

安全装置からの安全情報によって人の安全が確認できるときに限って、機械の運転を許可する仕組みをいう⁴⁾。安全確認形インタロックはフェールセーフ⁵⁾な構造とする。

3) IoTを活用した階層的な安全管理システム

安全情報⁶⁾を利用して機械の運転許可を行う安全確認形インタロックと、IoTを利用して残留リスクに対する危険回避情報⁶⁾を取得して人や機械の危険回避を行う疑似インタロックを階層的に構成したシステムをいう。

ここで疑似インタロックとは、機械安全国際規格ISO12100⁷⁾に定められた本質的安全設計方策⁷⁾(ステップ1)と安全防護⁷⁾(ステップ2)では除去・低減できない残留リスクを対象に、人の注意力に依存した管理的対策の代替手段として支援的なリスク低減を行うことを目的とする。

3.2 本研究で実施する事項の概要

研究計画は次の6項目で、概要は以下のとおりである。なお、以下の開発では日本機械工業連合会を始めとする業界団体や多くのメーカー、ユーザーの協力を得る。

1) 文献調査及び国内外の現場調査

製造業や建設業などで使用されているIoTの現場調査、先行技術調査及び文献調査を実施し、本研究で開発するシステムの仕様に反映させる。

2) 階層的安全管理システムの構成理論の提案

本研究で新たに提案する階層的安全管理システムを対象に、システム構成理論、システムで扱う情報の基本特性の比較、危害の発生確率の定量的評価手法などを提案する。

3) 作業空間内における人と機械の空間状態の把握

人と機械の共存・協調作業では、両者の空間的關係で様々な危険状態が生じる。そこで、IoT を活用し空間内に存在する人や機械の存在検知、位置検出、固体識別などを検討し、人と機械の空間状態の把握を試みる。

4) 安全装置の有効性評価

実際の安全装置では、作業者による意図的無効化や安全装置の故障によって安全装置が有効でなくなることがある。そこで、IoT の活用によって実際に使用されている多数の安全装置の無効化や故障に至る情報をリアルタイムに把握し、安全装置の有効性評価の可能性を検討する。

5) 作業支援システムの構築

人、機械、作業環境を始めとする様々な「モノ」からの情報によって、安全性と作業性の両立を図りながら、作業者の資格と権限に合わせた最適な作業支援システムの構築を試みる。このシステムでは、例えば RFID などから情報を取得し、最適な作業支援を行う方法なども検討する。

6) IoT 及び ICT を活用した安全管理システム構築の手引きの検討

申請者らが 2009 年に公表した「IT を活用した安全衛生管理システム構築の手引き」を IoT の活用も含めて再検討し、手引きの高度化を目指す。

3.3 本研究の特徴と新規性

以上の研究では第 1 年目に現場調査及び先行技術調査を実施する。また、第 1 ~ 2 年目にシステムの検討を行い、第 2 ~ 第 3 年目に有効性評価を行い、第 3 年目に手引き(ガイドライン)の高度化を行う。具体的には、次の点に留意して研究を実施する。以上の研究の特徴と新規性は次のとおりである。

1) IoT を活用した階層的安全管理システムの構成理論

本研究の特徴は、新たに IoT を活用した階層的

安全管理システムの構成理論を提案する点にある。この提案によって、機械安全国際規格 ISO12100 に定められた本質的安全設計方策(ステップ 1) と安全防护(ステップ 2) では除去・低減できない残留リスクに対する方策を明確にする。

2) 識別・位置等検出システムの実証実験

本研究の特徴は、既に申請者らが開発し、国際的にも評価を得ている支援的保護システム(Supporting Protective System; SPS)⁸⁾を利用して人と機械の空間状態を把握する技術を目指す点にある。

現在までに開発した支援的保護システムを用いて、製造現場における実証実験を行い、現場に合わせてシステムを改善・検証する。

3) 安全装置の有効性評価

本研究の特徴は、医学や労働衛生の分野で実施されている人に対するコホート研究の方法論を「モノ」である安全装置を対象に実施する点にある。具体的には、IoT の活用によって実際に使用されている多数の安全装置の無効化や故障に至る情報をリアルタイムに把握し、安全装置の有効性を定量的に把握する。ただし、このような研究は緒に就いたばかりなので、本研究では当研究所に設置されている模擬システムを対象に安全装置の有効性評価が可能であるかを予備的に検討する。

4) 作業支援システムの構築

本研究では、従来のハードウェアの観点とは異なる人の行動という観点から、安全性と作業性の両立を目的として、作業者の資格と権限に応じた支援システムを構築する点に新規性がある。

この支援システムを対象とした実験では、新たに行動分析学⁹⁾的観点から実験の評価や統計解析を行い、人の行動を支援するシステムの基礎的要件や人の行動に着目した新たな教育訓練手法などの創出を目指す。

5) 手引き(ガイドライン)の高度化

欧州の Industry4.0¹⁰⁾の成果からも明らかのように、現在の安全制御システムでは伝統的な機械安全(インタロックやフェールセーフ技術を含む)技術とともに、IoT や AI などの技術を適切に活用することで、作業性や生産性にも優れた高度なシステムを構築できる可能性がある。

そこで、申請者らが 2009 年に公表した「IT を活用した安全管理システム構築の手引き」を基盤に置いた上で、この手引きに IoT の視点も踏まえた新たなガイドラインを最終的な成果物として提案する。

4 安全関連情報の基本特性の比較

4.1 序論

機械の安全制御で利用する安全情報^{5) 6)}では、安全情報がオン（安全）であるときに機械の運転を許可し、オフ（危険）であるときに機械の運転を禁止する。

この情報は機械の運転を直接制御するために、情報の誤りは労働災害に直結する。しかし、安全情報が人工物である限り、誤り（故障）のない情報の生成・伝達・消去は不可能である。このため、安全情報を利用して機械の安全制御を行うシステムでは、故障時にはシステムが必ず安全側（機械が停止する側。「安全側故障」と呼んでいる）となるように故障の仕方に癖を付けて労働災害を防止する。

このときに利用されるのがフェールセーフ技術であり、故障時には自然法則を利用して必ず安全情報の出力をオフ（機械停止側）に固定する構造が長年に渡って研究されてきた。この構造は、一般にフェールセーフ構造と呼ばれる。

これに対し、人が安全管理で使用する危険回避情報^{5) 6)}（例えば、災害情報、ヒヤリハット情報、失敗情報、安全作業標準や労働安全衛生マネジメントシステムで利用される情報など）では、誤りの存在を前提に PDCA サイクル¹²⁾の下で情報の継続的改善を図る。この仕組みは労働安全衛生マネジメントシステムなどで使われている。この単純な比較からも分かるように、安全情報と危険回避情報は基本特性に根本的な違いがあると考えられる。

本研究では、以上の観点から、機械安全で使われる安全情報と安全管理で使われる危険回避情報の基本特性の検討を試みた^{5) 6)}。

4.2 機械安全と安全管理の連携モデル

人間機械作業システムで扱う情報には、システムが定めた目標の達成に関連する情報と、システムの保護（災害防止など）に関連する

情報がある。以後、前者を“機能情報⁵⁾”，後者を“保護情報⁵⁾”と呼ぶ。

このうち、機能情報では、情報に含まれる誤りは後からの見直しによって修正が許される。したがって、この情報を対象とした制御モデルは、自動制御分野の知見にしたがってフィードバックモデル（管理工学的観点からは情報の継続的改善を伴う PDCA サイクル）で表現できる（図 2 のプロセス参照）。

これに対し、保護情報では、情報に含まれる誤りは時として人身災害などの取り返しのつかない事態を発生させるから、後からの見直しと修正が許されない。しかし、現実には、保護情報の中には、前述した安全管理に関する情報（災害情報やヒヤリハット情報など）のように、やむを得ず後からの見直しと修正によって情報の継続的改善を図らざるを得ない情報も考えられる。このことは、保護情報に次の 2 種類があることを意味する。

1) タイプ A の保護情報

安全管理に関する情報を後から PDCA サイクルの下で見直すことによって、情報の継続的改善を図るタイプの保護情報である。災害情報、失敗情報、ヒヤリハット情報、安全作業標準などが代表的である。以後、これを危険回避情報と呼ぶ。主に安全管理で使われる情報であり、情報の継続的改善を伴う PDCA サイクルを制御モデルとする。

2) タイプ B の保護情報

災害防止に関する予測と回避の確実性が要求されるために、PDCA サイクルに基づく後からの見直しと修正が許されないタイプの保護情報である。前述した安全情報が代表的である。

安全装置からの安全情報によって人の安全が確認できるときに限って、機械の運転を許可する仕組みを安全確認形インタロックと呼ぶ（第 3.1 節 2）参照）。図 3 に、安全確認形インタロックの基本構成図を示す。

このモデルでは、安全装置で生成された安全情報 $S_c(t)$ と運転命令 $I(t)$ の両方がオンであるときに機械の運転許可出力 $W(t)$ はオンとなり、機械の運転が実行される。これに対し、安全情報 $S_c(t)$ または運転命令 $I(t)$ のいずれか一方がオフのときは機械の運転許可出力 $W(t)$ はオフとなり、機械の運転は停止する。

以上の信号処理は、図3の論理積演算要素 (ANDゲート) G が行なう。以下、 G を単にゲートと呼ぶ。ただし、 $I(t)$ 、 $S_c(t)$ 、 $W(t)$ はいずれも2値論理変数で、 $I(t) = 1$ は運転命令あり、 $I(t) = 0$ は運転命令なし、 $S_c(t) = 1$ は安全、 $S_c(t) = 0$ は安全でない、 $W(t) = 1$ は機械の運転許可、 $W(t) = 0$ は機械の運転禁止を意味する。

図4に、以上の検討に基づく機械安全と安全管理の連携モデルを示す^{5) 6)}。このモデルでは、インタロックで災害防止のための決定論的な予測と回避を行なう(機械安全)とともに、PDCAサイクルで災害防止システムの継続的改善を図る(安全管理)。ただし、図4ではモデルを示しただけで、危険回避情報の継続的改善を促進する条件や、安全情報を使って災害の事前予測と回避を決定論的に達成する条件などは検討していない。そこで、これらの条件を解明するために、表1の記載を基に安全情報(第4.3節)と危険回避情報(第4.4節)の基本特性を考察する。

4.3 安全情報の基本特性

1) 安全情報のユネイト性

最初に、安全情報の基本特性について考察する。安全情報では、災害の事前予測と回避で決定論的特性が要求されるため、予測と回避に関して誤りは許されない。しかし、情報が人工物である限り、誤りを発生しないのは不可能である。

そこで、システムに発生する誤りのうち、危険側となる誤り(機械が誤って運転する側)は許容しないが、安全側となる誤り(機械が誤って停止する側)は許容するようにシステムの特性を定める。以後、これを非対称誤り特性⁴⁾と呼ぶ。この特性を具現化する技術がフェールセーフである。

この関係は、真に安全である($S = 1$)ときに誤って安全情報の出力を停止する($S_c = 0$)安全側故障は許容するが、真に安全でない($S = 0$)ときに誤って安全情報を出力する($S_c = 1$)危険側故障は許容しない特性を示している。以後、この関係をユネイト性⁴⁾と呼ぶ。

表2に、ユネイトな特性を示す。ただし、

実際のシステムでは、任意の時刻 t でユネイト性が成立する必要がある。この関係は次のように表すことができる。

$$S(t) = S_c(t) \quad (1)$$

以後、(1)式を時間軸上のユネイト性と呼ぶ。この式の下で予測と回避の確定性を満足させるには、次の2)~4)の条件を満足しなければならない。

2) 安全情報の予測性と有効寿命

図5に、安全情報の時間軸上の特性を示す。図で、 t_0 は予測の開始時刻、 t_H は真の災害の発生時刻であり、 t'_H は t_H より微小時間(>0)だけ前方の時刻である。また、 t_C は予測に必要な時間、 t_B は回避に必要な時間である。

このとき、災害を確実に防止するには、予測開始時刻 t_0 は次の条件を満足する必要がある。

$$[t'_H - (t_C + t_B)] \quad (2)$$

以後、これを安全情報の予測性に関する条件と呼ぶ。

(2)式の下で予測を行って、安全を確認したときに安全情報 $S_c(t)$ を出力する。しかし、この場合 $S_c(t)$ は無条件に継続出力できるわけではなく、図5の L の間しか出力を許されない。以後、この点を、安全情報 $S_c(t)$ が有効寿命 L を持つという。この場合、 L は次の範囲内に制限される。

$$L \in [t'_H - (t_C + t_B)] \quad (3)$$

3) 安全情報のエネルギー条件

実際の安全情報の生成過程では、安全の確認にエネルギーを必要とする。図6に、そのときの観測方法を示す。この方法では、空間に対して観測に必要なエネルギー e_{IN} を与えるとともに、これらの空間から得られるエネルギー e_{OUT} を利用して安全情報を生成する。ただし、ここで言うエネルギーとは人体に傷害を及ぼす可能性のある有効エネルギーのことをいう。これを文献9)ではエクセルギと呼んでいる⁹⁾。

この場合、エネルギー e_{IN} と e_{OUT} は環境からの外乱(ノイズなど)に影響されないように、十分なレベルに設定する必要がある。また、 e_{IN} と e_{OUT} は人体への作用によって災害が生じないように(たとえば、レーザー光を使

用して観測を行うときの眼の損傷など), 上限値を設定する必要がある。

ここで, $NOISE$ を外乱に影響されないエネルギーレベル, H を人体に傷害を及ぼさないエネルギーレベルとすると, 以上の関係は次式となる。

$$NOISE \quad e_{IN} \quad H \quad (4)$$

$$NOISE \quad e_{OUT} \quad H \quad (5)$$

図6のモデルは, 空間に対する2種類の観測方法を示している。このうち, 第一の方法では, 図6(a)のように, 空間に対して危険を検出するためのエネルギー e^D_{IN} を与え, このとき空間から危険を意味するエネルギー e^D_{OUT} の発生があるときに(人体の存在によるエネルギーの反射など), 安全情報の出力を停止させる。著者らは, これを危険検出形⁴⁾と呼んでいる。

この方法では, エネルギー e^D_{IN} の発生手段が故障すると, 危険を意味するエネルギー e^D_{IN} が検出できないために人体の見逃しなどが起こる。そこで, 図6(b)のように, 空間に対して常時安全を確認するためのエネルギー e^S_{IN} を与えておき, このとき空間から安全を意味するエネルギー e^S_{OUT} の発生があるときに(人体が存在しないことによるエネルギーの透過など)安全情報を出力する方法を採用する。著者らは, これを安全確認形⁴⁾と呼んでいる。既に第4.2節では安全確認形インタロックという用語を使用しているが, 図2のインタロックが安全確認形でなければならないのは, 上記の理由による。

4) 安全情報とエントロピ

次に, 安全情報を有効寿命内で確実に消去する方法を考察する。図7に, 検討に使用したモデルを示す。図で, 系 f は保護装置(安全装置)であり, 入力を e^S_{IN} , 出力を s_c とする熱力学系で表す。また, 系 u は系 f の環境系(外界)である。

このとき, 系 f の有効エネルギー E_f (エクセルギに相当する) は内部エネルギーを U_f , エントロピを S_f で表し, 環境系 u の内部エネルギーを U_0 , 温度を T_0 , エントロピを S_0 とすると, 次式となる⁹⁾。

$$E_f = (U_f - U_0) - T_0(S_f - S_0) \quad (6)$$

ただし, 系 f では, 一般に圧力変化と体積変化の影響は少ないので, (6)式から除外した。

次に, (6)式にしたがって系 f の挙動を考える。これには, 一般に次の形態が考えられる。

(a) 開放系

この系では, 環境系(外界) u との間に絶えずエネルギーの授受が生じているために, U_f 及び S_f の挙動は予測不可能である。したがって, E_f の挙動も決定できない。

(b) 閉鎖系

この系では, 環境系(外界) u との間にエネルギーの授受はない。このような系では, 「内部エネルギーは常に一定」(熱力学の第一法則)であり, 「エントロピは常に増大する」(熱力学の第二法則)ため, U_f は常に一定となり, S_f は常に増大する。したがって, E_f は最終的には必ず基底状態 E_0 となるため, 系 f の挙動は決定性がある。

すなわち, 故障発生時には系 f を熱力学的閉鎖系とすれば, 熱力学第二法則に基づくエントロピ増大過程にしたがって系 f の有効エネルギーを基底状態に決定論的に遷移できる。一方, 系 f の出力 s_c は E_f に依存する(E_f が基底状態になれば, s_c は発生しない)から, 結局, 故障時に系 f を閉鎖系とすれば安全情報の出力を確実に停止できる。この場合, 実際の消散過程では, 安全情報は有効寿命内に消去を完了できるように時間軸上のエントロピ増大過程を設定しておく必要がある。

4.4 危険回避情報の基本特性

危険回避情報を処理するシステムでは, 情報の処理(人による情報の認知と判断、及び当該情報に基づく危険回避行動)を人間が行なうために危険側誤りの発生は不可避である。そこで, このような性質を備えた危険回避情報の基本特性の解明を試みた。このときの基本特性は次のように考えられる。

1) 危険回避の失敗を契機として自己組織化が促進される情報であること

危険回避情報を処理するPDCAサイクルでは, 万一、危険回避に失敗したときはその原因を追究し、危険回避を担うシステムを改善する必要がある。この改善は、計画(P)、実行(D)、

評価（C）、改良（A）のすべてのプロセスで実施される。筆者らは、これを秩序化または自己組織化と呼んでいる。

実際には、取り返しのつかない災害を発生させてから自己組織化を進めても、危険回避システムとして十分な役割を果たしたとは言えない。そこで、実際の災害（危害）に至る前の危険状態や危険事象の段階で不具合を発見し、自己組織化を目指す。

2) 想定内と想定外の危険に対しては情報の形態が本質的に異なること

想定内の危険に対しては、マニュアル（作業標準）や訓練などの定型的な危険回避情報が役立つ。これに対し、想定外の危険に対しては、マニュアルや「訓練」では対応が困難で、想定外の事態に対しても柔軟に対応できる独創性を育てるための理論的、実践的な「教育」を必要とする。

この教育には様々な内容が考えられるが、例えば、理工学や安全工学に対する基礎知識、現場・現物での体験に基づく実践的な技能、歴史に残る重大な事故や災害の情報などが、危険回避情報として役立つと考えられる。

3) 災害情報は秘匿性を備えていること

秘匿性とは、事故や災害を起こした当事者が責任追及や社会的信用の失墜を恐れて、災害情報を広く一般に公開せずに、関係者だけに秘匿する性質をいう。

この性質があるために、災害情報は時間の経過と共に忘れ去られてしまったり、単純化・歪曲化・神話化されたり、関係者だけでローカル化され、他の組織に伝達されないなどの問題が起きる¹⁰⁾。同様の知見は災害情報の上位概念である失敗情報の考察でも得られており、秘匿性はこれらの情報に共通する一般的性質と考えられる。

この問題に対する方策としては、事案の性質にもよるが、例えば責任追及と原因調査を分離する社会制度の構築なども重要と考えられる。また、現状では機械の使用者側に過大な責任が負わされる場合も多いが、機械の設計者側が適切な保護方策を実施していれば回避できた災害も多いと考えられる。したがって、機械の災害が発生した場合は、機械の使

用者側で秘匿されている災害情報を原則として公開し、機械の設計・製造者側が行う設備的な保護方策に反映させる仕組みも重要と考える。

4.5 結論

以上、機械安全と安全管理の連携モデルの構築を試みるとともに、機械安全で使用する安全情報と安全管理で使用する危険回避情報の基本特性の解明を試みた。これによって得られた結果は次のとおりである。

1) 危険回避情報と安全情報の制御モデルを解明した。このうち、前者は情報の継続的改善を伴うPDCAサイクルを制御モデルとするのに対し、後者は安全確認形インタロックを制御モデルとする。

2) 安全情報の基本特性を解明した。この情報では、災害の予測と回避の確定性を保証するために時間軸上のユネイト性を満足しなければならない。この具体的要件として、安全情報は有効寿命を持つこと、危険検出形でなく安全確認形とすること、情報を消去する際に熱力学第二法則に基づくエントロピ増大過程を利用することなどがある。特に、一般の情報理論では情報の生成と伝達に重点が置かれるのに対して、安全情報では誤った情報の伝達を防止するために情報の“消去”に対して確定性を持たせることが重要である。

3) 危険回避情報の基本特性を解明した。この情報は、危険回避の失敗を契機として自己組織化が促進される情報であること、想定内と想定外の危険に対しては情報の形態が本質的に異なること、災害情報は秘匿性を備えていることなどが重要である。

5 IoTを活用した階層的安全管理システムの提案

5.1 序論

機械に起因する労働災害は長期的には減少傾向にあるものの、依然として死亡や重篤な障害を残す災害が発生している。この原因の一つにガードや保護装置(安全装置)などの技術的安全方策の不具合があることが指摘されている¹¹⁾。

欧州では、この問題への方策として、1970年代頃から「人は誤り、機械は故障やトラブルを起こす」ことを前提に、機械の設計・製造段階での技術的安全方策が進められてきた。この方策は、1985年のニュー・アプローチ政策としてまとめられた。この要点は次のとおりである^{1,2)}。

- 1) 安全上の必須要求事項としてのEU指令と、これを補完する体系的な技術仕様書としての欧州安全規格(EN規格)
- 2) モジュール方式による必須要求事項への適合性評価と、EU域内での検査や検定の相互認証
- 3) 必須要求事項への適合を自己責任に基づき自ら宣言するCEマーキング制度

以上の施策は、欧州の機械安全規格(EN規格)がウーン協定やドレスデン協定に基づきISOやIECの原案となったこともあって、日本でも急速に広まった。しかし、日本では、国際水準の機械安全技術の核心を十分理解した上で機械が設計・製造されているとは言えないとの意見もあった。

このため、厚生労働省では、国際水準の機械安全技術の核心に相当する内容として、機械安全規格ISO12100と実質同一である「機械の包括的な安全基準に関する指針」(平成13年制定、平成19年改正)を公表した。また、平成18年には労働安全衛生法を改正し、リスクアセスメントを努力義務化した。さらに、平成23年にはプレス機械の労働安全衛生規則と構造規格を改正し、平成25年には食品加工用機械の労働安全衛生規則を新設した。

本稿では、最初に、以上の施策が実施された時期の前後である平成元～14年と平成26～30年の間に、機械に起因する労働災害の発生状況がどのように変化したかを死亡労働災害の詳細分析によって解明を試みた。

その結果、機械安全規格ISO12100に基づく方策だけでは労働災害を完全に防止できない危険点近接作業や広大領域内作業などが認められた。本研究では、このような他に適切なリスク低減策がない作業に対して、ISO12100に定められた本質的安全設計方策(ステップ1)と安全防護(ステップ2)では除去・低減できない残留リスクを対象に、人の注意力に依存した管理的対策の代替手段としてICTやIoTを活用した支援的なリスク低減策を提案せざるを得なかった。

ただし、機械災害防止対策の基本はISO12100に定める本質的安全設計方策と安全防護(ガードまたは保護装置)であり、ICTやIoTの安全管理への活用は他に適切な代替手段がないときの限定された次善の策として扱われるべきである。

5.2 分析の対象とした労働災害

1) 分析対象

分析の対象とした労働災害のデータは、次の2種類である。

<災害データ群1>

平成元年から平成14年の間に、首都圏(東京都、埼玉県、千葉県、神奈川県)で発生した機械に起因する死亡労働災害129件

<災害データ群2>

平成26年から30年の間に、全国(東京都、埼玉県、千葉県、神奈川県、栃木県、群馬県、茨城県、愛知県、大阪府、兵庫県、福岡県)で発生した機械に起因する死亡労働災害109件

以上の分析では、対象業種は製造業に限定し、事故の型は「はさまれ・巻き込まれ」と「激突され」に限定した。また、車両系荷役運搬機械及び建設機械等は労働災害の発生態様が一般工作機械とは異なるため、対象から除外した。

2) 分析方法

以上の労働災害の原因分析では、「なぜ?」という質問を繰り返すことによって、直接原因(不安全状態、不安全行動) 基本原因(設備要因、人的要因、作業要因、管理要因) 根本原因へと帰納的に原因を追究して行く方法を採用した。

ただし、基本原因の分析では、設備要因の中でも特に頻度が高いと推察された「固定式ガードの不具合」、「可動式ガードの不具合」、「保護装置の不具合」及び「制御システムの安全関連部の不具合」を重点に分析を行った。同様に、作業要因の中でも特に頻度が高いと推察された「危険点近接作業」及び「広大領域内作業」を重点に分析を行った。

3) 統計解析の方法

設備要因と作業要因に関連した死亡労働災害の件数を対象に、災害データ群1と災害データ群2との関連をPearsonの²検定を用いて統計解析を行った。これらの解析にはSPSS Ver19 for Windowsを使用した。

5.3 基本原因の分析結果

1) 設備要因の分析

表3に、災害データ群1と群2を対象に、技術的安全方策の不具合に起因して発生した死亡労働災害の分析結果を示す。表3からも明らかのように、技術的安全方策である 固定式ガード(柵、囲い、覆い等)、可動式ガード(扉など)、保護装置、及び 制御システムの安全関連部の不具合に起因して発生した死亡労働災害の件数と割合は、災害データ群1では102件(79.1%)、災害データ群2では94件(86.2%)であった。

そこで、これらの技術的安全方策の不具合に起因して発生した死亡労働災害を対象に、災害データ群1と群2の関連を検証するために Pearson の²検定を行った結果、2つの災害データ群の間に有意な差は認められなかった($\chi^2(1)=2.089, p=0.148$)。

2) 作業要因の分析

(a)危険点近接作業の場合

設備要因の分析と同様の方法により、災害データ群1と群2を対象に、作業要因の1つである危険点近接作業に関連した死亡労働災害件数とその割合を調べた(表4参照)。なお、ここで言う危険点近接作業とは、作業者が機械の危険な可動部を停止させないで、可動部に近接して行う作業のことである。

分析の結果、危険点近接作業に関連した労働災害の合計件数は、災害データ群1で57件(44.2%)、災害データ群2で85件(78.0%)であった。そこで、危険点近接作業に関連した死亡労働災害について災害データ群1と災害データ群2との関連を検証するために Pearson の²検定を行った。その結果、災害データ群1と群2の間には統計学的に有意な差が認められ($\chi^2(1)=28.038, p<0.001$)危険点近接作業に関連した死亡労働災害の件数は有意に増加していることが判明した。

(b)広大領域内作業の場合

同様の方法により、災害データ群1と群2を対象に、もう一つの作業要因である広大領域内作業に関連した死亡労働災害の件数とその割合を調べた(表5参照)。なお、ここで言う広大領域内作業とは、作業者の作業場所と緊急停止装

置を操作する場所が異なるなど、作業者が当該場所に存在しているときに直ちに機械の可動部を停止させる操作ができない場所での作業のことである。

分析の結果、広大領域内作業に関連した労働災害の合計件数は災害データ群1で46件(35.7%)、災害データ群2で49件(45.0%)であった。そこで、広大領域内作業に関連した死亡労働災害を対象に災害データ群1と災害データ群2との関連を検証するために Pearson の²検定を行った結果、2つの群の間で有意な差は認められなかった($\chi^2(1)=2.128, p=0.145$)。

5.4 考察

1) 労働災害の分析結果に対する考察

機械に起因する労働災害(死亡または休業4日以上)は、労働安全衛生法施行直後の昭和48年に111,838人であったものが、平成30年には26,230人と4分の1(23.5%)近くまで減少していた。特に、平成になってからは、平成元年の65,884人から平成30年の26,230人と4割近く(39.8%)まで減少した¹³⁾。同様に、今回分析の対象とした機械に起因する死亡労働災害(はさまれ・巻き込まれ災害に限る)も、平成元年に129件であったものが平成30年には48件と4割近く(37.2%)まで減少していた¹³⁾。ただし、ここで対象とした機械に起因する死亡労働災害は、製造業及び首都圏(東京都、埼玉県、千葉県、神奈川県)で発生した「はさまれ・巻き込まれ」災害と「激突され」災害に限る。

この減少に影響があったと考えられるのが、製造業での雇用者数の変化である。そこで、総務省統計局が実施している労働力調査¹⁴⁾を利用してその変化を調査した。その結果、就業者数は平成元~14年の間で最大であった平成4年の1,382万人から、平成26~30年の間で最小であった平成26年の988万人へと71.5%まで減少していた(図8の領域A参照)。

これに対し、実際の死亡労働災害の発生件数は37.2%まで減少しているから、結局、この両者の差である34.3%(図8のBの部分)が機械に対する技術的安全方策や人的安全管理策などによって労働災害が純粹に減少した分と考えられる。

このBの減少に貢献した要因の解明は定量的には困難である。しかし、筆者らは実際の死亡災害データを分析した経験から、次のような要因が影響したのではないかと考えている。

- (a) 平成の30年間で旧式の危険な機械の相当部分が廃棄されて、新しい安全な機械に代替されたこと。
- (b) 比較的対策の容易な機械を対象に、主に機械の使用者（ユーザー）がユーザー段階で実施可能な技術的安全方策（ガード、保護装置など）や人的安全管理策を徹底したこと。
- (c) 上記(b)が促進した理由の一つとして、平成18年の労働安全衛生法の改正によって事業者によるリスクアセスメントの実施が規定されたことも影響していると考えられること。

以上のような要因の影響によって、対策が容易な機械に対しては比較的順調に労働災害防止対策が進捗した一方で（図8のBの部分の減少）、対策の困難な機械や作業に対しては適切な対応が困難であったために（依然として残留している図8のCの部分）、危険点近接作業や広大領域内作業の割合が有意に増加して行ったと考えられる。

以上の考察より、図8の領域Cに相当する労働災害を根絶するための対策としては、次のものが考えられる。

- 1) データ群2（図8の領域Cに相当）に記載された労働災害の発生状況を詳細に分析したところ、数例を除いて機械の使用（ユーザー）段階での人の注意力に依存した対策の失敗によって災害が発生していた。したがって、今後の労働災害防止対策では、機械の使用者（ユーザー）が実施する人の注意力に依存した確実性の低い人的安全管理策でなく、機械の設計・製造者（メーカー）が実施する確実性の高い技術的安全方策によって、労働災害を大幅に、かつ確実に減少させる必要がある。
- 2) 図8の領域Cでは、危険点近接作業や広大領域内作業の割合が有意に増加している。したがって、この問題に対する対策としては、機械の設計・製造段階（メーカー）で技術的安全方策の困難な機械や作業を生産技術的観点から根絶して行くことが特に重要と考えられた。この具体的方策としては、ISO12100に

定められた本質的安全設計方策（ステップ1）の採用などが特に有効と考えられた。

以上の検討は未だ緒についたばかりであるが、今後は以上の推論を明確に根拠づけるためのデータの収集や方策の提案を続けて行きたい。

2) 階層的安全管理システムの構成理論に関する考察

第4章の図4に、階層的安全管理システムの基本構成図を示す。このシステムは、安全情報を利用して機械の運転許可を行う安全確認形インタロックと、IoTを利用して残留リスクに対する危険回避情報を取得して人や機械の危険回避を行う疑似インタロックを階層的に構成したシステムである。

今年度は階層的安全管理システムの基本構成図のみを示し、具体的な理論的検討は次年度に行いたい。

5.5 結論

機械の労働災害防止対策では、平成の中頃（13～25年頃）に、主に機械の使用者（ユーザー）を対象に「機械の包括的な安全基準に関する指針」の策定、労働安全衛生法の改正によるリスクアセスメントの努力義務化、プレス機械や食品加工用機械などの労働安全衛生規則の制定・改正などが進められた。そこで、この時期の前後で労働災害の発生状況がどのように変化したかを死亡労働災害の詳細分析によって解明を試みた。得られた結果は次のとおりである。

- 1) 平成元～30年の間に、製造業の雇用者数は1,382万人から988万人へと71.5%まで減少し、これに応じて機械に起因する死亡労働災害の発生件数も減少した。
- 2) 一方、平成の間に機械に起因する死亡労働災害の発生件数は37.2%まで減少した。したがって、上記1)との差である34.3%が技術的安全方策や人的安全管理策などによって死亡労働災害が純粋に減少した分と考えられる。
- 3) 平成26～30年に発生した災害では、技術的安全方策の困難な危険点近接作業の割合が平成元～14年と比較して有意に増加していた。したがって、今後の労働災害防止対策では、

機械の設計・製造段階で技術的安全方策の困難な機械や作業（危険点近接作業や広大領域内作業など）を生産技術的観点から根絶して行くことが特に重要と考えられた。

6 危害の発生確率の 定量的評価手法の提案

6.1 序論

現在、労働安全の分野では、英国安全衛生庁（HSE）が示したリスク管理目標（補足1参照）を労働災害防止の目標値として使用することがある。この目標では、労働者一人あたりの死亡労働災害の発生確率を 10^{-6} 回/年未満に設定している^{15)~17)}。

この目標は、100万人の労働者が1年間働いたときに、死亡を伴う危害の発生件数の推定値を1件未満とする水準である。ここで、労働者1人あたりの年間労働時間を2,000時間とすると、危害の発生確率は単位時間あたりの換算値で 5.0×10^{-10} 回/h 未満となる。

この目標を達成するには、機械の設計・製造者が行う設備的な保護方策（機械安全）と機械の使用者が行なう管理的対策（安全管理）の連携が不可欠と考えられる。このため、厚生労働省では、2007年に公表した“機械の包括的安全基準に関する指針”において機械安全と安全管理の連携による災害防止対策を示している。

しかし、本質的安全設計方策や安全防護物の適用などの設備的な保護方策と人の注意力に依存する管理的対策では確定性（補足2参照）が異なるために、両者を連携させたときの危害の発生確率の定量的評価手法の確立は困難を伴う。

このため、本報では、安全とも危険とも判断できない不確定なものはすべて危険と判断する“安全の原理”¹⁹⁾にしたがって、人間機械作業システムの危害の発生確率をマルコフ解析に基づいて定量的に推定できる評価式を提案し、この式を基にHSEが示したリスク管理目標を達成する条件の解明を試みた。なお、本報では、文献18)で詳述した内容が技術的基礎となっている¹⁸⁾。

6.2 安全確認形インタロックシステムにおける 危害の発生確率の減少効果

1) 安全確認形インタロックの基本構成と状態遷移図

前述した目標値を達成する方策として最初に考えられるのが、人間機械作業システムにおける人の誤りや機械の故障の発生確率を減少させるという対策である。ここで、人の誤りとは、人が危険区域（補足3参照）内に誤って進入するなどの危険側の誤りをいう。また、機械の故障とは、運転中の機械が止まらなくなる故障や、停止中の機械が突然不意作動する故障などの危険側の故障をいう。

しかし、前述したリスク管理目標が 10^{-10} 回/h のオーダーであるのに対して、現実の人間側の危険側誤りの発生確率は $10^{-1} \sim 10^{-2}$ 回/h、機械側の危険側故障の発生確率は $10^{-3} \sim 10^{-4}$ 回/h 程度のときも考えられる（これらについては、原子力分野での機器故障率データベース²²⁾や、A.D.Swainらによるヒューマンエラーの評価 NUREG/CR-1278²³⁾などが参考になる）。したがって、人の危険側誤りや機械の危険側故障を減少させただけでは、目標の達成は困難と考えられる。

このため、実際の労働災害防止対策では、人の危険区域への誤った進入や機械の危険側故障を監視して、これらの発生時には直ちに機械を停止させる安全確認形インタロックが適用されてきた。

図9に、安全確認形インタロックの基本構成図を示す。ここで、 $I(t)$ は機械に対する運転命令ありのときを論理値1、運転命令なしのときを論理値0とする2値論理変数である。同様に、 $A(t)$ は作業者が危険区域Z内に進入していないときを論理値1、進入しているときを論理値0、 $W(t)$ は機械に対する運転許可のときを論理値1、運転禁止のときを論理値0とする2値論理変数である。

また、 S は、作業者が危険領域Z内に進入していないことを確認するセンサであり、 G は運転命令 $I(t)$ とセンサからの許可信号 $A(t)$ の両方が論理値1であるときに機械の運転許可信号 $W(t)$ を論理値1とする論理積演算要素（ANDゲート）である。

ここで、センサの瞬間故障率を（回/h）、危険側移行率（補足4参照）を（回/回）、修復率を μ （回/h）とすると、状態遷移図は図

10 のようになる。ただし、図 10 では、安全確認形インタロックに危険側故障が発生したときは非修復系を構成し、安全側故障が発生したときは修復率 μ の修復系を構成するものと仮定している。これは、安全側故障の発生時には必ず機械が停止するために故障が検出可能であるのに対し、危険側故障の発生時には故障を検出できないことがあるために、最悪値評価として故障が検出されないものとしてモデルを構成する。

同様に、以後の算定では、危害の発生確率に対する最悪値評価を行なうために、運転命令 $I(t)$ が常にオンであると仮定して計算を行なう。

図 10 で、 $p_o(t)$ は時刻 t でセンサが正常状態にある確率を意味する。これに対し、 $p_k(t)$ と $p_s(t)$ は、時刻 t でセンサが故障状態にある確率を意味する。このうち、 $p_k(t)$ は危険側故障の状態に対応し、 $p_s(t)$ は安全側故障の状態に対応する。

以上の関係は次式で表すことができる。

$$p_o(t+dt) = (1 - \lambda dt) p_o(t) + \mu p_s(t) dt \quad (7)$$

$$p_k(t+dt) = p_k(t) + \lambda p_o(t) dt \quad (8)$$

$$p_s(t+dt) = (1 - \mu dt) p_s(t) + (1 - \lambda dt) p_o(t) dt \quad (9)$$

ただし、 $p_o(t) + p_k(t) + p_s(t) = 1$ である。

次に、機械が停止する安全側故障は最悪値評価のために無限小時間ですべて修復されるものと仮定して、 $p_o(0) = 1$ 、 $p_k(0) = 0$ 、 $p_s(0) = 0$ の条件の下に図 10 を解くことにする。図 11 は、これらの条件の下で図 10 を簡略化した状態遷移図である。ここで、機械の迅速な修復が行われるための条件が $\mu dt = 1$ となることを考慮すれば、(7) ~ (9) 式は次のように変更できる。

$$p_o(t+dt) = (1 - \lambda dt) p_o(t) \quad (10)$$

$$p_k(t+dt) = p_k(t) + \lambda p_o(t) dt \quad (11)$$

ただし、 $p_o(t) + p_k(t) = 1$ 、 $p_o(0) = 1$ 、 $p_k(0) = 0$ とする。これより、 $p_o(t)$ 及び $p_k(t)$ は次式となる。

$$p_o(t) = \exp(-\lambda \cdot t) \quad (12)$$

$$p_k(t) = 1 - \exp(-\lambda \cdot t) \quad (13)$$

2) 危害の発生確率の定量化

図 11 のシステムでは、次の場合に危険事象が

発生する。

a) 人が危険区域 Z 内に進入したときに、センサ S が既に故障していたために人を検出できず、機械が停止しなかった場合

b) 人が危険区域 Z 内に進入したときに、(センサの故障の有無によらず) 論理積演算要素 (ANDゲート) G が既に故障していたために誤って運転許可信号 $W(t)$ が論理値 1 となって、機械が停止しなかった場合

ここで、作業者が誤って危険区域 Z 内に進入する率を λ (回/h)、センサ S の故障発生確率を λ_s (回/h)、危険側移行率を λ_k (回/回)、論理積演算要素 (ANDゲート) G の故障発生確率を λ_g (回/h)、危険側移行率を λ_{gk} (回/回) とすると、センサ S とゲート G が時刻 t までに危険側故障を起こしている確率は(13)式を利用して計算できるから、時刻 t における危険事象の発生率 $r_k(t)$ (回/h) は a) の場合と b) の場合の和である次式で表される。

$$r_k(t) = \lambda [1 - \exp(-\lambda_s \cdot t)] + \lambda [1 - \exp(-\lambda_g \cdot t)] \quad (14)$$

実際の安全確認形インタロックでは、仮に危険事象が発生したときでも、常に災害が発生するとは限らない。なぜなら、このとき作業者は危険事象に対して回避行動をとることで、災害から逃れる可能性があるからである。

そこで、作業者が災害を回避できる可能性(回避可能性)も考慮して、時刻 t における危害の発生確率 $r_H(t)$ を計算した。ここで、回避可能性に関する指標として、回避失敗率 H_L (回/回) を導入すると、危害の発生確率 $r_H(t)$ は次式となる。

$$\begin{aligned} r_H(t) &= H_L \cdot r_k(t) \\ &= H_L [1 - \exp(-\lambda_s \cdot t)] \\ &\quad + H_L [1 - \exp(-\lambda_g \cdot t)] \end{aligned} \quad (15)$$

ただし、 H_L は危険事象が発生したときに、作業者が回避に失敗して実際に災害(この場合は死亡労働災害)となる率である。

なお、以後の検討を容易にするために、表 5 に本論文で使用するパラメータの意味をまとめて示した。また、これらのパラメータに対してどのような仮定を置いたかについても表中にま

とめて示した。この仮定の根拠は後ほど詳述する。

3) 冗長化と自動監視の必要性

(15)式は、安全確認形インタロックで発生する故障やトラブルを減少させる高信頼化技術 (r_s や r_g の減少), 安全確認形インタロックの危険側故障の発生確率を減少させる安全性技術 (r_s や r_g の改善), 及び作業者に対する教育・訓練によって人的ミスを減少させる安全管理技術 (r_H や H_L の減少) の併用によって, リスク管理目標を達成できる可能性を示している。

このうち, リスク管理目標を明らかに達成できるのは, 安全確認形インタロックをフェールセーフな AND ゲートなどの非対称誤り特性 (補足 5 参照) を備えた要素で構成する場合である。このとき, センサ及びゲートの危険側移行率 (補足 4 参照) は各々 $r_s = 0$ 及び $r_g = 0$ となるために, $r_H(t) = 0$ となり, 理論的には危害の発生確率ゼロが達成できる (ただし, 本報では, 予見困難な危険側故障を考慮し, 想定できる最悪値として, 第 5 章 1) の d) に示すように $r_g = 10^{-3}$ 回/回などと仮定している)。

これに対し, 安全確認形インタロックが CPU を利用したプログラマブルな電子制御装置などの対称誤り特性 (補足 5 参照) を備えた要素で構成される場合は, 人の誤り発生確率, センサや AND ゲートの故障発生確率や危険側移行率, 回避失敗率などに含まれる不確定性 (補足 2 参照) のために, リスク管理目標を達成したことの確認が困難な場合も生じる (たとえば, 人の誤り発生確率を教育・訓練によって 10^{-6} 回/年まで減少させたと言っても, この数値自体が“不確かさ”を伴うために, リスク管理目標を達成したことの確認は困難である)。そこで, 安全とも危険とも判断できない不確定なものはすべて危険と判断する“安全の原理”²⁷⁾にしたがって, 前述したパラメータに対する最悪値評価を行い, “不確かさ”の影響を理論的に可能な限り小さくする。

図 12 は, この考え方にしたがって, 前述したパラメータに対して (15) 式を利用して, 最悪値評価を実施したときの危害の発生確率 $r_H(t)$ を推定したものである。ここでは, 最悪値として後述する第 6.5 節 1) の検討結果に従い, $r_s =$

1 (回/回), $r_g = 1$ (回/回), $r_s = 10^{-3}$ (回/h), $r_g = 10^{-3}$ (回/h), $r_H = 10^{-1}$ (回/h), $H_L = 1$ (回/回) と仮定した。この検討結果より, リスク管理目標の達成には次の (1) 及び (2) で示す問題点に対する対策が必要であることが判明した。

(1) 運用の最初の段階での危害の発生確率の低減効果の不足

図 11 のシステムでは, 仮に本節の冒頭で述べた ~ の対策の併用を図ったとしても, システム (特に, 第 3.1 節 1) で述べるセンサ及びプロセッサ) が単一系である限りは, リスク管理目標は達成できないと考えられる。

そこで, システムの冗長化を図ることによって, 運用の最初の段階で所定の確率まで危害の発生確率の低減を図ることにした。

(2) 長期的運用による危害の発生確率の増加

機械の長期的な運用にあたっては, 予期しない故障によって労働災害が発生する可能性がある。そこで, センサやプロセッサなどに対する自動監視 (セルフチェック) 技術の適用によって, センサやプロセッサなどに故障が発生していないことを定期的かつ自動的に監視し, システムが長期にわたって運用された場合でも, 危害の発生確率の増加を防げるようにした。

6.3 異種冗長化と自動監視による危害の発生確率の減少効果

1) 危害の発生確率を減少させる手法

上記の対策で最初に考えられるのが, 同種のセンサやプロセッサの多重化である。しかし, 単なる同種の多重化では, 共通原因故障 (CCF: Common Cause Failure) の発生によって危害の発生確率は単一系と同程度になる可能性が残される。そこで, 独立した異種のシステムの多重化 (以後, これを「異種冗長化」と呼ぶ) によって, この問題に対応することにした。

また, 異種冗長化では信頼性向上の効果は認められるが, 故障でいつ危険事象が発生するか分からないという問題は残される。そこで, 異種冗長化されたセンサやプロセッサに故障が発生していないことを定期的かつ自動的にチェックする機構 (以後, これを“自動監視機構”と呼ぶ) を適用し, 危険側故障を検出した場合には直ちに機械の運転を自動的に停止させるよう

にした。これにより、危険側故障を解消しない限り機械が再起動できないから、危険事象の発生を防止できる。

以下、センサ及びプロセッサへの異種冗長化と自動監視機構の適用によって、リスク管理目標が達成できるかを定量的に検討する。

2) 異種冗長化による効果

図 13 に、異種冗長化された制御システムの安全関連部の基本構成図を示す。ここでは、作業者が危険区域 Z 内に進入していないことを確認するセンサを S_N ($N=1,2,3$)、各センサからの信号を処理するプロセッサを C_N ($N=1,2,3$) で表す（ここでは、便宜上 $N=3$ の例を示すが、当然ながら $N=3$ に限るものではない）。ただし、センサ S_N 及びプロセッサ C_N は、少なくとも同じ原因によって共通原因故障を生じない異種冗長化構成になっているものとする。以後、 S_N と C_N を一括して扱うためにこれらを総じて要素 $S C_N$ として表す。

また、要素 $S C_N$ からの信号がすべて“安全”を示す信号(オン信号)を出力しているときに、安全確認信号 $A(t)$ を発生する要素をポータ V で表す。

ここで、要素 $S C_N$ の瞬間故障発生率を s_c (回/h)、危険側移行率を s_c (回/回)、ポータ V の瞬間故障発生率を v (回/h)、危険側移行率を v (回/回) とすると、異種冗長化された N 重系 ($N=1,2,3$) の時刻 t における危害の発生確率 $r_H(t)$ は次式となる。

$$r_H(t) = H_L [1 - \exp(-s_c \cdot s_c \cdot t)]^N + H_L [1 - \exp(-v \cdot v \cdot t)] + H_L [1 - \exp(-g \cdot g \cdot t)] \quad (16)$$

ただし、異種冗長化された N 重系とは“独立した N 個の要素 $S_{C1}, S_{C2}, \dots, S_{CN}$ がすべて危険側故障を起こしたときに、初めて制御システムの安全関連部が人体検知能力を失う”構成とする。逆に言えば、異種冗長化された三重系で仮に二個の要素 S_{CN} が危険側故障を起こした場合でも、制御システムの安全関連部は人体検知能力を維持し続け、三個の要素 S_{CN} がすべて危険側故障を起こしたときに制御システムの安全関連部は初めて人体検知能力を喪失する。このときの演算を行うのがポータ V である。こ

こでは、図 13 のようなボックス形状でポータ V を表現する。

3) 自動監視による効果

(16)式は、制御システムの安全関連部を構成する要素の危険側故障によって危害の発生確率が時間とともに増大していくことを示している。すなわち、長時間の連続運転がなされる機械では、危険側故障が検出されないまま蓄積し、長期的には制御システムの安全関連部が機能喪失に至る事態が起こり得る。

そこで、制御システムの安全関連部を構成する要素の正常性を定期的かつ自動的に監視する自動監視(セルフチェック)機構の採用によって、有効性の喪失を防止できないか検討した。ここで、センサ及びプロセッサ $S C_N$ 、ポータ V、及び論理積演算要素(ANDゲート) G の自動監視機構のチェック間隔を各々 s_c 、 v 及び g (h) とすると、自動監視機構を備えた制御システムの安全関連部の危害の発生確率の平均値 $R_H(\cdot)$ は次式で表すことができる。

$$R_H(\cdot) = \int_0^{\infty} r_H(t) dt / \int_0^{\infty} r_H(t) dt = (1/(N+1)) H_L (s_c \cdot s_c \cdot s_c)^N + (1/2) H_L (v \cdot v \cdot v) + (1/2) H_L (g \cdot g \cdot g) \quad (17)$$

ただし、(17)式は $s_c \cdot s_c \cdot s_c T \ll 1$ 、 $v \cdot v \cdot v \ll 1$ 、 $g \cdot g \cdot g \ll 1$ なる条件の下で有効である。この条件が成り立たないときの評価式は文献 31) を参照されたい。また、は厳密には s_c 、 v 及び g の関数である。

6.4 安全性の評価指標

(17)式は、危害の発生確率の平均値を改めて P とすると、次のように書き改めることができる。

$$P = H_L \cdot [X] \quad (18)$$

ここで、

$$[X] = [1/(N+1)] \cdot (s_c \cdot s_c \cdot s_c)^N + (1/2) \cdot (v \cdot v \cdot v) + (1/2) \cdot (g \cdot g \cdot g) \quad (19)$$

ここで、 $[X]$ は制御システムの安全関連部の危険側移行率(回/回)に相当する。これは、設備的な保護方策(機械安全)の評価指標となり得る。これに対し、 λ は人の誤り発生確率(回/

h), H_L は回避失敗率(回/回)である。このとき、 H_L 及び H_L は、人による管理的対策(安全管理)の評価指標となり得る。

(19)式は、機械安全の評価指標である[X]の低減と、安全管理の評価指標である H_L または H_L の低減の連携によって危害の発生確率Pが減少できることを意味する。ただし、不確定性の高い H_L または H_L に依存した対策は明らかに限界がある。このため、本報では、確定性の高い[X]を低減させることによって目標値の達成を試みる方を優先している。

6.5 危害の発生確率の定量評価

1) 上限値による定量的評価

以上の式を使って危害の発生確率の定量的評価を行なう場合、本質的安全設計方針や安全防護物(ガード, 保護装置)の適用などの設備的な保護方針と人の注意力に依存する管理的対策では確定性(補足2参照)が異なることに留意すべきである。そこで、安全とも危険とも判断できない不確定なものはすべて危険と判断する”安全の原理“²⁷⁾にしたがって、各パラメータの数値範囲を限定した。

以後、この考え方に基づいて推定される値を危害の発生確率の上限値と呼ぶ。この値は”危害の発生確率は、最悪でもこの値以下“とする最悪値評価に基づく値であり、期待値による評価とは異なる。

以下、上限値を推定する際のパラメータの数値範囲を示す²⁸⁾。ただし、センサ及びプロセッサのチェック間隔 s_c は設計・製造者の側で任意に設定できるため、次の検討からは除外した。

- a) センサ及びプロセッサの瞬間故障率は、想定できる最悪値として、 $s_c = 10^{-3}$ 回/hを仮定した。これは、文献29)などを参考にしたもので、一般的な信頼性技術の適用などによって容易に達成できるレベルと著者らは考えている。ただし、現実のシステムではセンサまたはプロセッサの故障発生確率がこの数値より高くなる場合もないとは言えない。この場合の影響は稿を改めて考察する。
- b) センサ及びプロセッサは対称誤り特性を持つ要素(たとえば、プログラマブルな電子制御装置)で構成するものとし、このときの危険側移行率の理論的な最悪値として $s_c = 1$

回/回を仮定した。

- c) ボータ及びゲートの瞬間故障率は、想定できる最悪値として、 $v = 10^{-3}$ 回/h, $g = 10^{-3}$ 回/hを仮定した(根拠は前記a)と同様である)。
- d) ボータ及びゲートは確定的な保護方針を施した要素(たとえば、フェールセーフなANDゲートなど)で構成するものとした。このとき、危険側移行率は理論的にはゼロとなるが、ここでは予測不可能な危険側故障を考慮し、想定できる最悪値として、 $v = 10^{-3}$ 回/回, $g = 10^{-3}$ 回/回を仮定した。これは、フェールセーフの分野では、非対称性を備えている素子の危険側移行率として、この値を使用することがあるためである(たとえば、重力リレーやメカニカル接点など)。
- e) d)の場合の自動監視機構のチェック間隔には、想定できる最悪値として $v = 10^{-5}h$, $g = 10^{-5}h$ を仮定した。これは、約30msec(厳密には36msec)に相当するチェック間隔であり、機械の緊急停止などを行うときに制御システムの処理時間として許容される応答遅れ時間に相当する(たとえば、迅速な停止が要求される機械の代表例であるプレス機械などでは、経験上このレベルのチェック間隔が要求されるものと著者は考えている)。ただし、この場合は、万一、チェック間隔が $10^{-5}h$ を越えた場合、機械の運転を停止できる構成が必要である。
- f) 人間側の誤り発生確率は、文献9)などを参考に、想定できる最悪値として $= 10^{-1}$ 回/hを仮定した。これは、一般的な安全管理技術の適用などによって達成できるレベルと著者らは考えている。ただし、現実のシステムでは人の誤り発生確率がこの数値より高くなる場合もないとは言えない。この場合の影響は稿を改めて考察する。
- g) 人の危険回避能力に関連する回避失敗率は、回避の確定性が期待できないために、理論的な最悪値として $H_L = 1$ を仮定した。
- 表6は、制御システムの安全関連部が常に有効な状態のときに(17)式にしたがって危害の発生確率を推定した結果である。ここでは想定できるチェック間隔の代表値として $s_c = 10^{-5}h$ (約30msec, 厳密には36msec), 0.01h(約

30 秒，厳密には 36 秒)，0.05 h (3 分)，0.5 h (30 分) のときに計算を行なった。

ここで，想定できるチェック間隔の最小値である $s_c = 10^{-5}$ h (約 30msec，厳密には 36msec) は，前述したように，機械の緊急停止などを行うときに制御システムの処理時間として許容される応答遅れ時間に相当する。これに対し，想定できる最大値の $s_c = 0.5$ h は，プロセッサを構成する冗長化したメモリの不一致検出に最悪値としてこの程度の時間が必要と考えためである (補足 8 参照)。これらは，いずれの場合でも，チェック間隔が設定値を越えた場合，機械の運転を停止できる構成が必要である。

表より，チェック間隔が $s_c = 10^{-5}$ h (約 30msec，厳密には 36msec) のときは，単一系であっても目標 (危害の発生確率を 5.0×10^{-10} 回/h 未満とする) の達成は (目標値ギリギリではあるが) 可能と考えられる。これに対し，チェック間隔が $s_c = 0.01$ h (約 30 秒，厳密には 36 秒) または 0.05 h (3 分) のときは二重系，チェック間隔が $s_c = 0.5$ h (30 分) のときは三重系でなければ目標は達成できない。以上のように，チェック間隔 s_c は冗長化の程度に相当な影響を及ぼすため，この点を考慮してチェック間隔を決定する必要がある。

6.6 結論

英国 HSE が示したリスク管理目標では，労働者一人あたりの死亡労働災害の発生確率を 10^{-6} 回/年未満に設定している。しかし，この目標を達成するための一般的な方法論は必ずしも明確でない。そこで，人間機械作業システムにおける危害の発生確率をマルコフ解析に基づいて定量的に推定できる評価式を提案し，この式を基に前記目標の達成手法を考察した。この検討によって得られた結果は次のとおりである。

1) 目標の達成は，人の注意力に依存する管理的対策だけでは困難で，制御システムの安全関連部に対する異種冗長化及び自動監視 (セルフチェック) 技術の適用が不可欠である。

2) 人の注意力が期待できないとき (たとえば，人の誤り発生確率 $= 10^{-1}$ 回/h，回避失敗率 $H_L = 1$ 回/回など) でも，制御システムの安全関連部のセンサ及びプロセッサのチェック間隔が単一系のときは 10^{-5} h (約 30msec) 以内，異種冗

長二重系のときは 0.05 h (3 分) 以内，異種冗長三重系のときは 0.5 h (30 分) 以内であれば目標の達成は可能である。ただし，センサの瞬間故障率を 10^{-3} 回/h，危険側移行率を 1 回/回と仮定し，ボータ及びゲートの瞬間故障率を 10^{-3} 回/h，危険側移行率を 10^{-3} 回/回，チェック間隔を 10^{-5} h と仮定している。

ただし，以上の結果はあくまでも表 6 の条件の下で得た結論に過ぎない。したがって，今後は条件を変更したときの影響について，十分検討を行なう必要がある。

今後は，以上の結果を基に，様々な人間機械作業システムを対象とした危害の発生確率の定量的評価を行う予定でいる。なお，本報では，故障がチェック間隔の間に検知できずに潜在する場合や，共通原因故障 (CCF) の影響が危害の発生確率に及ぼす影響などについてまで十分検討していない。これらは，本手法と ISO13849 で定められた手法との比較検討を行なう過程で別途考察する予定でいる。また，本論文では，安全確認形インタロックや制御システムの安全関連部の監視対象は人の誤りだけであり，機械の故障を対象としていない。今後は，この点についても併せて考察を進めていく予定でいる。

7 検討結果

7.1 先行技術調査の結果

7.1.1 調査の目的

Connected IndustriesやSociety5.0のコンセプトが社会に広まるに従い，産業安全分野を対象としたIoT活用に関する研究開発事例も増えていると考えられる。こうした研究開発では，研究という性格上，安全性を踏まえつつもまず機能の実現が優先されることがある。これに対し本研究課題は，機械の安全制御における情報通信技術の活用については，信頼性に基づく評価だけでなく，技術はどこまで労働災害防止に責任を持つのかという倫理的観点からの検討が必要であることを提案する。この視点は，製造業に限らず全ての産業の労働安全で必要とされるものである。

今後，本研究課題の成果を労働災害防止に寄与させるためには，産業現場での情報通信技術 (ICTやIoTなど) の用途を踏まえ，労働災害を確実に防止するための技術と責任について，検討を重ねていくことが必要であろう。そこで，

まずは安全管理と情報通信技術に関する過去20年間の文献から、研究開発動向の俯瞰を試みた。

7.1.2 調査方法

1)分析対象とデータ抽出方法

調査には、国内外の学術文献や論文情報が検索できる日本最大級の文献・論文データベースであるJDreamIIIを使用した。JDreamIIIの中には複数種類の文献データベースがあるが、本調査の目的は国内状況の把握であるため1981年以降国内外の科学技術文献が収録されたJSTPlus（1981年以降収録）を調査対象とした。

データ抽出方法を以下に述べる。JSTPlusに収録されている約3,057万件の文献の中から、調査対象となりうるデータを、表7に示す抽出条件L3の検索式によって抽出した。この検索式の大まかな意味は、「2000年以降に発行され、かつ、日本語抄録があり、かつ、IoTに関連する語を含む文献の中で、労働安全または安全管理を扱っており、なおかつ、医療等の当該研究が対象としない分野の文献をのぞいたもの」である。発行年が2000年以降の文献を対象とした理由は、本研究課題の「IoT活用安全管理手法」の前身である「IT活用安全管理手法」の開発が、2007年問題の解決を目的としていたことから、2000年頃からの文献であれば、安全管理への情報通信技術の活用に関する文献が存在するであろうとの考えからである。

表7のL3に示す条件で検索した結果、抽出された文献数は、2,453件であった。なお最新の分析結果を本報告に掲載するためデータ抽出は2020年3月12日に実施した。

2)分析方法および語の抽出

調査は、テキストマイニング手法のひとつである共起ネットワーク分析を使用する。共起ネットワークとは、出現パターンの似通った語すなわち共起の程度が強い語を線で結んだネットワークを描くものである³²⁾。分析対象(2,453件)の文献の和文標題を対象に共起ネットワークを分析することで、例えば、本研究課題が対象とするIoTと関連の強い語を知ることができることから、語と語で構成されるネットワークの様子から国内の研究事例のテーマ分布を把握するものである。

表8に、分析に使用したソフトウェア環境と語の抽出に関する設定事項を示す。分析には、計量テキスト分析ソフトウェアとして知られるKHCoder³⁰⁾を利用し、形態素解析にはKHCoderに付属のMecabを使用した。また、複合語として抽出したい語を「強制抽出する語(表8の項目3)

として指定し、分析対象から除外したい語は「分析に使用しない語(表8の項目4)」として指定した。ここで指定した語は、研究タイトルに用いられやすく、なおかつ、研究内容の特徴を表す語でもないことから、対象から除外した。さらにIoTやICTの表記ゆれを統一するための指定を実施した(表8の項目5)。

これらのパラメータを設定した上で形態素解析を実施した結果、分析対象2,453件の和文標題に対して36,702語が抽出された(このうち分析に使用しない品詞の語を除いた21,715語を後の分析で使用する)。また、全体で異なる語がいくつあるかを数えた異なり語数は5,493語であった(先と同様に、分析対象外の品詞を除いた4,950語を後の分析で使用する)。

7.1.3 分析結果 共起ネットワーク分析

表9に示すパラメータを用いて共起ネットワークを分析し、比較的強くお互いに結びついている部分を意味するサブグラフ³⁰⁾をランダムウォーク中心性にて表示した結果、図14に示すように9個のサブグラフが得られた。

表10に、サブグラフの各抽出語とサブグラフに含まれていた文献テーマの概括を示す。テーマの概括は、KH CoderのKWICコンコーダンスを使って抽出語を用いている和文標題を探索し、分析者が特徴的だと判断した内容を記載した。

以下、頻度の多い語を含むサブグラフ、を中心に見ていく。

サブグラフは、経済産業省が提唱するConnected Industries(注2参照)と関連の深い文献のグループと推定される。産業用ロボットと人との協働や生活支援ロボット、さらにこれらの国際標準化に関する文献が含まれていた。

サブグラフは、安全衛生管理とICT活用に関連の深いグループと推定される。本研究課題の前身ともいえる、2005年度～2008年年度にかけて開発された「ITを活用した新しい安全管理手法(以下、IT活用安全管理)」に関する文献や安全衛生点検に関する文献などが含まれていた。点検がここに含まれる理由は、形態素解析の際、安全衛生管理や安全衛生点検などの複合語は、それぞれ安全/衛生/管理、安全/衛生/点検の語に分割されるため、共起関係が強く生じたものと予想される。

サブグラフは、国土交通省が進めているi-Construction(注3参照)と関連が深いグループと推定される。注目すべきは、本研究が課題名に用いている「IoT」の語が、「建設、現場、AI」の語と強い共起関係にあった点である。このサブグラフに含まれていた文献には、建設現場で

の安全管理・健康管理・施工管理にIoTやAI, ICTを活用する方法やデータ活用による生産性向上, 建設機械の衝突回避や周囲監視などの安全技術に関するものなどがあつた。

7.1.4 研究課題の動向と本研究課題の位置付け

2000年以降に発行された文献・論文の和文標題を調べた結果, 研究開発動向には2つの大きな流れとして国が提唱し推進を目指す2つのコンセプトがあることが確認された。ひとつはサブグラフの経済産業省のConnected Industries, もうひとつはサブグラフの国土交通省のi-Constructionである。

どちらも総務省が提唱するSociety5.0のコンセプトに沿うものであるため, Society5.0における製造分野の取組がConnected Industries, 建設分野での取組がi-Constructionであるとして, 両者の違いは単純に分野の違いであるかのようにみえるかもしれない。しかしながら, 本研究課題の主眼である「機械の安全制御」もしくは「機械災害防止」の立場からこの2つのコンセプトをとらえると, 両者の間には現状での機械の制御方式に違いが存在する。

サブグラフのConnected Industriesのロボットでは, 制御技術を自動から自律へと発展させ, 人とロボットが協働できることを目標としている。

これに対し, サブグラフのi-Constructionの建設機械では, マニュアル制御(労働者による運転操作)から自動または自律制御へと発展させることを目標としている。加えて上述のロボットと異なる点は, 建設機械はすでに人と協働している点である。言い換えれば, 人が運転操作をしていたからこそ, 周囲の労働者と協働が可能であったともいえる。

すでに自動化されておりこれから人との協働を実現しようとするロボットと, すでに協働を実現しておりこれから自動化(または自律化)を実現しようとする建設機械とでは, 労働災害防止の考え方や技術の適用方法は異なるはずである。

本研究が提案する階層型安全管理(制御)システムと支援的保護システムの開発の起点は, 据え付け型の機械設備に対する労働災害防止対策としてであった。しかし, 近年, 自律制御の実現を目指す産業用ロボットや運転支援を実現したい建設機械の支援的保護システムに対する興味が高まっている。

新技術が実現する人と機械の新しい関係性に適用できる労働災害防止の考え方, 安全制御のありかたが求められているといえ, このための

概念的な枠組みを示していくことが, 本課題に求められる位置づけであり, 厚生労働省がサブグラフのコンセプトとして示していく必要があるものと考えられる。

注1) グループの出現数は表のパラメータ設定で異なる。本分析では, 使用する語の数を変化させてグループ抽出の状況を把握し, 適切と思われるものを分析者の主観で選定した。

注2) Connected Industriesとは, 2017年3月, 経済産業省が「人・モノ・技術・組織などがつながることによる新たな価値創出が, 日本の産業の目指すべき姿(コンセプト)である」として提唱した概念である。

現実社会で生み出されるデータ(リアルデータ)を日本の強みとし, 「リアルデータの共有・利活用(大手・中堅企業とAIベンチャーの連携・開発支援)」「データ活用に向けた基礎整備(研究開発・人材育成・サイバーセキュリティ)」「さらなる展開(国際・ベンチャー・地域・中小企業への展開)」を横断的な政策としている。また, 5つの重点取り組み分野として, 「自動走行・モビリティサービス」「ものづくり・ロボティクス」「バイオ・素材」「プラント・インフラ保安」「スマート・ライフ」を挙げている(以上, 文献33より)。

注3) i-Constructionとは, 「ICTの全面的な活用(ICT土工)」等の施策を建設現場に導入することによって, 建設生産システム全体の生産性向上を図り, もって魅力ある建設現場を目指す取組を言う。

目指すべきものとして, 「一人一人の生産性を向上させ企業の経営環境を改善」「建設現場に携わる人の賃金の水準の向上を図るなど魅力ある建設現場へ」「建設現場での死亡事故ゼロに」「「きつい、危険、きたない」から「給与、休暇、希望」を目指して」の4つを掲げている。具体的な取組内容は, 「ICT技術の全面的な活用」, 「規格の標準化」, 「施工時期の平準化」である(以上, 文献34より)

7.1.5 特に着目した先行技術

本研究では, 上記以外の先行技術として, 特許庁の特許情報プラットフォーム、国立情報学研究所のCiNii及びGoogle検索を対象に実施した。その際, 当研究所が実施した「ITを活用した安全衛生管理システム構築の手引き」(2009)と, 当研究所、厚生労働省及び日本鉄鋼連盟が連携して実施した「ITを活用した新しい安全衛

生管理手法の構築に関する実証試験報告書」(2007、2008)に記載された内容を基盤(最先行)技術とした。

その結果、IoT に関しては、前述したように著者らも研究を進めてきた人間機械協調システム、経済産業省が進めている Connected Industries、国土交通省が進めている i-Construction、ICT を活用した人体のウェアラブルセンサなどの分野で向殿政男、中村英夫、藤田俊弘などを始めとする先行研究が認められた(表 11 及び表 12 参照)。

また、IoT に関する研究では、本研究で提唱している「モノのインターネット」の「モノ」に人を含める研究が前述した日本鉄鋼連盟の傘下にある新日鉄住金ソリューションズ株式会社(現、日鉄ソリューションズ株式会社)で loX または loH と称してモノの中に人を含める先行研究が認められ、製品化も実施されていた(表 13 参照)。以下に具体例を示すので、これらの製品に御興味のある方々は必ず参照頂きたい(2020年6月25日確認)。

(a) <https://www.nssol.nipponsteel.com/ss/iox/>

(b) <https://www.atmarkit.co.jp/ait/articles/1904/01/news003.html>

(c) https://www.nikkei.com/article/DGXLRSF433143_S7A110C1000000/

これに対し、「作業空間内における人と機械の空間状態の把握」及び「作業支援システムの構築」では類似する研究はあるものの、明確な先行研究は認められなかった。

7.2 国内外の現場調査の結果

1) 日本国内の調査結果

総務省が2017年に実施した「通信利用動向調査(発送数7,257社、有効回答数(2,592社)」、また、総務省・ICR・JCERが2019年に実施した「AI・IoTの取り組みに関する調査(発送数2,230社、回収数293社)」によると、国内のAI・IoT機器の普及に関しては、IoTの導入企業は14~15%で主に大企業で進む傾向にあること、AIの導入は中堅・中小企業に多い傾向にあること、IoTを導入しない理由としては、半数以上の企業が導入後のビジネスモデル不明確であることがあげられている。

本調査では、AIやIoTを導入・または導入を計画している企業(安全装置メーカーA、安全装置メーカーB、次世代型物流施設)を対象に、現在検討しているデバイスや、IoT機器導入に関する考え方を調査することを目的とする。

(a) 安全装置メーカーA

安全装置メーカーAは、ファクトリーオートメーションシステム製品、防爆・防災関連機器等の設計・製造・販売を行っており、近年、協働ロボットを活用した協調安全ロボットシステムの開発を行っている。協働ロボットシステムは、人と機械が共存・協調した作業を対象としたもので、保護装置(ガード、保護装置、付加保護方策)による停止と隔離の安全確保とともに、ICT機器を利用した協調安全が基本となっている。図15は、日本が提案しているSafety2.0の考え方を示している。

ここで適用するICT機器は、保護装置に代替するものではなく、あくまでも、3ステップメソッドによるリスク低減方策適用後に残る残留リスクを対象としている点に注意する必要がある。

現在、安全装置メーカーAが考案している協調安全を対象としたICT機器としては、「非常停止アシストシステム」がある。この非常停止アシストシステムは、人が機械に近づくことなく停止させるための無線の活用、無線の誤操作など意図しない機械の停止を抑制する制御方式で、万が一の場合は、直接機械を停止するための予備手段など、複数の手法を用いることで、人が機械に接近することによるリスクや不安のみならず、意図しない機械の停止による生産性へのリスクに対しても有効なシステムとなっている。

(b) 安全装置メーカーB

安全装置メーカーBは、製造現場のあらゆるモノとモノ、モノと人をIoTでつないで、設備が止まる前に予兆を捉えて、設備の自律的対応及び不良品の発生要因の解明に対応する未来型工場を目指している。

また、安全装置メーカーBは、長年制御機器を設計・製造してきた強みを生かして、自社の生産ラインで、使用しているユーザーとしての製造現場のノウハウ、そしてオープンなネットワーク環境に適用するための技術を持っていることが特長となっている。調査対象の工場では、生産ラインの機器に診断装置を設けて、装置の故障や劣化の予測を行い、そこから得られたデータをデータベース化し、AIを利用した診断システムを構築している(図16参照)。この診断システムは、全国にある自社工場だけでなく、ユーザーの工場ともネットワークでつながっており、それぞれの工場で得られた情報を共有することで、システムの高度化が図られている(図17参照)。

将来的には、国外の工場ともネットワークをつないで情報共有を行うことを目指しているが、

各国の規則の違いや、個人情報の問題等を解決する必要がある。

(c) 次世代型物流施設

近年ネット通販市場の好況や、東京オリンピックの開催に向けて、首都圏で道路網の整備が進むことなどをを受けて、最新設備を備えた機能的な物流施設の需要が高まっている。この物流施設では、IoT機器の導入により、現場作業員や倉庫内のフォークリフトにICタグを取り付けて作業時間や作業の進捗状況、作業動向の把握を行うことが可能となっており、倉庫内の作業効率化を図り、作業プロセスの可視化を行うことで、作業上の無駄を見つけやすくなり、コストの改善にもつなげることが可能となる。

また、作業員がバイタルセンサやICタグを利用することで、生体情報と位置情報を集中管理して、広大な作業領域での熱中症等の対応が可能となる安全・安心した作業現場の構築を目指している。さらに、火災に関する24時間監視をIoTを用いて行っている（図18、図19参照）。

ここでも、個人情報の問題や、作業時に身につけるセンサの小型化が今後の問題となっている。

2) 海外の調査結果

(a) 調査目的

本稿では、日本国内に先行してAIやIoTの導入が進められている海外の調査を行った。

具体的には、ドイツ、オランダで既に導入を行っている企業及び計画している数件の企業を対象に、インタビュー及び紙面による調査を実施した。併せて、参考情報として、欧州のリスクアセスメントに関する実態の調査を行った。

なお、本年の始めからコロナが発生したために、アメリカの調査は中止している。このため、海外の調査結果は来年度の報告書で総合的に記載することとしたい。

(b) 調査項目

本稿での調査項目は次のとおりである。

- () 欧州におけるAIやIoTの導入の実態
- () リスク低減策としてICTを導入することの是非と具体的内容
- () 日本国内へのAIやIoT導入の是非も含めた考察と将来の方向性
- () その他、欧州でのリスクアセスメントの実態など労働災害防止に関連する事項

(c) ドイツにおける調査結果

ドイツでは、伝統的な機械安全（インタロックやフェールセーフを含む）技術とともに、IoT、ICT、AIなどの制御技術を適切に活用することで、安全性、作業性、生産性に優れた高度なシステムの構築を進めているとのことである。この取り組みは Industry4.0 の中でも進められているとのことであった。

Industry4.0 は第四次産業革命と呼ばれることもあり、一般的には、製造業におけるオートメーション化およびデータ化・コンピュータ化を目指す昨今の技術的コンセプトを意味する。Industry4.0 には、サイバーフィジカルシステム(CPS)、モノのインターネット (IoT)、クラウドコンピューティング、コグニティブコンピューティングなどが含まれる。

本年度は、ドイツの二つの大学を訪問し、聞き取り調査及び日本の現状についての情報交換を行った。

(□) Hochschule für angewandte Wissenschaften Würzburg-Schweinfurt (University of Applied Sciences Würzburg-Schweinfurt)

ドイツのプルトツブルグ市にあるヴェルツブルク＝シュヴァインフルト大学の A 教授に面談し、ドイツが提唱している Industry4.0 の生産形態におけるリスク低減の考え方について質疑応答を行った。

その結果、ドイツでは、リスク低減策に ICT 機器を適用する動きは、具体的な規則がないために実施していないとのことであった。むしろ A 教授は、当研究所が実施している高機能安全装置や ISO に提案している支援的保護システム (ISO/TR22053) に興味を持ち、この具体的内容について今後の情報交換を求められた。

(□) Bergische Universität Wuppertal (University of Wuppertal)

ドイツのブッパタール大学の B 氏に面談し、ICT 機器によるリスク低減の具体例について調査を行った。

調査の結果、リスク低減策に ICT 機器を使用する例は、あくまでも支援的な方法に限るようで、制御システムの安全関連部に ICT を直接使用する例はあまりないとのことであった。これは、当研究所が研究を行っている支援的保護システムのコンセプトと同じであり、ドイツでもあくまでも支援的な方法に限っていることが分かった。

(d) オランダにおける調査結果

オランダでは、化学薬品の製造メーカー C 社を対象に、オンラインによる紙面調査をおこなった。

その結果、IoT 及び AI は、製造工程の品質管理に既に導入されているとのことであった。これに対し、作業者のバイタルチェック等の健康管理や安全管理にはほとんど導入されていないとの回答を得た。しかし、今後は Industry4.0 の流れの中で、人と機械を連携させた協調安全の観点から導入を進めて行くとのコメントがあった。詳細は、書面では困難とのことで、今後実際に訪問し、意見交換をすることで合意した。

(e) 欧州でのリスクアセスメントに関する調査結果（参考情報）

ドイツのプルトツブルグ市にあるヴェルツブルク＝シュヴァインフルト大学の A 教授に面談し、ドイツで行われているリスクアセスメントの現状について質疑応答を行った。以下は質疑応答の内容である。

() 全ての EU 加盟国では、リスクアセスメントの結果を文書化することが義務付けられているが、一部の国では、中小企業については例外とすることが規定されている。例えば、イギリスでは労働者数が 5 人未満の企業は報告書を作成する義務はない。ただし、監査の際には、リスクアセスメントを行ったことを証明することが求められている。

() ドイツでは、その企業の業種の危険性が特に高くない場合に限り、リスクアセスメントの結果を文書化する義務は、10 人を超える労働者数の企業に限定している。

() ドイツ労働社会問題省が制定した規則として、「有害物からの保護規則」、「作業用の器具機械規則」、「建設現場衛生安全規則」、「ビデオディスプレイワークステーション規則」、「作業場規則」、「生物因子規則」等がある。

また、関係法令としてドイツ法定保険 (DGUV) が制定した規則、及び同業者労働保険組合が制定した労働災害防止規程 (UUV) 等がある。

ドイツ法定災害保険 (DGUV) が制定した規則 (Regulation) 1 第 3 条では作業条件のアセスメント (事前評価) 要求される書類、情報提供の義務が記載されており、事業者は、被保険者が仕事に関連して直面するリスクに関して評価を行わなければならないこと、特に職場の安全衛生状態に変化があったときはいつでもリスクの評価結果を再評価しなければならないこと、事業者が規定されたリスクアセスメントの結果、特定された対策及びその対策の効果の監視の結果を文書化しなければならないことなどが規定されている。

() リスクアセスメントは労働者に対する関連した危険有害要因の同定及び評価から構成

される (リスク低減方策は含まない)。適切な労働安全衛生対策 (リスク低減策) は、このリスクアセスメントの結果を基礎として決定されている。また、リスクアセスメント及び講ぜられる対策の妥当性は、常にチェックされ、状況の変化に対しても適切であることが求められている。

() ドイツでは、ドイツ連邦安全衛生研究所 (BAuA) がリスクアセスメント支援データベースを 2009 年に公開している。このデータベースには、職業・業種に関して危険有害要因 101 件と基礎的なもの 10 件の合計 111 件が掲載されており、必要に応じて検索・ダウンロードができる。また、リスクアセスメントの優良事例集や行政及保険機関がリスクアセスメントの実施を指導するためのガイドラインが閲覧できる。

次に、ドイツでの実際のリスクアセスメント事例として、ドイツ企業の安全衛生管理業務担当者 C 氏に面談し、現在 C 社内で行われているリスクアセスメントの実施状況について説明を受けた。

C 社では、特定の専門家が安全衛生担当とともに生産現場のリスクアセスメントを実施しており、結果については、保護方策と残留リスク情報とともに作業員へ伝達されている。作業員は日頃からヒヤリハット情報を報告するシステムがあるが、なかなか情報が集まらない傾向にあるため、なにかしらのインセンティブが必要ということであった。また、リスクアセスメントの結果についての妥当性については、行動分析学の専門家とともにシステムを構築しているため、今後も情報交換を行っていくことで合意した。

7.3 作業空間内での人と機械の空間状態の把握に関する検討結果

機械に起因する労働災害を防止するには、機械の設計・製造時の 3 ステップメソッド (本質的安全設計方策、安全防護方策、使用上の情報) によるリスク低減策と、設計・製造者からの残留リスク情報を基に機械の使用員が現場で実施するリスク低減策の併用が必要となる。

本稿では、機械の使用員が現場で実施するリスク低減策の具体例として、ICT 機器を利用して対象となる作業員の資格と権限、位置情報、バイタルサイン等を情報共有するとともに、適切な危険情報を伝達するための方法を検討する。

なお、本報告の作成にあたっては、日本機械

工業連合会作成の報告書「広大な作業空間における安全管理システム開発部会報告書」(2020-3)pp.21-42から引用した部分がある³³⁾。これは非公開の報告書であり、特に公開が困難な箇所は削除しているので了解頂きたい。

7.3.1 研究目的と検証項目

本研究で実施する実証実験は、以下の項目を対象とする。

(1)危険源であるクレーンの吊り荷、及び危険源に接近する人のX、Y、Z方向の存在位置検知

過去の実証実験では、人の平面的な位置情報の把握が可能かの検証を行ってきた。しかし、実際の現場では、クレーンなどのように立体的な範囲を移動する機械が多数存在する。このため、本実証実験では、危険源(クレーンの吊り荷)や危険源近くに存在する人の立体的な位置検知の可否を検証するために、カシオ計算機株式会社製の可視光通信システム(Picalico)及びホシデン株式会社製のセンサビーコン(MEDI TAG)を使用し、人と機械の検知性能を検証する。

以下のアドレスに、可視光通信システム(Picalico)の仕様を示す(2020年6月28日確認)。

<https://picalico.casio.com/ja/>

<https://picalico.casio.com/ja/about/>

<https://picalico.casio.com/ja/use/page8.html>

また、以下のアドレスにセンサビーコン(MEDI TAG)の仕様を示す(2020年6月28日確認)。

<https://www.hosiden.co.jp/medi tag/>

<https://www.hosiden.co.jp/news/product/js3001.html>

<https://www.hosiden.co.jp/medi tag/img/medi tag1.pdf>

(2)人のID情報の識別の確実性検証

これまで実施してきたカメラを使った人検知システムの画像解析では、一旦死角に入った人のID情報をリセットしたり、複数存在する人のID情報が入れ替わったりするという問題があった。そのため、今回の実証実験では、ID情報として独自の色のパターン認識機能を備えた可視光通信システム(Picalico)を新たに採用し、人

の認知精度の向上と人がカメラの死角から出た際に、人のID情報が変化しないことを検証する。なお、RFID アクティブタグの一種であるセンサビーコン(MEDITAG)による人のID情報の識別についても同時に検証を行う。

(3)RFID アクティブタグによる人の位置検知精度の改善

電波を使って位置検知ができるRFID アクティブタグの一種であるセンサビーコン(MEDITAG)は、RF タグとアンテナ間に存在する障害物によって電波の遮蔽や反射等が発生することで電界強度が変化し、正しい位置検知ができなくなる場合がある。そのため、今回の実証実験では、障害物の影響を受けにくいアンテナの設置場所と設置方法をあらかじめ想定することで、位置検知精度の改善を図ることが可能か検証する。

(4)人の生体情報取り込み可否と生体情報の精度の検証

安全と密接に関係する人の健康状態をリアルタイムに把握するために、脈拍、転倒(気圧の変化を利用して計測)等の情報をモニタリングできる機能を搭載したRFID アクティブタグの一種であるセンサビーコン(MEDITAG)を採用し、獲得した生体情報の精度を検証する。

7.3.2 実証実験場所と機器のレイアウト

図20に、実証実験場所の概要図を示す。また、図21に実証実験エリアの機器設置平面図を示す。

7.3.3 実証実験結果と考察

表14は、実験のタイムテーブルである。実験はそれぞれに対して18試行行った。

1) 可視光通信システムのID情報の確認

表15に、各試行においてクレーンの吊り荷を可視光通信システムで測位した際のデータ欠損率を示す。試行8までで35.7%と、多くのデータ欠損が生じていた。これは、実験エリアの南側にシャッターがあり、工場全体に天窗があったため、日光などの外乱の影響を強く受けたためであると考えられる。そこで、これを改善するために、カメラの露光を調整した。

その結果、欠損率は6.5%まで低下した。しかし、依然としてデータ欠損が見られたため、実験エリア南側のシャッターを閉めて再度測位を

行った。その結果、欠損率は 5.1%まで低下した。また、更なる欠損率低下のために、カメラを RGB モードからベイヤーモードへ変更した。その結果、欠損率は 0.07%まで低下した。

表 16 に、各試行において被験者 6 名を可視光通信システムで測位した際のデータ欠損率を示す。試行 7、8 では、ID ロストを意図的に発生させるため、6 名の被験者のうち 3 名(被験者 B、D、E)が LED を胸の前で持ち、実験を行った。その結果、LED を胸の前で持った 3 名の ID 欠損率は他の 3 名より大幅に大きくなった。この結果より、可視光通信システムの LED が死角に入ること、ID をロストすることが確認できた。

ここで、被験者 C はクレーン誘導のため、常に吊り荷の近くにおり、死角に入りやすいと考えられるが、他の作業者に比べ、欠損率が高くなることはなかった。また、試行 6、8 では被験者が意図的に交差や接近を繰り返すように動いたが、試行 6 は他の試行と比べて、試行 8 は同じく LED を胸の前に持った試行 7 と比べて、データ欠損が多くなることはなかった。さらに、接近や交差により、作業者同士の ID の入れ替わりや ID の変化は発生しなかった。以上の結果より、可視光通信システムでは、外乱と死角によって ID のロストが発生することが確認できた。

可視光通信システムは可視光通信によって ID 認識と測位を行っているため、LED が十分な輝度と大きさでカメラに写っていなければ LED を認識できず、データの欠損が生じてしまう。実際に、カメラの露光を調整することで、データ欠損率の大幅な低下が確認できた。

なお、可視光通信システムは実験前日に調整し動作確認も行ったが、実験当日には大きな誤差が生じてしまった。これは、日光による外乱が大きく影響していると考えられる。気象庁のデータによると、実験前日の実験場所の日照時間(直達日射量が $0.12\text{kW}/\text{m}^2$ 以上)は 0 であったのに対し、実験当日を行った時間帯では、ほぼ全ての時間において、日照があった。

このように、日照条件は日にちや時刻によって変化するため、窓などから日光が差し込む環境において十分な精度で可視光通信を使用する際は、外乱の影響を考慮し、外乱を完全に遮るか影響を低減させ、カメラの設定を動的に変化させなければならない。

一方、死角による ID のロストは、意図的に LED を隠さない限り、発生しにくいことが確認できた。但し、本研究ではカメラを 4 台使用したため、4 台すべての死角に入る可能性は低く、データの欠損率が低かったと考えられる。例えば、周囲に死角となる障害物が存在する場合、欠損率も上昇すると考えられる。したがって、測位したいエリアに応じて死角がなくなるように障害物をなくすか、カメラの設置台数、設置位置を検討する必要がある。

2) 可視光通信システムの位置測位精度

可視光通信システムの二次元位置測位の精度を検証するために、クレーンの吊り荷を移動させた際に、クレーンのクラブが保持している座標のログと可視光通信システムの測位結果を比較し、可視光通信システムの位置測位精度を検証する。表 17 に、各試行における可視光通信システムの測位誤差を示す。条件によっては、測位誤差を 400mm 程度まで減少できることが確認できた。

可視光通信システムのデータ欠損率を低下させるために、カメラの調整などを行ったが、欠損率の低下に伴い測位誤差は大きくなっており、欠損率と測位誤差がトレードオフの関係にあることが確認できる。また、可視光通信システムの各条件における測位結果(図 22~図 25)より、調整前に欠損が生じていた実験エリア東側(グラフ下側)では、調整後に測位可能になっても大きな誤差が生じていることが確認できる。

欠損が生じていた箇所には日光など外乱の影響があり、設定の調整により測位可能になっても、外乱の影響を完全には取り切れず、大きな誤差が生じていると考えられる。可視光通信システムの使用想定環境は照度 1500lx 以下だが、工場内は $1500\text{lx} \sim 1800\text{lx}$ 程度あり、シャッターの近くでは 3000lx あり、工場内が使用想定環境範囲を超えていた。そのため、測位精度が低下したと考えられる。

次に可視光通信システムの高さ方向の測位精度を検証する。

(1)クレーンで吊り荷を吊り上げ、LED の高さを 2.4m に固定してクレーンのクラブを動かした。これを 2 試行(試行 11、12)行った可視光通信システムの高さの測位誤差を表 18 に示す。可視

光通信システムは 20mm 程度の誤差で高さの測位が行えた。

(2) 吊り荷の高さを変化させながらクレーンのクラブを移動し(試行 14、18)、吊り荷の高さをレーザー距離計で計測して、可視光通信システムの測位結果と比較する。

試行 14 での地面から吊り荷の底面までの高さは、開始時は 100mm、では 1940mm、では 185mm、

では 2460mm、終了時は 430mm であった。吊り荷の高さは 980mm なので、LED の高さの遷移は 1080mm→ 2920mm→ 1165mm→ 3440mm→

1410mm である。この場合の可視光通信システムの高さ測位結果を図 26 に示す。

同様に、クレーンのクラブを斜めに移動させた試行 18 の測位結果を図 27 に示す。試行 18 での LED の高さの遷移は、980mm 3154mm 1130mm 3216mm 1080mm、最後にクレーンのクラブを完全に下降させ、980mm であった。この時の高さの測位誤差を表 19 に示す。

高さを変動させても誤差の平均は 20mm 未満であり、高い精度で測位ができることが確認できた。したがって、二次元測位の結果と合わせて、可視光通信システムは作業者と危険源の接近検知に十分な精度で三次元測位を行えることが確認できた。

3) Bluetooth を用いた三次元測位精度

可視光通信システムと同様に、クレーンのクラブの座標ログとセンサビーコンシステムの測位結果を比較し、二次元測位の精度を検証した。センサビーコンシステムの測位誤差を表 20 に示す。

センサビーコンシステムの測位結果を図 27 に示す。センサビーコンシステムの二次元測位では平均で約 4.4m、最大で 15m 以上の誤差が生じた。センサビーコンシステムは BLE の電波強度で測位をしていることから、周囲の金属での電波反射が影響して正しい電波強度が測定できず、大きな誤差が生じたと考えられる。そこで、センサビーコンシステムの受信機の取り付け場所を金属製の柱から三脚に変更し、三脚を金属から離れた場所へ移して再度実験を行った。この時のセンサビーコンシステムの測位結果を図 28 と図 29 に示す。結果として、測位誤差は約 3.8m まで低下したが、依然として最大で 10m 以上の

誤差が生じており、作業者の移動の様子を確認できる精度ではなかった。

次に、センサビーコンシステムの高さの測位精度を検証する。ただし、センサビーコンシステムは二次元での座標しか測位していないため、気圧のデータを高さの指標とした。吊り荷の高さを変更しながらクレーンのクラブを動かした試行 14、18 における、センサビーコンシステムの気圧計測結果を可視光通信システムの高さ測位結果と合わせて、図 30、図 31 に示す。

吊り荷の高さの変化に応じて気圧も変化しており、気圧が高さの指標として使えることが確認できた。ただし、気圧は大気の状態、高度又は時間経過によって変化し、気圧の値から作業者の高さを正確に求めることは困難である。そのため、気圧を高さの指標として用いる際は、気圧の変動を見ることで作業者の高さの変動を見る必要がある。

これらの結果より、Bluetooth を用いた二次元測位の精度は、人と危険源の接近検知を行うには不十分であるが、作業者のおよその位置の計測を行えることが確認できた。さらに、受信機の設置方法の変更により、測位精度が向上することが確認できた。今後は、受信機の設置方法の調整や、受信機の追加、測位のアルゴリズムの改善などにより精度向上が可能であるかもしれない。

4) 姿勢情報による危険検知特性

センサビーコンシステムで取得した生体情報と、実験時の様子を撮影した映像を比較し、作業者に発生した異常をセンサビーコンシステムのデータから検出できるか検証した。ただし、被験者が実際に転倒することや、体調不良になることは困難であるため、本研究では転倒を想定した倒れ込みの動作を行い、これを検出できるか検証した。

3) の結果から、気圧が作業者の高さの指標となることが確認できたため、気圧データから作業者の行動を検出できるかを検証した。試行 14 で、被験者 6 名が寝ころびや屈伸、ジャンプなど、上下の移動を伴う動作を行った際のセンサビーコンシステムの気圧計測結果を図 32 に示す。

図 32 から、時間経過に伴い全体的に気圧が低下傾向にあることが確認できる。特に、試行 14

ではクレーンの吊り荷を動かしていないにもかかわらず、気圧が緩やかに低下している。そこで、時間経過による気圧の変動の影響をなくすため、クレーンの吊り荷位置の気圧データと各被験者の気圧データとの差分を取った(図 33)。

本来、高所に行くほど気圧は下降し、低所に行くほど気圧は上昇するが、図 33 においてはクレーンの吊り荷と被験者の気圧の差分を取っているため、被験者が低所に行くほど気圧の差分の値も低下している。

次に、被験者 B について、可視光通信システムの高さ測位結果とセンサビーコンシステムの気圧計測結果(クレーンの吊り荷位置との差分値)を比較し、実験時の映像で確認した被験者 B の行動を記載したものを図 34 に示す。

可視光通信システムのサンプリングタイムは 0.3 秒であるため、被験者の動作を詳細に確認することができ、高さの違いからしゃがみと寝ころびを区別することができる。一方、センサビーコンシステムのサンプリングタイムは 1 秒間隔であるため、屈伸やジャンプのように素早い動作を詳細に把握することができなかつた。

センサビーコンシステムは、寝ころびはゆっくりかつ変動の大きな動作であるため、気圧の変動が確認できた。屈伸やジャンプを行った際にも気圧の変動は確認できるが、上下運動を繰り返していることまでは確認できない。

可視光通信システムの LED は頭上にあり、被験者の上下運動をそのまま反映するのに対し、センサビーコンシステムのタグは手首に付けていたため、全身の動きとは異なる、腕のみの動きの影響を受ける可能性がある。

図 33 より、被験者 D は最大で 0.8hPa 程度の気圧変動があり、被験者 C 及び被験者 F は 1hPa 程度の気圧変動がある。0.8hPa の気圧差は約 6.78m、1hPa の気圧差は約 8.47m の高度差にあたるが、実験中の高度の変化は最大でも 2m 程度(被験者が手を挙げている状態と寝ころんでいる状態の差)である。そのため、被験者 D のデータは正確に計測できていない。また、センサごとに測定値に差があったため、気圧の値からそのまま高度を求めることはできない。

一方、図 34 より被験者 B の気圧変動は最大で 0.2hPa 程度で、約 1.69m の高度差にあたる。実際に、被験者 B が頭上の LED を抑えている際の

手首位置と寝ころんだ際の手首位置の高度差は 1.7m 程度であり、気圧の変動から高さの変動を正確に測れることが確認できた。

図 35 にその他のバイタルサイン及びその時の作業者の動作を示す。センサビーコンシステムには加速度や気圧から転倒を検知する機能が備わっているが、実験中に転倒を検知した回数は 5 回で、その内 4 回は実際には転倒していなかった。1 回のみ、被験者が転倒を想定して、しゃがみながら腕を振り下ろす動作を転倒として検知していた。

加速度は、実際に記録する値は「0:止まっている、1:ゆっくり動いている、2:速く動いている」の 3 値であり、図 35 において被験者が寝ころんでいるときに加速度レベルが 2 になっているように、被験者の動きとの関連がない箇所があった。脈拍のデータは被験者の動きに伴って上昇していることが確認できたが、その他のバイタルデータに関しては、被験者の動きと明確な関連がなかった。

実験時には実際に被験者に体調不良などの異常を発生させることはできず、転倒に関しても転倒を想定した倒れ込みの動作を行ったので、センサビーコンシステムが検知できる転倒とはデータの特徴が異なっていた可能性がある。

本研究では、気圧による転倒検知以外に、危険検知に有効な指標は確認できなかったが、様々なバイタルサインを、位置情報と共にリアルタイムで取得できたため、バイタルサインの通信方式として、Bluetooth が有益であることが確認できた。

今後は、複数のバイタルサインを組み合わせる、別のバイタルサインを取得する、様々な条件及び被験者で検証を行う、作業中の作業者のバイタルサインを取得する、などにより有効な指標を検討することで、作業者の異常状態の発生を検出できると考える。

7.3.4 結論

本研究では、作業者と機械の共存・協調作業に関する安全性を実現するために、作業者や危険源の ID と三次元位置情報、作業者のバイタルサインをリアルタイムにモニタする作業支援システムの有効性を検証する実験を行った。

得られた結果は、次のとおりである。

1) 可視光通信システム可視光通信システムでは、作業者と危険源の接近検知を行うのに十分な精度で ID 認識と三次元位置測位が行えた。また、位置測位データの欠損率と測位誤差はトレードオフの関係にあったが、欠損率が低下した場合の測位誤差も実用に耐えるものであった。

なお、実際に使用する場合は、支援的保護システムを導入する環境に応じて必要な精度を検討し、外乱や死角が少なくなるように留意することで欠損率及び誤差を共に抑えることができると考えられる。

2) 可視光通信システムでは、今回使用した発信機（移動機）の形状が大きいため、作業者の測位を行うには形状の小型化とともに、計測に必要な発光量の維持が課題となる。

3) バイタルモニターのセンサビーコンシステムを用いた位置測位の精度は、作業者と危険源との接近検知を行うには不十分であった。しかし、おおよその位置情報は取得できるため、バイタルサインなど他の情報と組み合わせることで、作業者の異常発生検知（体調不良に伴う転倒等）とそのおおよその位置検出とを行うことが可能であることが推測できる。

一方、気圧データからは作業人や危険源の高さの変動を見ることができ、高さの指標となることが確認できた。しかし、気圧は作業者の動作だけでなく、時間経過や大気の状態によっても変動する。また、センサビーコンシステムの気圧は同じ環境での計測でも最大で 1hPa 程度の差があった。したがって、気圧から作業者の動作を検出するには、基準となる気圧との差分を取り、時間経過による気圧変動の影響をなくし、作業者の行動による気圧変化のみを取り出したうえで、その変化量を見るなど、動的な閾値設定が必要となる。

4) 本研究で実証実験を行った機器を使用して構築する作業支援システムは、作業人や危険源の ID 認識と三次元測位とを行い、作業者と危険源の接近を検知し、警報等により注意を促すシステムであり、危険を検出した場合に機械を非常停止させるものではない。

したがって、このシステムでは人の安全が確認できないときは機械の運転を許可しない安全確認形インタロックとの階層化構成が不可欠である。この具体的構成は、第 5 章の IoT を活用し

た階層的な安全管理システムの提案で述べた。

なお、作業支援システムに必要な精度の具体的な値は決まっておらず、実際に導入する現場の作業範囲や作業者の人数、危険源の大きさなどを考慮して、必要な精度を検討しなければならない。また、危険側故障を防ぐためには、測位誤差よりも欠損率の低下が重要となる。

5) 本実験では、様々なバイタルサインをリアルタイムで取得することができたため、同時に測位できることも含め、Bluetooth が生体情報の通信手段として有益であることが確認できた。また、複数の情報を組み合わせることや、別の生体情報を取得することで、作業者の異常発生検知が行える見込である。実験時には被験者の異常を実際に発生することはできないため、より多くの条件、被験者での検証が必要となる。また、検出したい異常や動作に応じて、取得するデータ及びデータの取得間隔などを検討する必要がある。

7.4 作業支援システムの構築に関する検討結果

7.4.1 資格・経験の違いによる危険認知実験

1) 目的と実験方法

本実験は、移動機械と作業者との接触災害を防止するための作業支援システム構築に関して、対象となる作業者の資格や権限の違いによって、同じ危険情報を提供された場合の危険認知特性に違いがあるかを明確にすることを目的とする。

実験は、関東圏内の産業用クレーン総合メーカー A 社工場内に設置した 15m×20m の実験エリアにおいて実施した。実験エリア中央には、2D の移動体として業務用ロボットクリーナ（RC200DZSP、株式会社マキタ、愛知県、図 36）を使用した。

実験では、移動体中央より半径 2.0m 以内を「危険（立ち入り禁止）区域」とし、実験条件により危険区域の境界を移動体の上部に取り付けた緑色同心円のレーザーライトを合図刺激として照射した（図 37）。

また、移動体を 2.0m 四方のアルミテープの正方形で囲み、実験条件によりアルミテープ内の移動エリアをランダムに移動した。この実験では、20 - 50 才代の成人男性 12 名を実験協力者と

した。なお、クレーン荷役作業のスキルの違いにより、クレーン荷役作業経験者を 3 名および未経験者を 9 名とした。

なお、本実験は A 社で実施し、A 社が撮影した動画を労働安全衛生総合研究所で解析した。

2) 実験手順

本実験は、実験協力者に段ボール（荷）を持たせ、危険区域への立ち入りを回避しつつ実験エリアの外側 A 地点から対角にある B 地点になるべく迅速に荷を運ぶこととした。具体的には、A 地点と B 地点の床面にテープでラインを引き、目印とした。

実験開始前に、実験協力者を A 地点に誘導し、荷を見せながら、次のような教示を行った。「この荷物を A 地点から、対角上の B 地点までなるべく早く運んでください。その際、中央地点にある移動体の中心から半径 2.0m は危険エリアなので立ち入らないようにして B 地点まで行ってください。“用意、スタート”と声を掛けます。B 地点まで到達した際には、“はい、ありがとうございます”と声を掛けます。この動作を 5 回続けて行います。また、休憩をはさんで条件の異なる移動実験を 4 種類行いますので、合計で 20 回横切り行動を行っていただきます。これから B 地点を確認しましょう。」

実験者は研究協力者を誘導し、B 地点の位置を確認した後に再び A 地点に戻った。実験内容に関する質問があった場合は、相当する教示箇所を繰り返した。実験は、次の 4 条件とした。1) 移動体は実験エリア中央に静止しており、危険区域のレーザーライトの照射なし、2) 移動体は実験エリア中央に静止しており、危険区域のレーザーライトの照射あり、3) 移動体は実験エリアをランダムに動いており、危険区域のレーザーライトの照射なし、4) 移動体は実験エリアをランダムに動いており、危険区域のレーザーライトの照射あり。実験協力者全員が全 4 実験条件をそれぞれ 5 回ずつ繰り返し行った。実験条件は順序効果を避けるため、実験協力者ごとに順番をランダムに変更した。実験条件の概要を表 21 に示す。この条件の下で、実験開始とともに A 地点から B 地点まで移動する時間を計測した（図 38）。

3) 実験結果

クレーン荷役作業経験の有無による 1 回目から 5 回目の平均移動時間を実験条件別に図 39 に示す。移動体の静止条件及び動く条件ともに、経験者はライトの合図がない状態よりもライトがある条件において平均移動時間が短縮した。

一方、経験のない群では、ライトがあるほうの移動時間が延長していた。また、ライトの合図がない条件では、移動体の動きの有無にかかわらず、経験者よりも経験のない群のほうが移動時間が短かった。これに対し、ライトの合図がある場合は、経験ありの群と経験なしの群に差は見られなかった。

移動時間を 1 回目から 5 回目に分け、変化を見てみると（図 40）移動体が動いているか否かにかかわらず、ライトの合図がない条件では、一貫して経験のない群が経験者に比べて、移動時間が短かった。これに対し、ライトありの条件では、クレーン荷役作業経験の有無にかかわらず、移動時間はほぼ同じであった。

また、移動体が静止している条件では、回を重ねるごとに、経験者及び未経験者の移動時間が短縮する傾向がみとめられた。しかし、移動体が動く条件下では、経験者は時間が延長する傾向がみられた。これに対し、経験のない群では、回を重ねてもほとんど移動時間に変化は見られなかった。また、ライトの合図がある条件では、移動体が制しているあるいは動いていてもほとんど移動時間に繰り返しによる変化は認められなかった。

移動時間に関しては、ライトの合図がない条件下では、クレーン荷役作業経験者のほうが未経験者よりも短いと予測していたが、これに反して未経験者のほうが移動時間が短いことが判明した。この結果は、1 回目から 5 回目を分けて分析してみるとより明確となった。実験協力者には、あらかじめ半径 2m 内は危険区域だと告げているため、クレーン荷役作業に従事した経験のある者は、ライトの合図がない場合は、注意深く危険区域を回避していたために移動時間が長くなった可能性がある。また、移動体が動いている時に、回を重ねるごとに移動時間が延長したことからその傾向がうかがえる。

一方、クレーン荷役作業経験がない群においては、ライトの合図がない場合は、移動体が静

止している時には移動時間の短縮が、動いている場合でも移動時間は変化がなかった。このとき、半径 2m の危険区域すれすれあるいは中に入って移動している可能性が高く、安全行動を取っているとは言えない。それとは反対に、ライトの合図がある場合には、移動体が静止していても動いていても、1 回目から 5 回目までほぼ同じ時間で移動しており、時間の増減がほとんど見られなかった。この現象は、経験者でも未経験者でも同様にみられており、両者間に時間の差もほとんどなかった。

7.4.2 結論

資格と権限の違いによる作業者の危険認知実験では、未経験者でも安全な作業を行うためには、レーザーライトによる危険区域の明示が重要であることが明確化された。本実験の結果は、作業支援システム構築において、作業現場における危険領域の視覚情報の提示の重要性を示唆するものである。

7.5 安全装置の有効性評価に関する検討結果

機械に起因する労働災害の直接原因として、安全装置の故障や意図的無効化がある。しかし、実際の現場では、安全装置の動作状態を常時監視（モニタリング）していないので、安全装置の故障や無効化に起因して、どの程度労働災害が発生しているか明確でない。

そこで、安全装置の動作状態を常時監視（モニタリング）するためのプロトタイプとして、実際に機械設備に使用されている安全装置が正常に動作しているか、及び安全装置が意図的に無効化されていないかを常時監視するモニタリングユニットを製作した。

試作するプロトタイプは、次の要求仕様を満足するものとした。

- 1) モニタリングする信号の種類は次の 4 種類とする。
 - 非常停止ボタンの動作回数
 - 安全装置(ライトカーテンやドアスイッチ)の動作
 - 安全装置の有効/無効の切替スイッチ
 - 装置の起動ボタンや停止ボタンによる運転状態の信号
- 2) 入力信号数は 16 点以上とする。
- 3) 信号は状態変化のタイムスタンプ(時間特性)を残すものとする。
- 4) ミューティングなどの実施もモニタリング

可能とする。なお、ミューティングは現段階では人による安全装置の意図的無効化を考えているが、今後、機械側からの制御信号によってミューティングを行う場合も考慮して設計を行う。

- 5) 本装置は今後、既存の機械設備に使用する可能性もあるので、入力は電圧入力や無電圧入力、NPN/PNP/接点入力なども考慮しておく。
- 6) 最終目標としては公衆回線(SIM)などを使用し、エンドユーザーの社内ネットワークを介さずにデータ送受信できるシステムを構築したいと考えているが、今回の製作ではそこまでは行わない。

以上の装置を利用して安全装置のコホート研究を実施する。図 41 に、試作したモニタリングシステムの写真を示す。

7.6 危険点近接作業で用いる安全装置の検討結果

7.6.1 労働安全衛生規則や国際安全規格における規定

最近の製造ラインには、IoT や ICT が用いられ、インダストリ 4.0 として多品種少量生産の多岐にわたる仕様変更に的確にかつ効率よく対応することができるようになっており、製造ラインの動作が複雑化していることが挙げられる。このような製造ラインは定常作業においては省力化が進み、人を要しないことが多い。しかし、たとえ自動生産ラインであっても、調整作業やメンテナンスなどでは人を要し、複雑な製造ラインの中で作業を行うことを求められる。調整作業やメンテナンスなどの定常作業以外の作業を非定常作業と呼ぶことがあるが、これらの非定常作業時に労働災害が発生していることが指摘されている^{3,4)}。

この要因として、自動生産ラインを設計する際に、人の介在を考慮していないために、安全通路がなく機械への安全なアクセスが難しい、退避空間がなく機械が接近してきたときに逃げることができない、ガードがなく危険個所に触れてしまうことなどがあげられる。また、プログラムや外部からの信号に基づいて動くことから人の注意力では機械が次にどう動くのかが分からないこともあげられる。さらに、これらの非定常作業を含む危険点近接作業(機械の危険点に近接して行う作業)時に用いることができる安全装置があまりないことも事故の要因の 1 つといえる。

労働安全衛生規則第 107 条では、機械の調整等の作業を行う際には原則として機械を停止させることとし、機械を動かしながら調整等の作

業を行う必要があるときはイネーブル装置やホールド・ツウ・ラン制御装置を用いることなどが平成 25 年 4 月の労働基準局長通達(基発 0412 第 13 号)に示されている。ホールド・ツウ・ラン制御装置は、モーメンタリスイッチを用いて、押している間だけ機械が動くようにするもので、例えば、立体駐車場の昇降スイッチなどに用いられている。これを用いる趣旨(重要性)がユーザに伝わっていないと容易に無効化され、立体駐車場などでしばしば事故が発生している。イネーブル装置はアクチュエータを ON にしている間だけ制御装置の操作を有効にするもので、国際安全規格 ISO10218-1(JIS B 8433-1)において、産業用ロボットのペンダント制御装置又は教示制御装置に 3 ポジションのイネーブル・スイッチを設けることなどが規定されている。

なお、調整作業やメンテナンス作業などの非常作業では機械の危険源に近接して作業を行う。本章においては、非常作業に限らず、機械との協同作業なども含め、危険源に近接する作業(危険点近接作業)を対象とする。安全装置は試行錯誤で作ることはできない。一度の失敗でも致命的な事故となるからである。ここでは、危険点近接作業に用いる安全装置に求められる特性(条件)を明らかにし、これをもとに、既存の安全装置であるイネーブル装置の有効性を調査する。さらに、この結果をもとに、新たな安全装置に必要な要件を検討する。

7.6.2 時間特性

人に危害が生じるのは危害を及ぼすエネルギーが人体に伝わるからであり、機械災害は、機械のエネルギーが人間に伝達されることで発生する。機械のエネルギー(運動エネルギー、電気エネルギーなど)が人間に伝達するのは、一般に、機械と人間が接触するか、熱などが人間に伝播することで発生する。機械と人間の接触によるエネルギーの伝達を次式に示す。化学物質や電磁波の伝播についても時間や空間を拡張して考えることで同様に考えることができる。

機械のエネルギーを 2 値の論理記号 $E(t)$ (エネルギーあり: 1、エネルギーなし: 0) 機械が点 x 、時刻 t に存在することの有無を 2 値の論理記号 $M_x(t)$ (存在あり: 1、存在なし: 0) 人間が点 x 、時刻 t に存在することの有無を 2 値の論理記号 $H_x(t)$ (存在あり: 1、存在なし: 0) とすると、事故 $Ac(t)$ (事故あり: 1、事故なし: 0) の発生を示す条件式は

$$Ac(t) = E(t) \cdot M_x(t) \cdot H_x(t) \quad (20)$$

となる。このため、事故が発生しないための条件式 $\neg Ac(t)$ は、

$$\begin{aligned} & \neg Ac(tac) \\ & = \neg E(tac) \quad \neg (M_x(tac) \cdot H_x(tac)) \quad (21) \end{aligned}$$

となり、事故発生時刻 tac に、エネルギーを十分に小さくするか、機械のエネルギーが伝達される空間(点)に人間が入らないことが求められる。このことは、安全のための隔離の原則及び停止の原則(運動エネルギー 0)として知られていることと符合する。機械のエネルギーが伝達される点は一般に可動部の前面、熱源、充電部などである。

ここで図 42 のモデルを考える。事故が時刻 tac で発生するとする。事故を起こさないためにはその前に機械のエネルギーを 0 にする必要がある。機械のエネルギー 0 の目標時刻 tta を事故発生時刻 tac よりも手前に設定することとなる。ここでは機械のエネルギーとして運動エネルギーを考えるが他のエネルギーでも同様に考えることができる。 tta に運動エネルギーを 0 にするためには、制動時間 Tbr (エネルギーを消散する時間)を逆算した時刻 tb に制動を開始しなければならない。さらに、イネーブル・スイッチの場合には、異常を検知しスイッチを OFF するまでの時間(操作時間) Tre とすると td までに検知する必要がある。これを図 42 及び式(22)に示す。

$$td = tta - Tbr - Tre \quad (22)$$

検知するのが時刻 td より遅れると事故は回避できない。事故を防ぐためにはこの時刻がクリティカルな時刻といえる。つまり、 tb よりも前に(早い時刻に)事故が tac で発生することを把握(予測)している必要がある。事故が発生していない時点で事故を予測して制動を開始することが求められることとなる。予測することが必要な時間 Tp は、式(23)で示される。

$$Tp = Tbr + Tre \quad (23)$$

安全装置には、式(21)、(22)、(23)を満たすよう機能することが求められる。また、安全装置は、故障していないときは安全を確保できるが故障すると安全を確保できないというのでは適当ではない。故障しない装置はない。たとえ故障したとしても少なくとも安全は確保する必要がある。安全装置は予測時間 Tp が $Tbr + Tre$ よりも短くなり制動開始時刻が td に遅れることが危険側の故障となる。 Tp が $Tbr + Tre$ よりも長くなり制動開始時刻が td よりも早くなるのであれば生産に影響がでるかもしれないが安全には影響しないこととなる。

ところで、安全装置が正常に機能するか否かを 2 値の論理記号 N (正常 = 1、異常 = 0) 異常時の挙動 Ab (出力あり = 1、出力なし = 0) で示すと、

$$\neg Ac(tac) = \{ \neg E(tac) \quad \neg$$

$(Mx(tac) \cdot Hx(tac)) \cdot N \rightarrow N \cdot Ab$ (24)
 となり、異常時の挙動 Ab が安全側に移行する必要がある。この場合、安全側とは規定よりも早くブレーキを掛ける側（式(22)を満たす側）、危険側とはブレーキが遅くなる側（式(22)を満たせなくなる側）である。

7.6.3 3 ポジション・イネーブル・スイッチの特性

前項で示した安全装置のうち、産業用ロボットなどで用いられている3ポジション・イネーブル・スイッチについて検証する。なお、先に示した厚労省の通達（平成25年基発0412第13号）には、イネーブル装置やホールド・トゥ・ラン制御装置に求められる特性は記されていない。

イネーブル・スイッチは、危険点近接作業で用いられる。スイッチを把持している間は機械の運転を許可し、スイッチから手を離すことで機械の運転を止める。ところが、危険な事象が発生した際に、スイッチを離すのではなく、スイッチを握り込んでしまうことがあるとされたことから、3ポジション・イネーブル・スイッチが開発された。3ポジション・イネーブル・スイッチは、図43のように、適切な力でスイッチを握っているときに機械の運転が許可され、スイッチから手を離れた時だけでなく、スイッチを握り込んでしまったときも機械の運転を止める。

1) 実験(1)

まずは、少数の被験者で予備実験を行う。

図44の実験装置で、被験者にモニタ上で疑似作業（パズルゲーム）を行わせる。被験者8人をXグループとYグループの4人ずつ2つのグループに分け、Xグループには作業の際に3ポジション・イネーブル・スイッチを携帯させ、Yグループはイネーブル・スイッチを用いず作業を行わせた。Xグループの被験者には、3ポジション・イネーブル・スイッチの使用方法について説明を行った。全被験者の作業を行っていない手の人差し指第二関節にはゴニオメータを貼り付けた。実験ではXグループ、Yグループともに2種類の実験を行った。実験Aでは、作業開始から20秒後にイネーブル・スイッチを起動させるように被験者に伝えた。その際に残り時間が分かるようPC画面上にタイマーを表示した。これはいつ停止するかを前もって分かって止めるものであり、通常の停止（通常停止）の操作に近いと考えられる。一方、実験Bでは、被験者に通知せずに作業開始から20秒後にPC画面をブルースクリーンに切り替えた。実験B

は予期せぬトラブルへの反応と言える。なお、実験は倫理委員会の審査を受けて行った。

実験結果を表22に示す。本実験の測定においては、スイッチを把持しているグループはスイッチが起動するまでの時間、ゴニオメータのみのグループはイベント発生後の角度のピーク値の50%に到達するまでの時間を計測した。イネーブル・スイッチの有無によって傾向は変わらなかった（外れ値を除く）。実験A（いつ停止させるか分かっている通常停止）の方が実験B（いつどのようなことが発生するか分からないトラブル）よりも早く止めることができる。あらかじめ止めるタイミングが分かっているため事前に備えておくことができるためと考えられる。

2) 実験(2)

図45の実験装置で、被験者はモニタ上で疑似作業（アームの動作監視）を行う。実験前にイネーブル・スイッチの使用方法を教示し、実験Aではアームの動作中に、警告灯を点灯させ、警告灯が点灯したときにイネーブル・スイッチを操作させる。警告灯がいつ点灯するかは分からないが、どこで何が起こるか分かっていることになる。一方、実験Bは、アームの動作中に、突然、アームを被験者に向かって衝突させる画像をみせる。いつ何が起こるか分からない状況で、驚愕的な状況が発生する。この実験も倫理審査を受けて行った。

被験者11人の被験者をXグループ5人とYグループ6人の2つにグループ分けし、実験の順番による影響を排除するためにXグループは実験Aのあと実験Bを行い、Yグループは実験Bのあと実験Aを行った。

実験結果を表23に示す。いつ起こるか分からない実験Aの方が、何が起こるか分からない実験Bより早く反応できる。ただし、反応時間は個人差によるばらつきが大きい。今回の実験で最も反応時間が遅かった被験者は、アクシデント発生からイネーブル・スイッチの動作まで1.663秒かかる。また、アクシデントが発生した際に、イネーブル・スイッチのスイッチを離す人と握り込む人がいた（スイッチを離す人よりも握り込む人が多かった）。イネーブル・スイッチが3ポジションである必要性が示された。

7.6.4 考察

今回行った実験(1)(2)は被験者数が少なく、統計的な優位性を示すことはできないことから予備実験としての考察を行う。

アクシデントがいつ発生するか分かっていれ

ばすばやく対応できることや、いつ発生するか分からなくても、どこでどのようなことが起きるかが分かっているれば反応時間が短くなることが示された。

教示作業や調整作業などは、非定常作業ではあるが、定型的な業務であり、危険源の同定を行うことができる。どのような危険点に、どのようなタイミングで近接するかを同定することにより反応時間を短くすることができると考えられる。また、イネーブル・スイッチは、人をセンサとして用いることから、疲労などによる検知能力の低下が課題であり、IoT を用いることでこの課題に対処できると考えられる。その際、7.6.2 で示した条件式を満たすことが求められる。

8 考察

8.1 労働政策審議会の報告書に対する考察

労働政策審議会労働政策基本部会では、令和元年6月に「働く人がAI等の新技術を主体的に活かし、豊かな将来を実現するために」との題目で、報告書を作成している。

この報告書では、質の高い労働の実現のためのAI等の活用(第1章)、AI等の普及により求められる働き方の変化(第2章)、働く現場でAI等が適切に活用されるための課題(第3章)について述べている。

特に第3章の課題では、(1)労働者のプライバシーの確保や情報セキュリティの確保、(2)AIによる判断に関する企業の責任と倫理、(3)円滑な労働移動の実現や新しい働き方への対応、(4)AI等をもたらす時代の変化を見据えた政労使のコミュニケーションの重要性を列記している。

以上は社会科学的観点からの課題であり、安全工学の観点からはIoTの安全工学的観点からの検討も含めて、本研究による検討が必要と考える。特に、AI等を利用した自動運転では、「緊急時にAI等による判断と人による判断のどちらを優先するか」という問題が存在する。また、IoTを利用したシステムでは、センサや制御システムを含めた故障やトラブルによって「危険を誤って安全と判定」することがある。これらの問題に関しては、安全確保に関する責任問題も含めて検討が必要である。

さらに、労働政策審議会の報告書ではAI等に関する技術進歩を肯定的に捉えている。しかし、AIに必要な「機械学習」では、教師である人間が大量の画像データなどを教材にして「これは

何々です」とAIシステムに教え込む作業が必要である。この作業に要する時間はAIシステムの開発に要する時間の8割近くを占めると言われており、作業に従事する労働者にとっては大変過酷な単純労働であると言われている。この点は本報告書の範囲外であるが、AIシステムを労働現場に導入する際に配慮すべき重要な課題と考えられる。

8.2 IoTシステムで利用される情報の基本特性の考察

平成29年版 情報通信白書³⁹⁾では、IoT(Internet of Things)を、ビッグデータを収集するための手段と位置づけ、ビッグデータの種類を大きく以下の4つに分類している。以下に定義を抜粋する。

- 1) 政府:国や地方公共団体が提供する「オープンデータ」。(中略)
- 2) 企業:暗黙知(ノウハウ)をデジタル化・構造化したデータ(「知のデジタル化」と呼ぶ)。「知のデジタル化」とは、農業やインフラ管理からビジネス等に至る産業や企業が持ちうるパーソナルデータ以外のデータとして捉えられる。今後、多様な分野・産業、あるいは身の回りに存在する人間のあらゆる知に迫る、様々なノウハウや蓄積がデジタル化されることが想定される。
- 3) 企業:M2M(Machine to Machine)から吐き出されるストリーミングデータ(「M2Mデータ」と呼ぶ)。M2Mデータは、例えば、工場等の生産現場におけるIoT機器から収集されるデータ、橋梁に設置されたIoT機器からのセンシングデータ(歪み、振動、通行車両の形式・重量など)等が挙げられる。この「M2Mデータ」と2)の「知のデジタル化」の2つについては、情報の生成及び利用の観点から、主に産業データとして位置づけられる。
- 4) 個人:個人の属性に係る「パーソナルデータ」。「パーソナルデータ」は、個人の属性情報、移動・行動・購買履歴、ウェアラブル機器から収集された個人情報を含む。また、「改正個人情報保護法」においてビッグデータの適切な利活用に資する環境整備のために「匿名加工情報」の制度が設けられたことを踏まえ、特定の個人を識別できないように加工された人流情報、商品情報等も含まれる。そのため、「個人

情報」とは法律で明確に定義されている情報を指し、「パーソナルデータ」とは個人情報に加え、個人情報との境界が曖昧なものを含む、個人と関係性が見いだされる広範囲の情報を指すものとする。

上記のうち、本研究が扱うIoTシステムで利用される情報は、主にM2Mとパーソナルデータである。

8.2.1 ICT活用安全管理との特性の違い

情報技術を活用した安全管理システムの構築においては、取り扱う情報の特性を踏まえた設計が求められるところである。ICT活用安全管理システムで取り扱う情報(M2Mである)の基本特性は述べた通りであるが、IoT活用安全管理システムでは、これらの特性に加えて、パーソナルデータの特性を考慮する必要があると思われる。

8.2.2 個人に関する情報と社会認識の変化

IoT活用安全管理システムでは、労働者の体調管理などを目的として生体情報などの労働者のパーソナルデータを取り扱う。労働者をセンシングして情報を取得するためにIoTの象徴ともいえるウェアラブルデバイス²を用いるが、このウェアラブルデバイスによるセンシングデータの取扱いと、その安全な運用については、今まさに社会全体で議論がなされているところである³⁹⁾。ここでの安全には、セキュリティ対策などの技術的観点の安全だけでなく、人間の尊厳に関する理念的な安全（個人に関する情報が保護され、プライバシーの侵害がなく、人間の尊厳が尊重される）ことなども含まれる(人間中心AI原則の理念など)。

すなわち、情報の取り扱う上で「倫理」が強く求められる点が、IoT活用安全管理システムの特徴であるといえる。

なお、第11次労働災害防止計画で示されたICT活用安全管理システムでは、「倫理的側面」の色合いは薄い。これはそもそも、システムに求められていた機能が、労働者に対する危険回避情報(第4章参照)の提供であったことに拠る。当時は、いわゆる2007年問題が日本の喫緊の課題とされていた時期であったため、ベテランが未熟者を支援するのと同じように、ICTシステムが、労働者に作業関連情報の提示や、危険箇所への接近警告、連絡調整等のコミュニケーション支援を果たすことが期待されて

おり、パーソナルデータを取り扱うことは想定されていなかった(パーソナルデータそのものの概念が確立していなかった)。

8.2.3 情報の基本特性および特徴

1) 倫理的視点からの特性

情報を扱う上での倫理の問題は、情報をもつ基本特性に起因して生ずることが、情報教育学会・情報倫理教育研究グループより指摘されている。以下に、情報の基本特性を示す^{40),41)}。

(a) 相対性(受信者の存在)

情報は受け取る人が存在する。送り手から出された情報を、受け手が受け取ることによって、はじめて情報の意味が生ずる。

(b) 目的性(意図の介在)

情報を発信する場合も受信する場合も、何らかの目的が介在する。情報は、受信者によって多様に活用されるため、その信頼性が要求される。正確でない情報を送るようになれば、情報に対する信頼性が薄れる。

(c) 個別性(価値の個別性)

情報の価値は人それぞれである。情報を受け取る目的や価値観によって、情報に成りうるか否かが決まる。

(d) 不滅性(情報の残存性)

創造された情報は、誰かが受け取ったとしても、減少したり、変化したり、消滅したりするものではない。一度生じた情報は消滅しにくい。

(e) 複製性(情報の大量複製の容易性)

実際の物質とは異なり、複製して同一のものを創り出すことが容易である。特にデジタル化された情報は、短時間に大量に容易に複製できる。

(f) 伝搬性(情報の伝搬性)

人々の間を容易に伝搬して広められていく特性。

2) 表現と意味内容～データと情報³⁸⁾

上述の6つの特性のうち、特に4)～6)の3つの性質は、情報にはデータという別の側面があることが関係している。図1に情報とデータの関係を示す³⁸⁾。

図1:左は、データと情報を同一レベルのものと考えられる場合である。これに基づけば、「データ」は「情報」の一部であり、情報の中には電子化されているデータと電子化されていないデータがある、という考え方となる。これに対して図46:右は、データと情報

を別レベルのものと捉える考え方である。この見解に基づけば、情報は意味内容であり、データとは情報の表現であるとされる。例えば、知識、精神状態、思想、思考の内容が情報である。これに対し、データは符号や信号により構成され、情報に変換される。この考え方にたつと、情報とデータは異なる次元にあるということになる(以上、文献4より抜粋)。

3) 関連法規の存在³⁸⁾

情報の利用については、以下に示すように、問題の対象が意味内容(情報)であるのか、表現(データ)であるのかで、問題を取り扱う法律が異なる。例えば、「プライバシー侵害や個人情報保護法では、意味内容が問題であり、紙媒体か電子データかといった表現形式は問われない。他方で、不正アクセス禁止法では、データという表現形式をとっているものが保護対象となっており、データの意味内容については問われない」とされている(以上、文献38より抜粋)。

9 結論

令和元年度(第1年度)は、国内外の先行技術調査を実施した後に製造現場における IoT を活用した階層的な安全管理システムの開発に関する研究を行った。得られた結果と考察の要点は次のとおりである。

令和元年度(第1年度)は、国内外の先行技術調査を実施した後に製造現場における IoT を活用した階層的な安全管理システムの開発に関する研究を行った。得られた結果と考察の要点は次のとおりである。

1) 国内外の先行技術調査は、文部科学省所管の JDream、特許庁の特許情報プラットフォーム、国立情報学研究所の CiNii 及び Google 検索を対象に実施した。その際、当研究所が実施した「IT を活用した安全衛生管理システム構築の手引き」(2009)と、当研究所、厚生労働省及び日本鉄鋼連盟が連携して実施した「IT を活用した新しい安全衛生管理手法の構築に関する実証試験報告書」(2007、2008)に記載された内容を基盤(最先行)技術とした。

その結果、IoT に関しては、著者らも研究を進めてきた人間機械協調システム、経済産業省が進めている Connected Industries、国土交

通省が進めている i-Construction、ICT を活用した人体のウェアラブルセンサなどの分野で先行研究が認められた。また、IoT に関する研究では、本研究で提唱している「モノのインターネット」の「モノ」に人を含める研究が前述した日本鉄鋼連盟の傘下にある企業で IoH または IoX と称してモノの中に人を含める先行研究が認められ、製品化も実施されていた。これに対し、「作業空間内における人と機械の空間状態の把握」及び「作業支援システムの構築」では類似する研究はあるものの、明確な先行研究は認められなかった(第7.1節参照)。

2) 国内外の実態調査では、日本国内の次世代型物流施設1社と安全装置メーカー2社の現地調査、及びドイツとオランダの専門家に対するヒアリング調査を行った。その際、IoT だけでなく、ICT、AI、5G などの技術動向も含めて調査を実施した。

この調査で明らかになったのは、既に日本国内でも IoT を利用して安全衛生管理を行うことが一般的となっていることである。例えば、次世代型物流施設では現場作業員や倉庫内のフォークリフトに IC タグを取り付けて作業の進捗状況などを IoT で把握し、安全管理を行っていた。また、作業員にバイタルセンサや IC タグを着用させ、IoT によって生体情報などを集中管理する熱中症防止用の衛生管理システムの構築も進められていた。さらに、レーザー式のセンサを利用して火災の24時間監視を IoT で行う防災システムも開発されていた。同様に、安全装置メーカーでは、全国にある生産ラインの診断情報を IoT やネットワークを介して収集し、AI によって故障や劣化の診断を予測するシステムを構築していた。このシステムは、将来的には海外の工場と IoT やネットワークを介して情報共有を図ることを目指しているとのことであった。しかし、各国毎の規制の違いや膨大な個人情報の保護などの課題は依然残されているとのことであった。

これに対し、ドイツの専門家は IoT や ICT の安全管理への利用は具体的な規格や規制がないという理由から、機械の安全制御への適用は難しいとの意見であった。この点は「機械災害防止対策の基本は ISO12100 に定める本

質的安全設計方策と安全防護（ガードまたは保護装置）であり、ICT や IoT の安全管理への活用は他に適切な代替手段がないときの次善の策として扱われるべき」とする本研究の参加者と同意見であり、IoT や ICT を活用した安全管理はあくまでも下記 3) に示す支援的なりリスク低減策に限定すべきと考える（第 7.2 節参照）。

- 3) 本研究では、IoT を活用した階層的安全管理システムを「安全情報を利用して機械の運転許可を行う安全確認形インタロックと、IoT を利用して残留リスクに対する危険回避情報を取得して人や機械の危険回避を行う疑似インタロックを階層的に構成したシステム」と定義した。このうち後者は、機械安全国際規格に定められた本質的安全設計方策（ステップ 1）と安全防護（ステップ 2）では除去・低減できない残留リスクを対象に、人の注意力に依存した管理的対策の代替手段として支援的なりリスク低減を図ることを目的とする。

このシステムでは、開発に先行して 階層的安全管理システムの定義、階層的安全管理システムで利用される安全関連情報の基本特性の比較、階層的安全管理システムの構成理論、及び 階層的安全管理システムを対象とした危害の発生確率の定量的評価手法の検討を必要とした。このため、本報告書では、まず第 3 章で階層的安全管理システムの定義を提案した後に、第 4 章では安全確認形インタロックで利用される安全情報と IoT で利用される危険回避情報の基本特性の比較、第 5 章では階層的安全管理システムの構成理論、第 6 章では階層的安全管理システムを対象とした危害の発生確率の定量的評価手法を提案した（第 3～6 章参照）。

- 4) 本研究では、作業空間内における人と機械の識別と存在位置検知を高い信頼性で行う装置として、独自の可視光通信機能を備えた装置（カシオ計算機株式会社製ピカリコ）を選定した。この装置では、人と機械に LED 灯を取り付け、この LED 灯の発行色（赤、緑、青）を 100msec 単位で 24 個の順列として変化させ（したがって 1 種類の情報の送信には 2.4sec が必要）、その変化をカメラで受信することで人と機械の識別と存在位置検知を三次元的に

行う。したがって、この装置は数 10msec 単位の迅速な応答が要求される現場には向かないが、外乱の要因となる太陽光（直流光）との識別も可能であり、かつ死角が生じないように複数のカメラを受信器として配置できれば、人と機械の識別と存在位置検知が可能と考えられる。

実験の結果、本装置の水平方向の測定誤差は欠損率が問題にならないという条件の下で 400mm 程度、垂直方向の測定誤差は 20mm 程度であり、作業者と機械の危険源の接近検知用として十分な精度で三次元計測を行えることが確認できた。ただし、この装置では三次元位置計測の欠損率と測定誤差はトレードオフの関係にあるため、欠損率と測定誤差の両方を満足できるように最適設計を行う必要がある（第 7.3 節参照）。

- 5) 本研究で開発した作業支援システムは、前述の可視光通信装置を利用して人と機械の識別と存在位置検知（三次元位置計測）を行い、その結果を基に作業者と機械の危険源の接近を検知し、警報等で注意を促すシステムである。このシステムは危険回避情報（警報など）の生成を目的としたもので、別途、安全確認形インタロックとの階層化構成を必要とする（第 7.4 節参照）。
- 6) 本研究では、安全装置の有効性を定量的に把握する装置として、多数の安全装置の無効化や故障に関する情報をリアルタイムに把握できる装置の予備試作を行った。この研究は緒に就いたばかりであり、今後は当研究所に設置している作業支援システムを対象に安全装置の有効性評価を可能とするシステムの開発を試みる。その結果を基に、最終的には公衆回線などを使用して、エンドユーザーの社内ネットワークを介さずに安全装置に関する情報を送受信できるシステムを構築し、安全装置のコホート研究を実施したいと考えている（第 7.5 節参照）。
- 7) 本研究では、危険点近接作業で使用する重要な装置として、3 ポジション・イネーブル・スイッチの論理構成と実験的評価を行った。現段階では被験者数が少ないので今後のデータの蓄積が必要であるが、危険事象がいつ発生するか分かっていたら人は迅速に対応でき

る可能性があることや、いつ危険事象が発生するか分からなくても、危険事象の具体的な内容が分かれば反応時間が短くなる可能性があることが推察できた(第7.6節参照)。

8) 本研究では、AI 等に関する労働政策審議会の報告書と IoT システムで利用される情報の基本特性を考察した。その結果、労働政策審議会の報告書では IoT や AI 等の導入による安全性の問題について言及がなく、この点を本研究の課題とする必要がある。

特に、AI 等を利用した自動運転では、「緊急時に AI 等による判断と人による判断のどちらを優先するか」という問題が存在する。また、IoT を利用したシステムでは、センサや制御システムを含めた故障やトラブルによって「危険を誤って安全と判定」することがある。これらの問題に関しては、安全確保に関する責任問題も含めて検討が必要である。

さらに、労働政策審議会の報告書では AI 等に関する技術進歩を肯定的に捉えている。しかし、AI で必要な「機械学習」では、教師である人間が大量の画像データなどを教材にして「これは何々です」と AI システムに教え込む作業が必要である。この作業に要する時間は AI システムの開発に要する時間の 8 割近くを占めると言われており、作業に従事する労働者にとっては大変過酷な単純労働であると言われている。この点は本報告書の範囲外であるが、AI システムを労働現場に導入する際に配慮すべき重要な課題と考えられる(第8.1節参照)。

9) IoT システムで扱う情報の基本特性では、IoT で収集する情報が労働者の健康情報を始めとする個人情報である点を考慮する必要がある。この場合の対策としては、セキュリティ対策などの技術的問題だけでなく、人間の尊厳に関連する倫理的問題(例えば、個人情報の保護やプライバシーの侵害防止など、要するに人間の尊厳の尊重)も含めて社会全体で議論して行くべき課題と考える(第8.2節参照)。

謝辞

本稿は、厚生労働科学研究費「製造現場における IoT を活用した安全管理システムに関する研究」(課題番号 19JA1003)の補助金による成果

を踏まえて作成したものである。本補助金の提供に御尽力頂いた関係各位に深い謝意を表する。

また、本報告書の第4章の作成に御協力頂いた労働安全衛生総合研究所の菅知絵美氏に深い謝意を表する。

さらに、本報告書の第7.3節に記載した実証実験に御協力頂いたカシオ計算機株式会社とホシデン株式会社の関係諸氏、及び一般社団法人日本機械工業連合会の関係者の方々に深い謝意を表する。

参考文献

- 1) 梅崎重夫・濱島京子、IT を活用した安全衛生管理システム構築の手引き、労働安全衛生総合研究所安全資料、JNIOOSH-SD-No.24 (2009) pp.1-89
- 2) <http://e-words.jp/w/loT.html>
- 3) <https://www.techfirm.co.jp/blog/iot-definition>
- 4) 厚生労働省、工作機械等の制御機構のフェールセーフ化に関するガイドライン、基発第464号、平成10年7月28日
- 5) 梅崎重夫・濱島京子・清水尚憲、機械安全で使用する安全情報と労働安全衛生マネジメントシステムで使用する危険回避情報の基本特性の比較、土木学会安全問題研究論文集、Vol.4 (2009) pp.1-6
- 6) 梅崎重夫、「危険」に関する一考察 - 安全作業システムにおける「危険」の概念と制御、計測自動制御学会、第16回システムシンポジウム講演論文集 (1990) pp.173-176
- 7) ISO 12100:2010、機械類の安全性 - 設計の一般原則 - リスクアセスメント及びリスク低減、Safety of machinery -- General principles for design -- Risk assessment and risk reduction
- 8) 清水尚憲・大塚裕・濱島京子・土屋政雄・梅崎重夫・福田隆文・北條理恵子、機械安全 - 支援的保護システム (Supportive protective system, SPS) (統合的生産システム(IMS)におけるSPSのリスク低減効果)、日本機械学会論文集 84(860) (2018)
- 9) 押田勇雄、「エクセルギ」の進め、ブルーバックス (1988) pp.85-135
- 10) 畑村洋太郎、続々・実際の設計、失敗に学ぶ、実際の設計研究会、日刊工業新聞社 (1996)
- 11) 梅崎重夫・清水尚憲、産業機械の労働災害分析、産業安全研究所特別研究報告、NIIS-SRR-No.33 (2006) pp.53-67
- 12) 梅崎重夫・糸川壮一、機械安全に関する欧州

- 規格の現状と国内法規との対応に関する調査、産業安全研究所安全資料、NIIS-SRR-SD.No14 (1996) pp.1-14
- 13) 中央労働災害防止協会編、安全の指標、各年度
- 14) 総務省統計局、労働力調査、<https://www.stat.go.jp/data/roudou/index.html> (令和2年7月17日確認)
- 15) HSE Books, Reducing risks, protecting people, HSE 's decision making process”, R2p2, (2001)
- 16) 豊田寿夫, リスクアセスメントからマネジメントシステムへ - ALARP 達成手法の開発とシステムへの展開, 労働安全衛生研究, Vol.3, No.1, (2009)
- 17) 谷口武俊, リスク意思決定論, 大阪大学出版会, (2008), 105
- 18) 梅崎重夫・濱島京子・清水尚憲・宮川高志、人間機械作業システムにおける危害の発生確率の定量的評価手法の提案 - 英国 HSE が示したリスク管理目標の達成手法に関する考察 - 、労働安全衛生研究、Vol.3、No.1 (2010) pp.27-36
- 19) 杉本旭・蓬原弘一, 安全の原理, 日本機械学会論文集, Vol.56, No.530, C 編, (1990), 2601-2609
- 20) 宮川高志・梅崎重夫・三平律雄, 安全に関する対投資効果の評価指標の提案, 日本機械学会第18回交通・物流部門大会講演論文集, (2009), 207-210
- 21) 梅崎重夫・杉本旭・中村英夫, 産業機械の安全方策に関する基礎的考察 - リスク評価に含まれる不確定性を考慮した安全方策の提案 - , 日本信頼性学会誌, 23-7, (2001), 659-674
- 22) 原子力情報センター編, 原子力発電所に関する確率論的安全評価用の機器故障率の算出 (2001)
- 23) Swain, A. D. & Guttman, H. E., Handbook of human reliability analysis with emphasis on nuclear power plant applications, NUREG/CR-1278 (1983)
- 24) 蓬原弘一・杉本旭, 安全確認形作業システムの論理的考察, 日本機械学会論文集, Vol.56, no.529 (1990) 2378-2385
- 25) 加藤雅一・蓬原弘一, フェールセーフ・ウィンドウコンパレータ/ANDゲートとその応用, 日本信号技法, Vol.15, No.2, (1991), 9-18
- 26) IEC61508-1, Functional safety of electrical/ electronic/ programmable electronic safety-related systems - Part 1: General requirements, (1998)
- 27) ISO13849-1, Safety of machinery-- Safety-related parts of control systems -- Part 1: General principles for design, (2006)
- 28) 中村英夫, IoT時代の新しい安全「Safety 2.0の全貌」、独立行政法人情報処理推進機構、SEC 先端技術入門ゼミ予稿集、<https://www.ipa.go.jp/files/000062789.pdf> (令和2年7月17日確認)
- 29) 梅崎重夫・清水尚憲, 危険点近接作業の災害防止戦略に関する基礎的考察, 日本機械学会論文集, Vol.71, No.711, C 編 (2003), 200-207
- 30) 樋口耕一, “社会調査のための計量テキスト分析 内容分析の軽症と発展を目指して 第二版,” ナカニシヤ出版, p.182, p.185 2020.
- 31) Connected Industries, “製造現場で役立つIoT用語辞典”, キーエンス. <https://www.keyence.co.jp/ss/general/iot-glossary/connected-industries.jsp> (検索日:2020年4月20日)
- 32) i-Construction, 国土交通省. <http://www.mlit.go.jp/tec/i-construction/index.html> (検索日:2020年4月20日)
- 33) 日本機械工業連合会, 「2017,2018,2019年度広大な作業空間における安全管理システム開発部会報告書」(2020-3)(非公開文書)
- 34) 機械災害データベース, 職場の安全サイト, <http://anzeninfo.mhlw.go.jp/anzen/sai/kikaisaigai.html>
- 35) 総務省, 平成29年版 情報通信白書, <https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/h29/pdf/29honpen.pdf>. (確認日:2020年4月20日)
- 36) 情報教育学研究会(IEC)・情報倫理教育研究グループ編, “インターネットの光と影 Ver.3 被害者・加害者にならないための情報倫理入門,” 北大路書房, pp. 6-9, 2008.
- 37) 情報倫理教育研究グループ, “インターネット活用と情報倫理,” 第1章 ネットワーク社会と情報倫理, 1.1情報システム, 1.1.1情報の特性, <http://www.iec-ken.jp/rinri/textbook/chapt1.htm> (2020年4月1日確認).

- 38) 福岡真之介, 松村英寿. データの法律と契約.
pp.3-5, 商事法務(2019).

図表の出典

- 図 2 文献 5) の p.2 の図 1
図 3 文献 5) の p.2 の図 2
図 4 文献 5) の p.2 の図 3
図 5 文献 5) の p.3 の図 4
図 6 文献 5) の p.3 の図 5
図 7 文献 5) の p.4 の図 6
図 9 文献 18) の p.28 の図 1
図 10 文献 18) の p.28 の図 2
図 11 文献 18) の p.28 の図 3
図 12 文献 18) の p.30 の図 4
図 13 文献 18) の p.30 の図 5
図 15 文献 28) の p.3 の図
図 20 文献 33) の p.25 の図 16
図 21 文献 33) の p.28 の図 18
図 22 文献 33) の p.44 の図 25
図 23 文献 33) の p.45 の図 26
図 24 文献 33) の p.45 の図 27
図 25 文献 33) の p.46 の図 28
図 26 文献 33) の p.47 の図 29
図 27 文献 33) の p.48 の図 30
図 28 文献 33) の p.49 の図 31
図 29 文献 33) の p.50 の図 32
図 30 文献 33) の p.50 の図 33
図 31 文献 33) の p.51 の図 34
図 32 文献 33) の p.52 の図 35
図 33 文献 33) の p.52 の図 36
図 34 文献 33) の p.53 の図 37
図 35 文献 33) の p.54 の図 38
図 36 文献 33) の p.57 の写真 20
図 37 文献 33) の p.58 の写真 21
図 38 文献 33) の p.59 の図 41
図 39 文献 33) の p.60 の図 42
図 40 文献 33) の p.61 の図 43

- 表 1 文献 5) の p.2 の表 1
表 2 文献 5) の p.3 の表 2
表 5 文献 18) の p.29 の表 1
表 6 文献 18) の p.32 の表 2
表 14 文献 33) p.41 の表 11
表 15 文献 33) p.42 の表 12
表 16 文献 33) p.43 の表 13
表 17 文献 33) p.44 の表 14
表 18 文献 33) p.46 の表 15
表 19 文献 33) p.47 の表 16
表 20 文献 33) p.49 の表 17
表 21 文献 33) p.59 の表 18