

安全性と生産性を高いレベルで両立させる 協調安全システムの導入事例

福井 秀利^{*1} 藤谷 繁年^{*2} 清水 隆義^{*1}
前田 育男^{*1} 土肥 正男^{*1} 藤田 俊弘^{*3}

A case study of collaborative safety system that achieves both safety and productivity at a high level

Hidetoshi Fukui^{*1}, Shigetoshi Fujitani^{*2}, Takayoshi Shimizu^{*1},
Ikuro Maeda^{*1}, Masao Dohi^{*1} and Toshihiro Fujita^{*3}

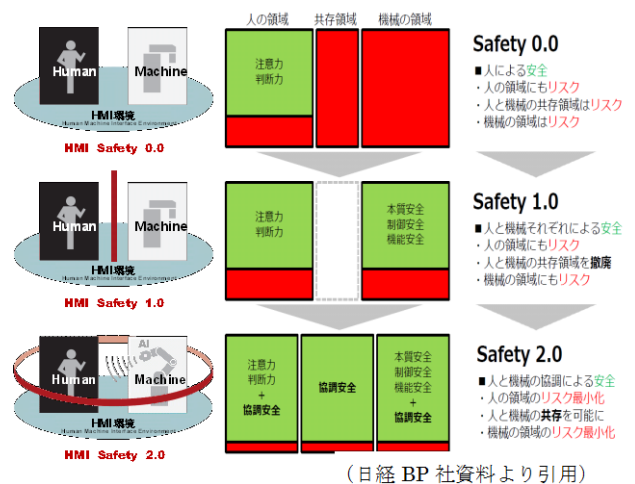
Abstract - In this era where the customers needs are diversifying rapidly, an innovation in production style, by way of human-machine collaboration, is required in order to achieve both flexibility and high productivity. At the production sites where humans and machines collaborate, both the productivity and the safety (be-safe) and also the anshin (feel-safe) of workers must be ensured, and the ICT needs to be employed to leverage the exchange of information between humans and machines and to establish the optimal system. In this research, we report on a case study of a collaborative production system that achieves both a high level of productivity and safety.

Keywords: Safety, Factory Automation, Connected Industries

1. はじめに

わが国は、IoT (Internet of Things)やAI (Artificial Intelligence)、ビッグデータ、クラウドといったICT (Information and Communication Technology)を使って、全ての人とモノがつながり、さまざまな知識や情報が共有化され、今までにない新たな価値を生み出すことで、少子高齢化、地方の過疎化、貧富の格差などのさまざまな社会課題の解決と経済発展を両立するSociety5.0の実現を目指している。また、ものづくり分野においても経済産業省から発信されている”Connected Industries “として、IoT産業を拡大し、ロボット、AIなどの新しい技術を活用し、人と機械が協調する製造現場を構築している。これは第四次産業革命と呼ばれ、関連する技術革新が急速に進んでいる。他方、顧客の要求も多様化しており、ものづくり現場では、多品種少量生産に対応できるフレキシブルでかつ生産性を高いレベルで達成することが求められてきている。それを実現するには、人と機械を自在に入れ替えられるような、段取りを簡単に組みかえられる

現場が必要であり、人と機械が共存し協調するものづくりが求められる。このようなものづくり現場では、これまでの機械安全の考え方に加えて、ICTを活用した新しい安全の考え方が必要となる。本稿では、ものづくり現場の進化に伴い、変革する安全の考え方を紹介し、人と機械が共存する環境において、生産性と安全性を高いレベルで達成するために最適な協調安全の考え方を述べるとともに、協調安全を実現するための技術的手段であるSafety2.0に適合したシステムの実例を紹介する。



*1: IDEC(株)技術戦略本部 技術戦略・知財・国際標準化推進部
*2: IDEC(株)開発本部 次世代コア技術開発部
*3: IDEC(株)常務執行役員 技術戦略本部長 IDECグループ C.T.O.
*1: International Standardization & Safety 2.0 Group, Strategic Technology & Intellectual Property & International Standardization, R&D Strategy HQ, IDEC Corporation
*2: Development Group, Next Generation Core Tech. Department, Research & Development HQ, IDEC Corporation
*3: Senior Executive Officer, Chief Technology Officer, IDEC Corporation, C.T.O. of IDEC Group

図1 Safety2.0 人と機械の協調安全
Fig.1 Safety 2.0 Collaboration Safety Concept



図2 人と機械を情報で繋げることで協調安全を実現

Fig.2 Realization of collaboration safety by connecting human and machine

2. 安全の考え方の変遷

図1に示すように、安全の考え方はものづくり現場の変革とともに変遷してきている。日本古来の考え方は、危険な機械を人が注意して使うことで安全を確保しようとする「Safety0.0」であるが、人は間違えるものであり、機械は壊れるものである。よって、この考え方だけで安全なものづくり現場を実現することは難しい。そのため、ものづくり現場では、機械（危険源）を柵で囲うことで人と機械を隔離し、人が機械に近づく際には機械を停止させるといった「隔離と停止」の原則に基づいた機械の設計により安全を確保する「Safety1.0」の考え方が基本となっている。そのため、機械類の安全に関するさまざまな国際安全規格が存在しており、それらの規格に適合させることでフェールセーフやフルプルーフに配慮された機械が設計できる^[1]。

しかしながら、近年の多品種少量生産に対応したものづくり現場、つまり、フレキシブルで高い生産性を有したものづくり現場を実現するため、機械をできるだけ止めない、人と機械を自在に入れ替えられる、人と機械が協働できるものづくり現場を構築する必要がある。そういった現場で安全性を確保するためには、「隔離と停止」の原則のみならず、新たな安全方策を構築することが必要となってきている。そこで、人と機械が協働する現場での安全を協調安全と定義し、それを実現するための技術的手段として「Safety2.0」という新しい安全の考え方

が日本発としてグローバルに向けて提案されている^{[3] [4] [5] [6] [7]}。

Safety2.0 は、図2に示すとおり人・モノ（機械）・環境が協調して安全を構築するものである。つまり、人の情報により機械を制御し、機械の情報により人に安全な行動を促す。そして、人と機械の環境を、ICT 技術等を用いて最適化する。人の情報としては、例えばセーフティアセッサなどの機械安全に関する資格情報や、保全員/管理者といった役割に関する情報、職務経験にもとづく人の安全に関する力量等の静的情報や、人の位置情報、とっさの反応等の動作情報、操作に関する情報、脈拍や体温等の健康状態などの動的情報があり、このような人の情報を機械に与えることにより機械の速度制御などを最適化することができる^{[8] [9]}。

3. Safety2.0 と協調安全レベル CSL

これらの考え方をもとにした協調安全の水準を Collaboration Safety Level (CSL) と呼称し、図3に示すように、CSL1~4 の4段階のレベルに分け、協調安全の性能水準として、われわれは提案してきた。

CSL1 は最もベーシックなレベルであり、人がセーフティベーシックアセッサ等の資格を有していること（基本的な機械安全に関する知識を有していること）と、人の安心感を確保する観点から作業エリアのどこからでも機械の停止が可能な手段を確保していることの2つの要件を満たすことが求められる。

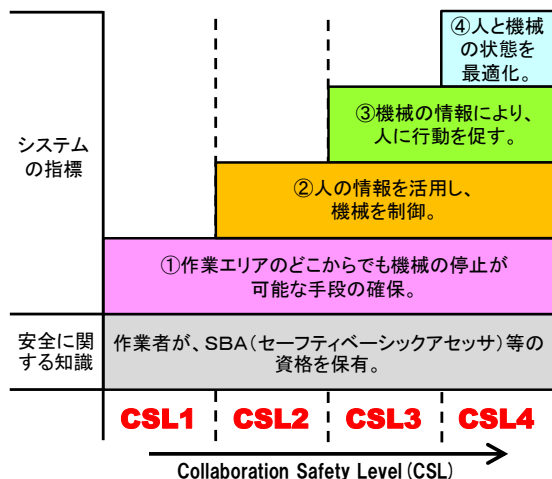


図3 Collaboration Safety Level

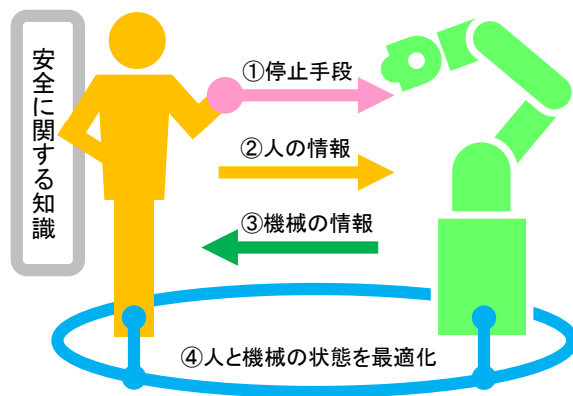
Fig.3 Collaboration Safety Level

CSL2はCSL1の要件に加えて、人の情報を活用し機械を適切に制御することが求められる。

CSL3ではCSL2の要件に加えて、機械の情報を人に伝え、人に適切な行動を促すことが求められる。

CSL4ではCSL3の要件に加えて、人と機械の状態を最適化することが求められる。

われわれが提案するこのCSLのコンセプトは従来の欧米発祥の安全の考え方とは全く異なるが、それを否定するものではなく、補完するものである。つまり、従来安全のレベルを示す指標としては、機械安全で用いられるパフォーマンスレベル(PL)や安全度水準(SIL)が用いられている。これらは機械システムの安全関連部の安全度を危険側故障率等で定めたものである^[2]。そして、ものづくり分野における協調安全レベル(CSL: Collaboration Safety Level)は、上記機械安全で用いられる指標を使い、信頼性のある安全機能により、許容できるリスクレベルまで下がった状態が成り立った状態で、人と機械が共存する環境全体を評価対象としており、追加の安全機能として、人と機械の協調安全レベルを定め



ている^{[10][11][12]}。

4. Safety1.0 から Safety2.0 へ

では、Safety1.0とSafety2.0は、人と機械の関係においてはどのような違いがあるのだろうか。図4は、Safety1.0とSafety2.0の違いを説明した簡易なロボットシステム例である。Safety1.0の環境での安全対策は、隔離と停止の原則に基づき、危険源であるロボットを柵で囲んでいる。そのため、自動運転中に人がアクセスすることができないので、安全を確保するために人の情報をロボットに与える必要はない。これは確実に安全が確保されていることは明白であり、危険源が柵で囲まれていること自体、「ロボットがいつ動き出そうと、どの方向に動き出そうと、どんな速度で動こうと、どこまでアームが到達しようとして、柵内で動いているだけ」ということを意味し、近くにいる人は、ロボットとは空間的に完全に隔離されているという認識を持つので、人の安心感にもつながっている。

他方、人とロボットが協調作業を行うSafety2.0の作業

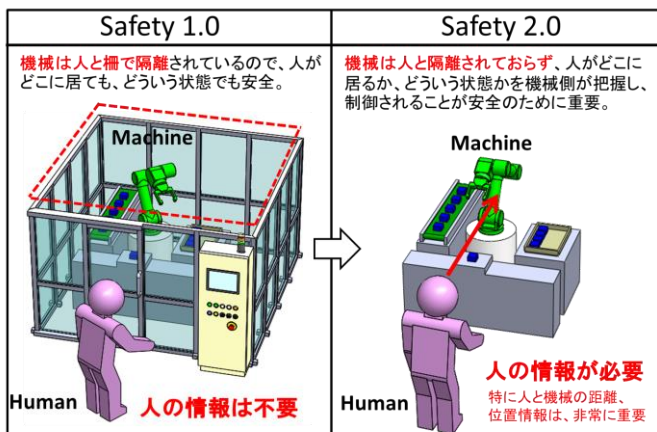


図4 Safety1.0とSafety2.0の違い

Fig.4 Difference Safety1.0 from Safety2.0

“人の情報の活用”は、Safety2.0では、特に重要である。



図5 Safety2.0では人の情報が重要

Fig.5 Important information for Safety2.0

環境では、ロボットと人は隔離されておらず、ロボットが人に危害を加えない動作、つまり安全な動作をすることが最も重要であると考えている。それを実現するためには、図5に示すように、どのような知識、経験、資格を持った人が近くにいるのか、人がどこにいるのか、どのような状態なのかなど、人の情報をロボットに正確に伝えることが非常に重要となる。人とロボットが協働する現場では、ロボットアームなどが人体に接触した場合、ある一定の力が加われば停止するといった機能を備えた協働ロボットと呼称されるロボットを使用することで、リスクを下げるができるが、協働ロボットはあくまで半完成品であり、エンドエフェクタやロボットハンドについては安全性について、協働ロボットの製造者は考慮していないため、SIerなどのロボットシステム設計者は注意が必要である。また、仮に人がロボットに接触してロボットが停止した場合、ロボットが再始動するために、その都度リセット動作が必要となる。また、場合によっては、原点調整などのキャリブレーションをする必要があるなど、協働作業の生産性を著しく低下させる原因となる。

5. 人の情報をセンシング

これまで述べてきたように、安全性を確保しながら、高い生産性を維持するためには、ロボットが必要以上に停止することなく、人との接触を回避することが重要である。そのためには、人の認識情報、位置情報、接近情報および状態をセンシングし、ロボットにリアルタイムかつ正確に情報を伝える必要がある。そういった人の情報を検知するために利用できるセンシングデバイスはさまざまあり、その中で代表的なデバイスを表1に示す。初めに、人やモノの認識を行うには、静脈認証や指紋認証、虹彩認証、顔認証、骨格認証などのさまざまな生体認証機器があり、代表して静脈認証を表1に記載している。他にはIDタグを使用しているデバイスとしてRFIDや近年日本でも使用できるようになった周波数帯域を利用したUWBの技術が挙げられる。これらの認識技術は、人がどのような知識、経験や資格を有しているかなどのデータベース情報と生態情報もしくはID情報を紐付け

て整合することで人の認証もしくはモノの認証が可能となり、このID情報をロボットが取得することで、近づいてきたのが人なのかそれともワークピースのようなモノなのかを認識することができる。またその特性に従って、ロボットの動作速度や停止するまでの距離を含めた制御方法を調整することが可能となる。

次に、人の位置を測定するためには、レーザスキャナや3D LiDAR、UWBによる測位システムが挙げられる。人の位置をリアルタイムに測位することで、人がロボットにぎりぎりまで近づいて協働作業することも可能となり、より高い生産性を維持することができる。人がどこまでロボットに接近できるかは、人が接近しているのか、ワークピースなどのモノが接近してきているのかを認識できるかどうか。他には測位精度、死角、応答速度などのパラメータによって左右される。表1では、ID情報から人か物かを認識しながら物体が近づいたことを比較的精度よくリアルタイムに検出することができるUWBを“◎”とした。

次に、状態監視を行うためには、バイタルデータ、具体的には心拍数や血圧、体温、血中酸素濃度、脈波などのデータを取得することで、健康状態や心理状態、眠気などの情報を得ることが可能である。また、カメラを使用することで、人の状態、例えば転倒した、しゃがみこんだ、うずくまったなどの情報を取得することも可能である。これらの情報をロボットが取得することで、人の状態に合わせて動作速度や停止までの距離を調節することが可能となる。

最後に、人がロボットに当たる直前に接近検知するために、静電容量センサを使用することができる。これは、人とロボットが接触する直前に検知することで、人を検出した場合、ロボットは一時停止して、人が離れると自動的に復帰することができる。つまり、不必要にロボットの動作を止めない制御が可能となり、生産性を高く保つことができる。ただし、静電容量の変化を検知するため、検出体として、人体だけではなく、水や金属などの導体にも反応するため、何が接近したのかは判別することができないので、ロボット自身のアームやワークピースを検出することも想定されるため、取り付け位置や感度の設定にも制約があることには注意が必要である。

表1 センシングデバイスの例

Table1 Sensing devices

種類	静脈認証	RF ID	静電容量	バイタル	レーザスキャナ	3D LiDAR	ビジョンセンサ	UWB
人・物認証	○	○	×	×	△	△	△	○
位置測定	×	△	×	×	○	○	○	◎
状態監視	×	×	×	○	×	×	△	×
接近検知	×	×	○	×	△	△	△	△

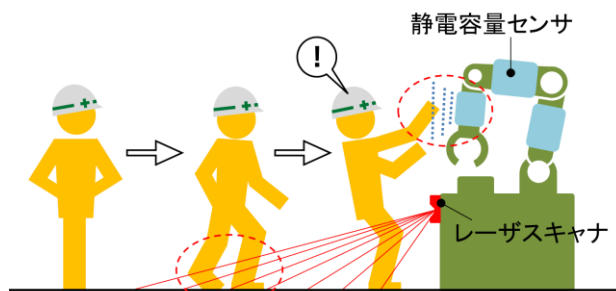


図6 Safety2.0 システム例

Fig.6 Safety2.0 system example

ここまで、さまざまなセンシングデバイスを紹介したが、センシングデバイスは単独で使用するだけでなく、人を認識しながら位置を測定するなど、複合的にセンシングすることで安全性および生産性をより高く保つことができる可能性もあるため、実際のアプリケーションでは、異なる技術を用いた複数のセンシングデバイスを組み合わせて使用することを検討していくことが望まれる。補足として、これらのセンシングデバイスは国際規格で認められた安全機器とは限らないので、機械安全の考え方である Safety1.0 が確立されているものづくり分野においては、リスクアセスメントの結果、許容不可能なリスクに対しては、安全機器を用いてしっかりとリスク低減方策を施した上で、さらなる安全性と生産性の向上への取り組みとして使用するものである。

6. Safety2.0 システムの導入事例

われわれは、こういったセンシングデバイスを使用した Safety2.0 に準拠した生産システムを数多く検討してきた。その中で、図 6 に示すように協働ロボットを使用し、人とロボットが協働する作業が発生する生産システムの例を挙げる^[12]。

このシステムでは、レーザスキャナを使用して、人の侵入を検知し、人がある一定距離に近づいたら、ロボットは低速で動作する協働運転モードとなる。他方、レーザスキャナで設定した特定エリアに人がいなかったら動作速度の速い通常運転を行う。この部分で Safety1.0 としての要件を満たしている。つまり、特定エリア内では、ロボットが低速で動作しているため、協働作業することが可能で、人とロボットが接触したとしても許容可能なリスクとなる。そのように安全が確保された環境で、ロボットと協働している人がロボットアームに接触する直前まで接近したら静電容量センサが人の接近を検知し、ロボットは一時停止もしくは人を回避する動作を行う制御がなされている生産システムで、リセット動作を必要とする安全停止する前に、一時的に停止する制御停止することができるので、再始動がスムーズになり生産性も向上することが期待できる。

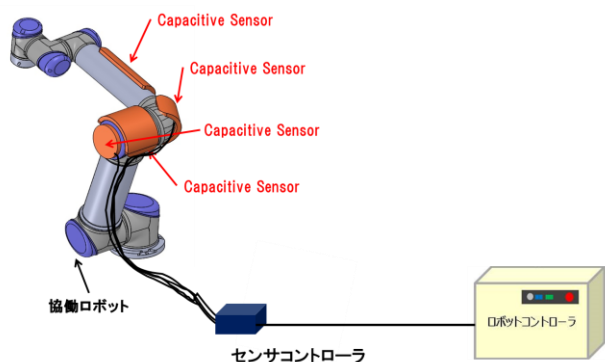


図 7 Safety2.0 システム例の構成図
Fig.7 Configuration of safety2.0 system



図 8 接触トルク測定の様子
Fig.8 State of torque measurement

この生産システムを具現化したシステムとして実際に図 7 に示すシステム構成で協働ロボットを使用した生産システムを構築した。前提条件として、この生産システムはリスクアセスメントを行った結果、許容できないリスクはない、つまり安全であることが確認されている。この生産システムを用いて、静電容量センサの有効性について、さまざまな角度から人が協働ロボットに接近したとき、静電容量センサが実装されている場合と実装されていない場合のロボットの動作を比較するという方法で確認した。結果としては、静電容量センサが実装されていない場合は当然だが 100%人とロボットが接触した後、一定のトルクが発生したところでロボットが停止した。一方、静電容量センサが実装されている場合、約 80%は接触する前に停止し、人が検出位置から離れるとロボットは自動的に復帰した。また、残りの約 20%で人とロボットが接触してから停止した。その接触した事象の中で、図 8 のように協働ロボットに向かって人が接近した場合のような代表的な人の接近を想定し、静電容量センサが実装されている場合と実装されていない場合で、接触トルクの測定を 2 箇所各 5 回行い、平均を求めた結果を表 2 に示す。この結果では、静電容量センサが実装されている場合、実装されていない場合と比べて、接触トルクが平均値で約 20%に抑えられていた。このことから静電容量センサが安全性、生産性の向上に有効であることが確認できた。

最後に以上の結果をまとめると、協働ロボットを使用すれば、人に接触するとある一定の力が加わると停止するが、人は接触することに対する恐怖心を持ち作業に集

表 2 接触トルクの測定結果
Table2 Result of torque measurement

センサなし	1st	2nd	3rd	4th	5th	平均
測定①	58.2	52.1	42.6	52.1	43.5	49.7
測定②	42.7	52.4	59.5	51.3	51.9	51.6
センサあり	1st	2nd	3rd	4th	5th	平均
測定①	16.3	2.7	3.0	5.2	15.0	8.44
測定②	17.4	12.4	9.8	10.0	6.7	11.3

レベル要件	適合基準	証明対象	評価ポイント
レベル3金 レベル1 + レベル2 + 成果	<ul style="list-style-type: none"> ●レベル1とレベル2を達成し、継続的改善が行われている ●不安全事故が撲滅または減少している ●生産性の向上、コスト削減、顧客満足度向上などに貢献している 	<ul style="list-style-type: none"> ●組織 企業または事業部門(発注組織/請負組織) ●サイト 作業現場(工場/建設/道路/介護など) 	<ul style="list-style-type: none"> ●組織 安全マネジメントシステム(最高安全責任者CSOの設置など) ●サイト 作業者と機械設備の継続的な協調安全対策。現場の作業環境保全対策
レベル2銀 レベル1 + 要員/運用面の対策	<ul style="list-style-type: none"> ●レベル1を達成し、継続的改善が行われている ●リスクアセスメント専任者を配置し、活動している ●危険源を特定し、リスクアセスメント(RVA)を実施している ●RVA結果に基づき、現場と経営者に協調安全を指導・提言している 	<ul style="list-style-type: none"> ●要員 作業者・監督者・管理責任者 ●プロセス レベル1を満足したシステムの利用場面全般、または開発/製作場面全般 	<ul style="list-style-type: none"> ●要員 リスクアセスメント専任者としてのコンピテンシー(知識・経験・能力) ●プロセス 作業者と機械設備の継続的な協調安全対策。現場の作業環境保全対策
レベル1銅 仕様面の対策	<ul style="list-style-type: none"> ●ヒト・モノ・環境などの各構成要素を情報(IGT)でつないでいる ●リスク関連情報(危険・安全情報)をモニタリングし、発信している ●(リスク関連情報を受けて)自律的、または他律的な制御により安全側に導いている 	<ul style="list-style-type: none"> ●システム 各種無線・有線制御システム(モニタリング、危険予兆検知、通報、運転制御、傾向管理など) 	<ul style="list-style-type: none"> ●システム ソフトウェア・アプリの脆弱性・堅牢性(サイバー攻撃対策)

(セーフティグローバル推進機構の資料より引用)

図9 Safety2.0 適合基準

Fig.9 Safety 2.0 compliance criteria

中でできない。また、接触すると重大な怪我はしないが、何度も当たると痛いという課題や、前述したとおり、協働ロボットが人に接触して停止すると保護停止になるため、再度動作を開始するためにはリセット動作が必要となり、生産性が落ちるといった課題があった。そのような課題に対して、この生産システムでは、静電容量センサを使用して人の接近情報を検知し、その情報をロボットに伝える。そして、その情報を元にロボットが自律的に動作するよう制御することで上述の課題を解決し、安全性および生産性が向上している。この結果、この生産システムは図9に示すSafety2.0の適合基準レベル1に合致していると言え、実際に、某半導体製造メーカーでは、このシステム構成を利用した生産システムにおいて、Safety2.0の適合審査に合格することができた。^[13]

7. おわりに

人と機械が協働する現場の実現において、人の情報を機械に伝えることは高い安全性を確保するためのみならず高い生産性を達成するために非常に重要である。今後われわれがこれまでに培ってきた知見を元に、位置検出や人・物認証、状態監視、接近検知を行うためのセンシング技術を発展させることによって、止めない安全、協調安全を実現し、高効率で安全・安心な生産システムを構築する。それに加えて、機械の情報を人に知らせて注意喚起を行う機器や環境情報を人や機械に伝えられるようICT技術を発展させる。そのために、協調安全の安全指標であるCSLの考え方をさらに発展させるとともに、数多くのアプリケーションに対して、それぞれのアプリケーションが抱えている課題を解決するためのシステムを考案し、Safety2.0の適合事例を増やしていくことで、ケーススタディを行い、新たな知見を得るとともに、日本発である協調安全やSafety2.0の考え方をグローバルに発展させていく所存である。

8. 参考文献

- [1] ISO 12100(JIS B 9700): 機械類の安全性 - 設計のための一般原則 - リスクアセスメント及びリスク低減(2010).
- [2] ISO 13849-1(JIS B 9705-1): 機械類の安全性 - 制御システムの安全関連部 - 第1部: 設計のための一般原則(2015).
- [3] Safety2.0 プロジェクト: Safety2.0 コンセプト編, 日経BP社(2015).
- [4] Safety2.0 プロジェクト: Safety2.0 具体化編, 日経BP社(2016).
- [5] 向殿政男: IoT時代におけるものづくり安全の動向; 情報通信学会誌, Vol.34, No.1, pp.41-46(2016)
- [6] 藤田俊弘: Safety2.0時代における経営戦略としての安全への取り組みによる企業力の強化, 日経BP Safety2.0 シンポジウム“日本初! 協調安全がもたらす生産現場革命”, 日経BP社(2016)
- [7] 土肥正男: これが Safety2.0 ソリューションだ 安全装置から生産ラインまで、具体例を一挙紹介, 日経BP Safety2.0 シンポジウム“日本初! 協調安全がもたらす生産現場革命”, 日経BP社(2016)
- [8] 藤田俊弘: 新時代の安全の主役は経営者だ: エグゼクティブに求められる安全への理解と取り組み, Safety2.0 国際安全シンポジウム“第4次産業革命時代の安全はこう構築する”, (一社)セーフティグローバル推進機構, 日経BP総合研究所(2017)
- [9] 前田育男: ロボット等を用いたものづくり現場に必要とされる機械安全教育に最適なセーフティアセッサおよびセーフティベーシックアセッサ資格認証制度(SA/SBA)の現状; ロボット, 日本ロボット工業会, No.227, pp.50-55(2015)
- [10] 土肥、岡田、前田、藤谷、藤田: 人-ロボット共存環境における生産性と安全性の向上を高次元で実現する新しい協調安全の考え方と協調安全の水準(CSL)の概念の提案; ロボット, 日本ロボット工業会, No.237, pp.1-6(2017)
- [11] 藤谷、岡田、前田、稲田、土肥、藤田: 人-ロボット共存環境時代における協調安全のためのインターフェースの新しい考え方: ヒューマンインターフェースシンポジウム(2017)
- [12] 福井、藤谷、前田、清水、土肥、藤田: 人-機械共存環境における安全性と生産性の両立を実現する協調安全システム: ヒューマンインターフェースシンポジウム(2018)
- [13] 梶屋俊幸: Safety 2.0 適合審査登録制度開発と国際標準化の道筋; 標準化と品質管理; Vol. 72 No.5, pp.23-30 (2019)