

## 大規模生産システムへの適用を目的とした高機能安全装置の開発に関する研究

Development of the highly functional safety device for an application to an integrated manufacturing system

清水尚憲\*1, 齋藤剛\*2, 濱島京子\*2, 池田博康\*3, 北條理恵子\*2

建設安全研究グループ\*1 機械システム安全研究グループ\*2 新技術安全研究グループ\*3

■SHIMIZU Shoken, SAITO Tsuyoshi, HAMAJIMA Kyoko, IKEDA Hiroyasu, HOJO Rieko

現在、複数の作業者が広大な領域で作業を行う大規模生産システムでは、人の資格と権限の未確認や作業者の作業位置が確認されないことによる災害が発生している。

そのため、産業用ロボットを含む統合生産システムでは、様々な危険源が存在し、その危険源に対するリスクを低減するために2つの原則に沿った次のリスク低減方策が採用されている。

①危険領域の周囲に柵を設置することで作業者の安全を確保している(隔離の原則)。

②作業者が柵の内側に進入する場合に進入口に進入検知センサやインターロック式ドアスイッチ等を設けて、柵の内側に作業者がいないことを条件に柵内の機械を稼働することを許可している(停止の原則)。

今後は、適切なリスクアセスメントの実施を条件として共存・協調作業を行うために安全柵を取り外して全方向からのアクセスを可能にする生産システムも提案されており、保護方策を適用した後に残る残留リスクに対するICT機器を利用したリスク低減方策の開発が求められている。

そこで、本研究ではまず、人・機械・環境の情報を共有して安全制御を行うための原理を提案してモデル化を行うとともに、既存のリスク低減方策に加えて、ICT機器を利用した新たなリスク低減方策として3ステップメソッドにおけるステップ2にICT機器を適用する方法として、無線タグの安全制御への適用を検討する。さらに3ステップメソッド適用後の残留リスクに対してICT機器を適用して人の注意力のみに依存しない支援的保護システムの提案を行う。

### 1 研究の背景

近年、生産現場では、非正規雇用者や短期労働者、外国人労働者の割合が増加する一方で、現場の安全を長年支えてきたベテラン作業者の割合が減少傾向にある。また、1人作業の増加やコミュニケーション不足から、従来のように「人に頼る安全管理対策」には限界が来ている。

特に、単体の機械を複合的に組み合わせた統合生産システム(Integrated Manufacturing System: IMS)を導入した生産現場では、危険点近接作業(作業者が機械の可動部を停止させずに可動部に近接した状態で行う運転

確認、調整、加工、トラブル処理、保守・点検、修理、清掃、除去などの作業)において、経験の少ない作業者による労働災害が依然として高い割合で発生している。

また、近年は安全領域と危険領域を分離する作業形態から、人と機械の共存・協調型作業形態へと変化しており、機械安全の原則である「停止と隔離」だけでは十分なリスク低減ができず、高い残留リスクが残存している。

本研究では、このような現状を踏まえて、人と機械が共存・協調する作業形態である協調安全の安全情報伝達に関する論理的考察を行い、情報通信技術(Information and Communication Technology: ICT)機器(ICT機器)を活用する2つのリスク低減方策についての要件の検討を行った。

また、ステップ2によるリスク低減方策の代替手段としてICT機器を適用する場合を想定して、一般に利用されているBluetoothを用いたスマートタグの安全関連用途への適用可能性について検討を行った。

さらに、スリーステップメソッド適用後に残るリスクに対して、ICT機器を適用した安全管理支援システムを開発し、作業環境におけるリスクポイントの発生可能性

\*1 労働安全衛生総合研究所 建設安全研究グループ

\*2 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

\*3 労働安全衛生総合研究所 新技術安全研究グループ

連絡先: 〒204-0024 東京都清瀬市梅園1-4-6

労働安全衛生総合研究所 建設安全研究グループ

清水尚憲\*1

E-mail: shimizu@s.jniosh.johas.go.jp

の可視化を行った。

## 2 研究の概要

現在、産業現場では、様々な形でICT機器が利用されているが、一部に安全関連部に適用した例などがあり、安全上問題となるものが見受けられる。特に、近年では、隔離と停止の原則だけでは十分リスクが低減できない共存・協調型作業形態においては、人と機械の情報を共有して安全性と生産性を両立する試みも行われている。そこで、本研究では、このような次世代型作業形態におけるリスク低減方策としてICT機器をシステムに導入する2つの方法を提案するとともに、それぞれの要件の明確化を図ることを目的としている。また、これらを検討するに当たり人と機械が共有すべき情報の理論的展開を図る。

以下にリスク低減方策としてICT機器を活用する際の方法を示す。

### ① 生産現場の状況に応じた保護装置制御

安全関連部に利用されている保護装置の代替手段としてICT機器を活用する

### ② 人の安全行動支援

設計・製造時の3ステップメソッドによるリスク低減で残る残留リスクに対して、従来実施している管理対策とともに活用する

①に対しては、現在産業現場で多く利用されているICT機器として、Bluetooth Low Energyを用いたスマートタグ（以下、BLEタグと記す）に対して安全関連部として必要な条件を満たすことができるかについて、JISで規定しているイミュニティ試験及び温湿度サイクル試験を用いて実験的に検証した。

②に対しては、ICT機器を活用した支援的保護システムとして開発した行動モニタリングシステムを用いて、人と機械が同空間で同時間に作業する作業環境におけるリスク（リスクポイントの発生可能性）の可視化を行った。

## 3 研究の成果

### 1) 協調安全の安全情報伝達に関する論理的考察

日本の次世代の産業の姿といわれる Connected Industries では、人・機械・環境の情報が Cyber Physical System (CPS) によって共有されることから、人を機械から隔離せずにすむ協調安全が実現できると言われている。CPS において安全情報がユネイトに伝達されるための条件を得るために、CPS を物理層・データ層・論理層の3つの基本要素から成るものとして簡易的にモデル化し、安全の原理の展開を試みた。この結果、伝達の条件として、データ伝送およびアルゴリズムにおいて危険側の誤りが生じない、層内および層間で時刻同期がとれている、各層の正常性が確認できる、ことを得た。さらに、情報をもつエネルギー制御以外の側面として、セキュリティとプライバシー保護の2点を CPS での安全情報の伝達条件に

加えるべきことを示した。

### 2) Bluetooth を用いたスマートタグの安全関連用途への適用可能性に関する研究

BLE タグの安全関連用途への適用を検証する一環として、 $PFH_b$  (*Probability of dangerous failure per hour*) を低減する方法論とその実現可能性について考察した。具体的には、まず、BLE タグを適用する安全関連用途として「作業者個人を識別し、所有する資格と権限に基づいて機械の作動を許可する」ことを想定し、その上で、 $PFH_b$  を低減する手法として BLE タグを二重化構成とする設計の採用を掲げる。ただし、構成要素の二重化においては共通原因故障に対する方策の導入が不可欠であり、中でも、機器が使用される環境の温度、湿度、電磁妨害といった環境要因で発生する障害が  $PFH_b$  に大きく影響することを示した。この予備的検討に基づき、市販されている3種の BLE タグを対象に、機能安全規格にある要求レベルを参考にして試験基準を定め、電磁妨害に対するイミュニティ試験及び温湿度サイクル試験を実施した。得られた結果から、二重化した BLE タグで達成可能な安全性能を推定し、現状の機械設備で実装されている一般的な安全機能の一部に BLE タグを適用できる可能性について考察した。

### 3) ICT機器を適用した支援的保護システムに関する研究

人と機械が同空間で同時間に作業する企業の現場において、接触事故を削減するため、行動分析学の問題行動の改善・解決のための一手法である「行動課題分析」を用いて現場のリスクの可視化を行った。

本実験で使用したICT機器を適用した支援的保護システム（以下、行動モニタリングシステムと記す）は、機械と作業者との共存を図るため複数のカメラやセンサー同士を連携させることで屋外使用を可能にするシステムである。このシステムにより、異常検知及び通知、予知予測に繋がる解析のための作業者と重機の位置・大きさ・温度データ等の取得が可能となった。主な仕様及び機能は以下となる。

①入力機器：行動モニタリングシステムは入力機器として、可視カメラ、Mobotix社製サーマルカメラ及び3D-LiDAR(3D-Light Detection And Ranging)を組み合わせて使用した。

②データの統合・解析・出力：各機器のデータは、Video Management Software (VMS) を介して統合・解析を行い、結果を出力する。提供する情報は、動画とそれにタグ付けされた行動分析データとなる。

③作業者及び重機の位置を正確に捉えるための技術：行動モニタリングシステムは、センサー動画データを保存・蓄積・管理するVMSを活用したセンサーフュージョンを用いた。この技術により、屋外環境であっても正確な行動分析データ取得を実現する。

研究業績リスト

課題名：大規模生産システムへの適用を目的とした高機能安全装置の開発に関する研究

平成 29 年度 (2017 年)		
1	国内学術集会	<p>清水尚憲(2017)機械の安全とはどのような状態か, 安全工学シンポジウム2017, pp. 80-82.</p> <p>濱島京子, 梅崎重夫, 清水尚憲(2017)産業機械に起因する労働災害に係るリスクと脆弱性. 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. 117, No. 179, pp. 1-4</p> <p>梅崎重夫, 清水尚憲, 濱島京子(2017)食品加工機械を対象とした簡易リスクアセスメント手法の検討~IMTOC 表現による統計的手法を用いた後ろ向き推論の提案~. 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. 117, No. 179, pp. 5-8.</p> <p>土屋政雄, 清水尚憲, 濱島京子, 梅崎重夫, 北條理恵子 (2017) 作業現場における支援的保護システムの有効性検証に関する行動分析学的介入の試み. 日本行動分析学会 第35 回年次大会 発表論文集, p120.</p>
2	国外学術集会	<p>Rieko Hojo,Kyoko Hamajima,Masao Tsuchiya,Shigeo Umezaki,Shoken Shimizu(2017) Risk Reduction effect of the Supportive Protection System(SPS)-Part.2,Asia Pacific Symposium on Safety2017,Program pp19,sp38,pp1-4</p> <p>Shoken Shimizu, Shigeo Umezaki, Kyoko Hamajima, Masao Tsuchiya, Rieko Hojo(2017) Risk reduction effect of the Supportiveprotection System (SPS) - Part1. Asia PacificSymposium on Safety 2017, program pp19,sp39, pp1-6</p> <p>Shigeo Umezaki, Shoken Shimizu, Kyoko Hamajima, Masao Tsuchiya, Rieko Hojo (2017) Risk reduction effect of the Supportiveprotection System (SPS) - Part3. Asia PacificSymposium on Safety 2017, program pp19,sp40, pp1-8</p>
平成 30 年度 (2018 年)		
1	原著論文	<p>清水尚憲, 大塚裕, 濱島京子, 土屋政雄, 梅崎重雄, 福田隆文, 北條理恵子 (2018) 機械安全 - 支援的保護システム (Supportive Protective System (SPS) 統合生産システム (Integrated Manufacturing System (IMS) におけるSPSのリスク低減効果. 機械学会誌論文集, 84巻, p p. 17 - 425</p>
2	国内学術集会	<p>松井克海, 北條理恵子, 伊藤大貴, 濱島京子, 土屋正雄, 梅崎重夫, 大塚 裕, 福田隆文, 高橋 聖, 清水尚憲 (2018) モバイルロボットを導入した統合生産システム現場を仮想した支援的保護システムの有効性検証 -実験現場における検証. 安全工学シンポジウム2018, プログラム, p. 12.</p> <p>北條理恵子, 濱島京子, 梅崎重夫, 大塚 裕, 伊藤大貴, 松井克海, 土屋政雄, 高橋 聖, 福田隆文, 清水尚憲 (2018) 支援的保護システム (Supporting Protective System; SPS) を導入した実験用作業現場でのリスク低減と作業効率に関する有効性の検証. 安全工学シンポジウム2018, プログラム, p. 11.</p> <p>北條理恵子, 濱島京子, 清水尚憲 (2018) 産業現場における行動分析学の適用 -安全行動を強化するしくみ. 安全工学シンポジウム2018, プログラム, p. 11.</p> <p>濱島京子, 清水尚憲, 梅崎重夫, 土屋政雄, 北條理恵子 (2018) IoT時代のIT活用安全管理に関する検討-「ITを活用した新しい安全管理手法」に潜在していた心理学上の問題-. 安全工学シンポジウム2018, プログラム, p. 11.</p> <p>濱島京子, 清水 尚憲, 梅崎 重夫, 土屋 政雄, 北條 理恵子(2018)活用安全管理に関する人の行動の予測と制御行動分析学的手法の適用. 2018年度日本機械学会, プログラム, p. 29.</p> <p>北條 理恵子, 濱島 京子, 梅崎 重夫, 大塚 裕, 伊藤 大貴, 松井 克海, 土屋 政雄, 高橋 聖, 福田 隆文, 清水 尚憲(2018)モバイルロボットを導入した実験用作業現場における作業 者への行動分析学的介入法の有効性検証. 2018年度日本機械学会, プログラム, p. 29</p> <p>清水 尚憲, 大塚 裕, 濱島 京子, 梅崎 重夫, 土屋 政雄, 松井 克海, 福田 隆文, 伊藤 大 貴, 高橋 聖, 北條 理恵子(2018)支援的保護システムを用いた作業者の3次元位置計測に関 する妥当性検証. 2018年度日本機械学会, プログラム, p. 29.</p> <p>北條理恵子, 清水尚憲, 濱島 京子, 梅崎 重夫 (2018) モバイルロボット走行中の製造作業</p>

		環境における支援的保護システム (Safeguarding Supportive System, SSS) の有効性検証 . 日本心理学会, 第82回大会発表論文集, p. 9
3	国外学術集会	<p>Matsui K., Hojo R., Itou H., Hamajima K., Umezaki S., Ohtsuka H., Fukuda T., Takahashi S., Shimizu S. (2018) The Safeguarding Supportive System (SSS) II. Study on the reliability of the Safeguarding Supportive System (SSS) in work site of the Integrated Manufacturing System (IMS) introducing a mobile robot. Proceeding of 9th International Conference on Safety of Industrial Automated Systems, p.37</p> <p>Hamajima K., Shimizu S., Umezaki S., Tsuchiya M., Hojo R.(2018)Safeguarding Supportive System III.The new approach using ICT in IoT ear on safety management from information communication to prediction and control of human behavior, Proceeding of 9th International Conference on Safety of Industrial Automated Systems, p .33.</p> <p>Hojo R., Hamajima K., Umezaki S., Tsuchiya M., Shimizu S.(2018)The Safeguarding Supportive System (SSS) IV. Experimental procedure of behavior analysis to the Safeguarding Supportive System (SSS) as a safety management approach. For appropriate prediction and control of human behavior, Proceeding of 9th International Conference on Safety of Industrial Automated Systems, p.66.</p> <p>R Hojo, K Hamajima, S Umezaki, S Shimizu (2018) Examination of validity of behavioral analytical intervention under the Safeguarding Supportive System (SSS) for Integrated Manufacturing System (IMS). Proceeding of 9th conference of Association for Behavior Analysis, pp.18-20.</p>
<b>令和元年度 (2019年)</b>		
1	国内学術集会	<p>濱島京子(2019)労働安全衛生における ICT/IoT システムの特徴の位置付けの考察, 日本機械学会 2019 年度年次大会講演論文集, S11504</p> <p>清水尚憲, 松井克海, 濱島京子, 梅崎重夫, 福田隆文, 高橋聖, 北條理恵子(2019), 支援的保護システムを用いた作業者の3次元位置計測に関する妥当性における追加検証, 日本機械学会 2019 年度年次大会講演論文集, S11531</p> <p>北條理恵子, 松井克海, 濱島京子, 梅崎重夫, 中村瑞徳, 高橋聖, 清水尚憲(2019), 統合生産システムにおけるリスクアセスメントに活用可能な行動分析額という心理学, 日本機械学会 2019 年度年次大会講演論文集, S11532</p> <p>齋藤剛, 池田博康(2019), 介助者の支援行動を考慮したロボット介護機器のリスク評価手法, 第20回計測自動制御システムインテグレーション部門講演会後援予稿集, pp841-845</p>
2	国外学術集会	<p>Shoken Shimizu, Kyoko Hamajima, Shigeo Umezaki, Mizuho Nakamura and Rieko Hojo(2019) Location Identification of Workers by a Newly established Safeguarding Supportive System(SSS), 6<sup>th</sup> European Conference on Standardization, testing and certification in the field of occupational safety and Health(EuroSHnet2019), pp.4-5.</p> <p>Kaysumi Matui, Rieko Hojo, Shoken Shimizu, Kyoko Hamajima, Shigeo Umezaki, Mizuho Nakamura, Sei Takahashi(2019) Importance of graphical feedback under Safeguarding Supportive System(SSS) for Safety and Protectivity-an approach of the behavioral analysis, 6<sup>th</sup> European Conference on Standardization, testing and certification in the field of occupational safety and Health(EuroSHnet2019), pp.6-7.</p> <p>Rieko Hojo, Kyoko Hamajima, Shigeo Umezaki, Mizuho Nakamura and Shoken Shimizu(2019) Detection of dangerous point and behavioral modification from environmental change by behavior analysis procedure under the a tunnel construction site, 6<sup>th</sup> European Conference on Standardization, testing and certification in the field of occupational safety and Health(EuroSHnet2019), pp.8-9.</p>
<b>令和2年度 (2020年)</b>		
1	原著論文	梅崎重夫, 清水尚憲, 濱島京子, 齋藤剛, 池田博康, 菅知絵美, 北條理恵子 (2021) 機械の労働災害分析結果に関する考察, 労働安全衛生研究, Vol.14, No.2, pp.109-118
2	国内学術講演会	清水尚憲, 北條理恵子. 機械安全におけるダイナミックリスクアセスメントの提案. 日本機械学会 2020 年度年次大会. 2020 年度日本機械学会年次大会 特別企画プログラム,

		<p>W17201 (1), P. 8. On line, 2020年9月14日.</p> <p>北條理恵子, 清水尚憲. ダイナミックリスクアセスメントへの行動分析学の応用. 日本機械学会 2020年度年次大会. 2020年度日本機械学会年次大会 特別企画プログラム, W17201 (2), P. 8. On line, 2020年9月14日.</p> <p>Shoken Shimizu, Kyoko Hamajima, Shigeo Umezaki and Rieko Hojo. Novel Safety Management for Current Industry Revolution-Dynamic Risk Assessment. 安全工学シンポジウム 2020. Online, 2020年7月1日.</p> <p>北條理恵子, Christoph BÖLDLEIN, 是村由佳, 清水尚憲. ダイナミックリスクアセスメントにおける人の行動の定量計測 (座長). 第21回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会. On Line, 2020年12月16日.</p> <p>清水尚憲, 北條理恵子. リスクにおける人の要素について人の資格と権限を考慮したリスクアセスメントの提案. 第21回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会. On Line, 2020年12月16日.</p> <p>北條理恵子, 清水尚憲. 大型モータ製造工場の入退場管理システムに支援的保護システム (SSS) を導入した例. 計測自動制御学会情報部門学術講演会 2020. On Line, 2020年11月16日.</p>
3	国外学術講演会	<p>Rieko Hojo, Christoph Bördlein and Shoken Shimizu. Human Factor for Risk Estimation. the 3rd International Conference on Computational Engineering and Science for Safety and Environmental Problems (COMPSAFE2020), On Line, 2020年12月8-11日</p> <p>Shoken Shimizu, Takahiko Shobu, Naoto Yoshida, Takeo Kiyohara, Christoph Bördlein and Rieko Hojo. Dynamic Risk Assessment to promote collaborative safety among human, Machine, and Environment. Cultuo-Behavior Science Conference 2020 in ABAI, # 15(80), On line, 2020年10月9日.</p> <p>S. Shimizu., K. Hamajima, S. Umezaki and R. Hojo. Experimental trial of three-dimensional location detection of workers using the Safeguarding Supportive System (SSS) at a tunnel construction site. ITA-AITES World Tunnel Congress, WTC2020 and 46th General Assembly. On line, 2020年9月16日.</p>
4	著書・単行本	安全四学 安全・安心・ウェルビーイングな社会の実現に向けて, 向殿政男, 北條理恵子, 清水尚憲 (令和3年10月29日発行)
5	国内規格	レーザー照射処理に関する安全ガイドライン, 清水尚憲他
6	国内規格	JSAA規格 プロテクティブスニーカー, 清水尚憲他
7	国際規格	ISO/TR22053:safety of machinery-Supporting Protective System 支援的保護システム, 清水尚憲, 北條理恵子他
8	国際規格	IEC/MSB Safety in the Future 市場戦略委員会白書, 北條理恵子, 清水尚憲他
9	特許	特開 2020-095617 安全管理支援システム, および制御プログラム, 清水尚憲, 北條理恵子, 濱島京子他