

人ー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

藤谷繁年^{*1} 岡田和也^{*2} 前田育男^{*2}

稲田宏治^{*1} 土肥正男^{*2} 藤田俊弘^{*3}

New Interface concept for collaboration safety in a coexistence environment of human and robots

Shigetoshi Fujitani^{*1}, Kazuya Okada^{*2}, Ikuo Maeda^{*2},

Koji Inada^{*1}, Masao Dohi^{*2}, and Toshihiro Fujita^{*3}

Abstract - The human-robot collaboration is one of the most typical examples of the next-generation manufacturing sites where both flexibility and high productivity need be achieved. At such manufacturing sites, a drastic shift in the concept is required with human-robot interface environment, in order to ensure operator's safety and to win operator's confidence in safety. In this research, we propose a new concept of collaboration safety for establishing the interface environment, where high-level productivity and safety is achieved in the human-robot collaboration. CSL (collaboration safety level), the evaluation index of human-robot collaboration, is also explained.

Keywords: safety, collaboration, level, robot and productivity

1. はじめに

IoT 技術等により様々なものがネットワークでつながり、AI やビッグデータ等を活用し最適化、効率化を実現する第 4 次産業革命時代を迎え、ものづくり現場もまたグローバルに大きく変革している。我が国日本においては、デジタル化の進展やロボット革命に加え、強みである高い「技術力」や高度な「現場力」を活かした、ソリューション志向の新たな産業社会の構築を目指す“Connected Industries”の実現に向け日々変化している。そのような中でより多様化する顧客の要求にタイムリーに対応するためには、人とロボットの協働に代表される、フレキシブルかつ高生産性を実現する次世代のものづくり現場の構築が急務であるが、従来の安全の考え方だけではその実現が難しくなっている。

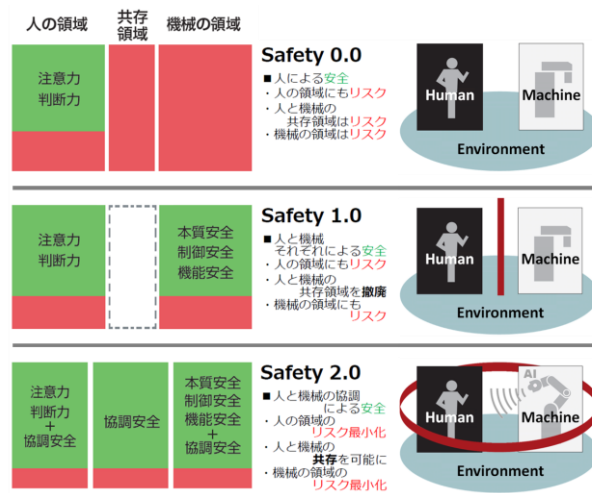
したがって、第 4 次産業革命、ロボット革命、“Connected Industries”を実現するためには、次世代のものづくり現場に対応した新たな安全の考え方を確立し、

人ーロボット共存環境における安全を確保することが不可欠である。

本稿では、ものづくり現場等の進化に伴い、変革する安全の考え方を紹介するとともに、人ーロボット共存環境における生産性と安全性を高次元で実現するインターフェース環境構築のための新しい協調安全の考え方および、その評価指標について世界に先駆けた提案を行う。

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、製造現場の変革とともに変遷してきている。最も原始的な考え方は人の注意力・判断力のみに依存し安全を確保する「Safety 0.0」



(日経BP社のデータを元に作成)

図 1 Safety 2.0 人と機械の協調安全
Fig.1 Safety 2.0 Collaborative Safety Concept.

*1: IDEC(株) 技術戦略本部 技術戦略・知財推進部

*2: IDEC(株) 技術戦略本部 国際標準化・Safety2.0 推進部

*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: Technical Strategy and Intellectual Property Promotion Division, R&D Strategy HQ, IDEC Corporation

*2: International Standardization and Safety 2.0, R&D Strategy HQ, IDEC Corporation Technical Strategy and Intellectual Property Promotion Division, R&D Strategy HQ, IDEC Corporation

*3: Senior Executive Officer, Chief Technology Officer, IDEC Corporation, C.T.O. of IDEC Group

である。しかし、人は間違えるものであるので、「Safety0.0」の考え方だけで安全を確保するのは実際には難しい。そのため、機械システムの設計により安全を確保するという「Safety1.0」の考え方に移行してきた。産業分野においては、機械類の安全性に関するさまざまな ISO 規格や IEC 規格などの国際安全規格が存在しており、機械をそれらの規格の要求事項に適合させることで、フェールセーフやフールプルーフに配慮された機械が設計できるようになっている。例えば、機械が動く範囲、人の働く範囲をあらかじめ定め、それにしたがって柵やインターロック装置を使用することによって、機械が動いているときには危険な柵内には入らない、機械が停止して初めて柵内に入ることができるというシステムによって安全を確保するという考え方である。すなわち、機械安全の原則とされる「隔離と停止」により安全を確保するのが「Safety1.0」の考え方である。

しかしながら、最近、よりフレキシブルで高生産性を実現するためには機械をできるだけ止めず、機械の動く範囲と人の作業範囲を接近、さらにはそれらが重なる「協働エリア」を設ける協働作業が求められるようになってきており、従来の「隔離と停止」の原則だけでは安全を確保するのが難しくなっている。

3. Safety2.0 とは

協働ロボット自体については ISO などで既に議論されているが、安全性を確保しながら、生産性のさらなる向上を可能とするためには、人-ロボット協調安全を高次元で実現する新しい安全「Safety2.0」の考え方が必要となる。人・モノ・環境が協調して構築される、この新しい安全の考え方「Safety2.0」は、急速に普及しつつある協働ロボットを用いたシステム構築（協調安全）に不可欠なコンセプトである。

ここで、Safety0.0～Safety2.0 の安全の考え方についてロボットなどの危険源をライオンに例え、それぞれの段階でのリスクや安全構築の考え方のイメージを図 2 に示し解説する。ライオンだけが単独で存在している状態では、危険源は存在するが人は存在しないため、この状態

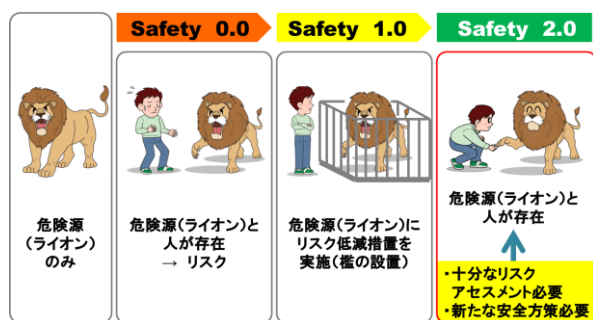


図 2 リスクや安全構築の考え方 (ライオンモデル)

Fig.2 Concept metaphor of risk and safety establishment. (Lion model)

が続く限り人が危害を受ける可能性は無く、安全について考慮する必要はない。危険源と人が存在して初めてリスクが生じるため、安全について考慮する必要が生じる。最も原始的な安全の考え方 Safety0.0 は、人の注意のみで何とか危害を受けないように努力するという考え方である。リスクが十分小さい場合 (例えば子猫) であれば許容できるかもしれないが、ライオンに対し、人の注意だけで安全を確保しようとするのはあまりにも危険すぎる。

そこで次の段階の安全の考え方が、ライオンを檻に入れて人と隔離するという Safety1.0 の考え方である。

Safety2.0 は、ライオンを十分に訓練し賢くし、人のライオンを扱う能力を十分高めることで檻が無くても安全が確保できるようにしようという安全の考え方である。なお、Safety1.0 の考え方で、人とライオンは隔離できるので全くリスクが無くなったように見えるが、そうではない。餌をあげたり、体を洗ったり、檻の中を掃除したりなど、実際にはライオンと人を完全に接近しないようにすることは非常に困難である。また、これらの作業を檻が設置された状態で行うのは現実的ではない。そういう意味でも Safety2.0 の考え方の出現は必然ともいえる。

例えば、医薬品、化粧品、食品の三品産業等のものづくり分野や介護・サービス分野等においても、人と機械を隔離できない環境、いわゆる人と機械 (ロボット) の共存環境が存在するため、従来の Safety1.0 の考え方が適用できない場合がある。このような環境において安全を構築するためには Safety2.0 の考え方に基づく、協調安全が必要となる。

4. Safety2.0 のインターフェース環境で重要なこと

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 3 は、安全と安心の観点から見た Safety1.0 と Safety2.0 の違いを説明したものである。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等を柵で囲むという方法が一般的であった。これは、技術的

	Safety 1.0 (停止と隔離による安全)	Safety 2.0 (協調安全)
作業環境	安全だと理解しているし、見た目も安心。 	安全だとは理解しているが... 協働ロボットだから、接触したら停止するはず... 次はどう動くのだろう? どこまでアームが動くのだろう? 安心できない...
安全の観点	危険源を物理的に隔離 (柵)。	協働ロボットは接触停止等の機能を備える。
安心の観点	物理的な柵は、作業者に安心感も与える。	Safety2.0 は、作業者の安心感を何で補うかが大きな課題。

図 3 安全と安心の観点から見た Safety1.0 と Safety2.0 の違い

Fig.3 Safety 1.0 and Safety 2.0 from the perspective of safety and operator's confidence in safety.

に安全を確保していることはもちろんであるが、危険源が柵で囲まれていること自体が、「ロボットがいつ動き出そうと、どの方向に動きだそうと、どこまでアームが到達しようと、柵内のことであり、自分自身とロボットが隔離されている。」という、作業者の安心感につながっていたことを忘れてはならない。

一方、人とロボットが協調作業を行う Safety2.0 の作業現場はどうだろうか。協調作業には「協働ロボット」と呼ばれる、例えば人体に接触すれば停止するといった機能を備えたロボットを使用するが、作業者が生身でロボットと相対する場合、いくら技術的に安全だと頭で理解していたとしても、ロボットの動作範囲に足を踏み入れるとなると、躊躇するのではないだろうか。ロボットは人間と異なり、掛け声や目配せ、予備動作等が全くなく、動くタイミングや方向、どの距離まで動くのか等が予測できない。この不確定要素が作業者の不安になり、協働作業の生産性を低下させる原因となる。また、ロボットが、人と接触すれば停止する機能を備えたとしても、接触すれば痛かったり、驚いたり、作業も中断するので、作業者にとって大きなストレスにもなるし、生産性も低下する。特に、人の代わりにロボットを導入する現場では、機械に馴染みのない人も多く働いており、今後、このような環境がさらに増えることを考えると、技術的に安全というだけでなく、安心の確保が不可欠であり、大きな課題となる。

5. 協調安全の評価水準について

これらの課題を解決し、安全で安心な協調安全環境を構築すること、またそれを世の中に広く普及させるためには達成すべき水準が必要となる。これまでの Safety1.0 では安全性を表す水準として代表的なものにパフォーマンスレベル (PL) があるが、これは機械システムの安全関連部の性能水準であり、人に関するパラメータは含まれていない。なぜなら、Safety1.0 においては人と機械は隔離されているため、単に機械システムの安全性能のみを考慮すればよかったからである。

しかし、人と機械が共存する環境においては人のパラメータを考慮することが不可欠であり、従来とは異なる全く新しい安全水準が必要である。図 4 に示すように、Safety2.0 では人・モノ（機械）・環境が協調して安全を構築している。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行動を促す。そして、人と機械の環境を IoT 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等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、職務経験等にもとづく作業者の安全に関する力量等の静的情報や、作業者の位置情報等の動的情報、脈拍や体温等の健康状態についての情報、とっさの反応等の動作情報、操作に関する情報等があり、これらの情報を機械に与えることにより機械の速度制御等を最適化することができる。

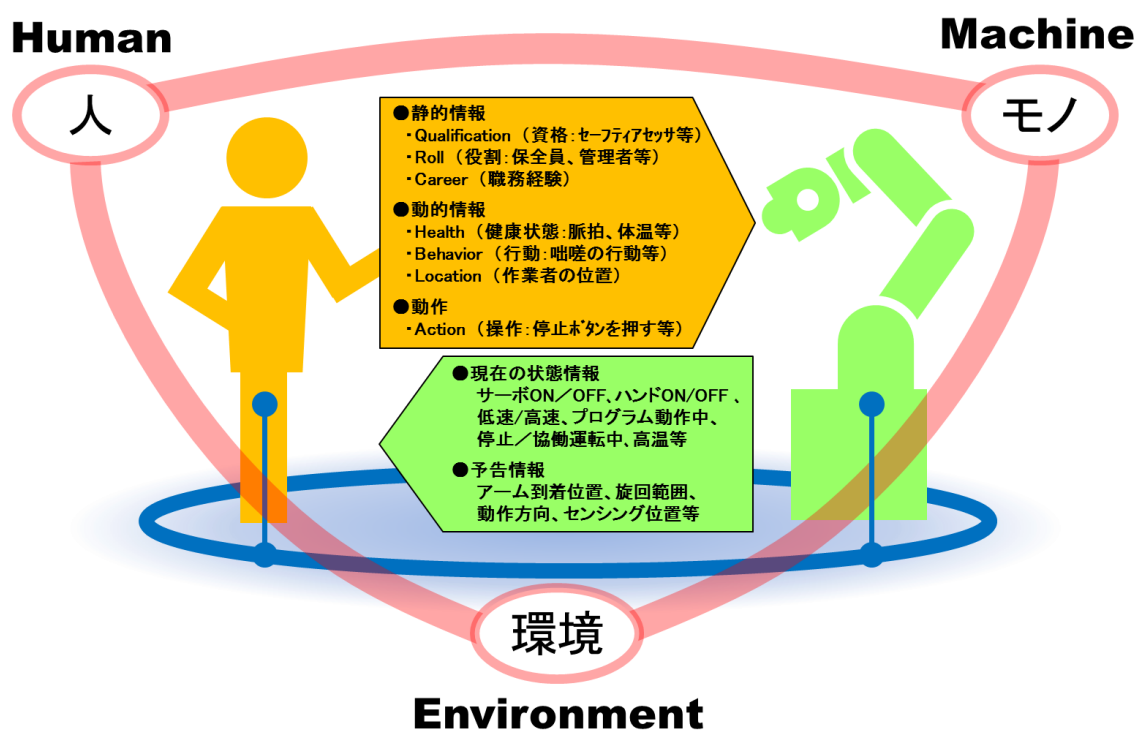


図4 人と機械と環境を情報で繋ぐことで協調安全を実現
Fig.4 Realization of collaboration safety by connecting human and machine

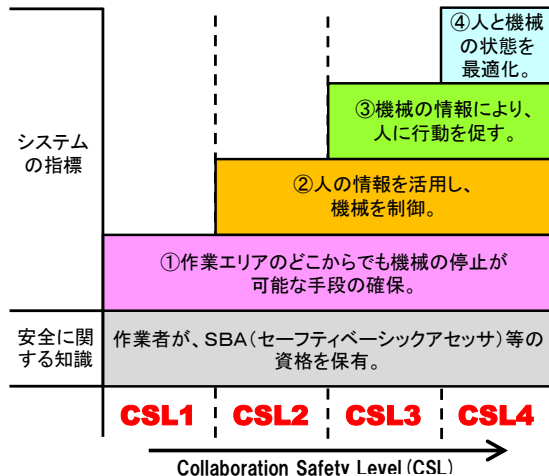


図5 Collaboration Safety Level (CSL)
Fig.5 Collaboration Safety Level (CSL).

6. 協調安全レベルの提案

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5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提案する。

CSL1は最もベーシックなレベルであり、作業者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。

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。

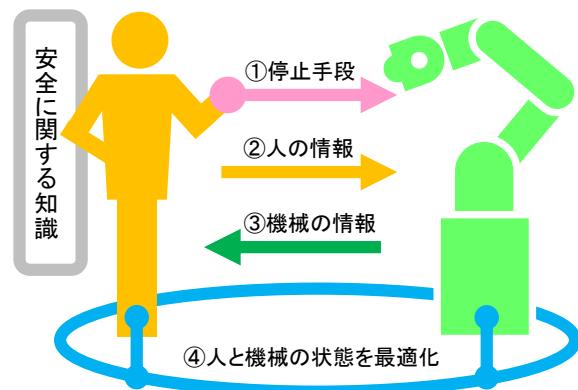
CSL3ではCSL2の要件に加えて、機械の情報を人に伝え、人に適切な行動を促すことが求められる。

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。

この我々が提案する 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。図6に示すように、従来安全のレベルを示す指標としては、前述したパフォーマンスレベル (PL) や安全度水準 (SIL) が用いられて

	PL / SIL (Performance Level / Safety Integrity Level)	CSL (Collaboration Safety Level)
基本概念	Safety 1.0	Safety 2.0
評価対象	機械システム 	人と機械の共存環境
指標の目的	機械システムの安全関連の安全度を危険側故障率等で定める	人と機械の協調安全性を定める
レベル分類	PL: a, b, c, d, e SIL: 1, 2, 3	CSL: 1, 2, 3, 4

図6 PL/SILとCSLの比較
Fig.6 Comparison between PL/SIL and CSL



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。一方、協調安全レベル (CSL : Collaboration Safety Level) は、人と機械が共存する環境全体を評価対象としており、人と機械の協調安全性を定めている。

7. 協調安全レベル適用の具体例

図7に、高度な協調作業の一つとして“もちつき”を例にあげて、協調安全レベルを説明したい。”もちつき”は、人と人が阿吽の呼吸で、もちを作るために「杵でつく」「こねる」という作業を交互に行うものであるが、熟練者同士の”もちつき”では、作業速度が極めて早い例もあり、協調と作業効率向上の観点から、作業を人同士から、人とロボットに置き換えた場合の比較としては最適であると考ええる。

まず大前提として、作業者はもちつきについての基本的な動作や手順等を学ばなければならない。人とロボットの場合も同じく、作業の内容、ロボットの取り扱いや注意点等を学ぶ必要があり、セーフティベーシックアセッサ等の資格を有している（基本的な機械安全に関する知識を有している）ことが必要である。また、危ないと感じた場合は、すぐに作業を中止する必要がある。

	もちつき(人-人 協調の場合)	もちつき(人-機械 協調の場合)
作業環境のイメージ		
協調内容	① 「こね手」は、トラブル発生時に声で停止指示。 ② 「つき手」は、「こね手」の熟練度により動作速度を変更。 ③ 「こね手」は、「つき手」の視線、掛け声、姿勢等で、次の動作やタイミングを判断。 ④ 第3者が、「つき手」「こね手」の状態等を見て、疲れ等を判断し休憩や交代等を促す。	① 「こね手」は、トラブル発生時に停止スイッチによりロボットに停止指示。 ② 「つき手」ロボットは、「こね手」の熟練度により動作速度を変更。 ③ 「こね手」は、表示灯や、ブザー等で、次の動作やタイミングを判断。 ④ カメラやバイタルデータ等で状態を監視、速度等の指示や休憩を促す。
		CSL1 CSL2 CSL3 CSL4

図7 “もちつき”におけるCSL各レベルの条件
Fig.7 Conditions of each level of CSL in "rice cake pounding"

人は、「ちょっと待て！」等、声で相手に伝えたりすることができるが、人とロボットの場合は、即座にロボットを停止させる手段を常備していることが重要になる。具体的には、作業者が常に手の届く範囲に停止スイッチがあることが必要であり、この2つの条件を満たすことを最もベーシックなCSL1とする。

CSL2では、CSL1の条件に加えて人の情報の活用を条件としている。「もちつき」では、杵を持った「つき手」は、「こね手」の熟練度や動作状態をよく確認して作業を行っている。「つき手」がロボットの場合、「こね手」が初心者であれば、「こね手」の動作情報をロボットが活用して、「こね手」に合った速度で動作するといったことになる。

CSL3では、CSL2の条件に加えてロボット側の情報伝達を条件としている。前述したように人は、何か動作を行う際に、掛け声や目配せ、予備動作、姿勢などでも動作予測は可能であるが、ロボットは、いつ動き出すのか、どの方向に動くのか、どこまでアームが到達するのかがわからない。これらの情報を視覚や聴覚情報などで人側に伝達するために、例えば図7に示すように表示灯やブザーを設置し、作業者に適切な行動を促すことを条件としている。

CSL4では、CSL3の条件に加え、作業者とロボットの状態を最適化することを条件としている。“もちつき”では、それを周囲で見ている第三者が、2人の作業の様子を観察して、2人が気づかない異常、例えば死角から人が接近していることや、道具等の異常、疲労状態等を見て交代を促したりするようなことであり、人ーロボットの場合も同様に、作業者とロボットの共存環境をネットワーク等により監視することを条件としている。

8. 協調安全レベル（CSL）と作業効率

図8は、これまで説明した「もちつき」で人と機械の動作をCSL別のタイミングチャートとして表したものである。CSL1の場合、作業者は資格と停止手段を持っているが、ロボットは一定周期の動作を行うだけである。それに対して作業者は、自分の感覚を頼りにしながら作業を行うため、人の動作や時間間隔のばらつきも考慮して、ロボットは遅い作業速度になってしまう。また、自分の感覚に頼るため、タイミングを間違えて、ロボットに接触、停止（チョコ停）させてしまう場合もある。

CSL2の場合、ロボットが人の情報を活用することで、人の作業の後、最短時間で動作を行うことができるので、同じ時間内に多くもちをつくことができる。

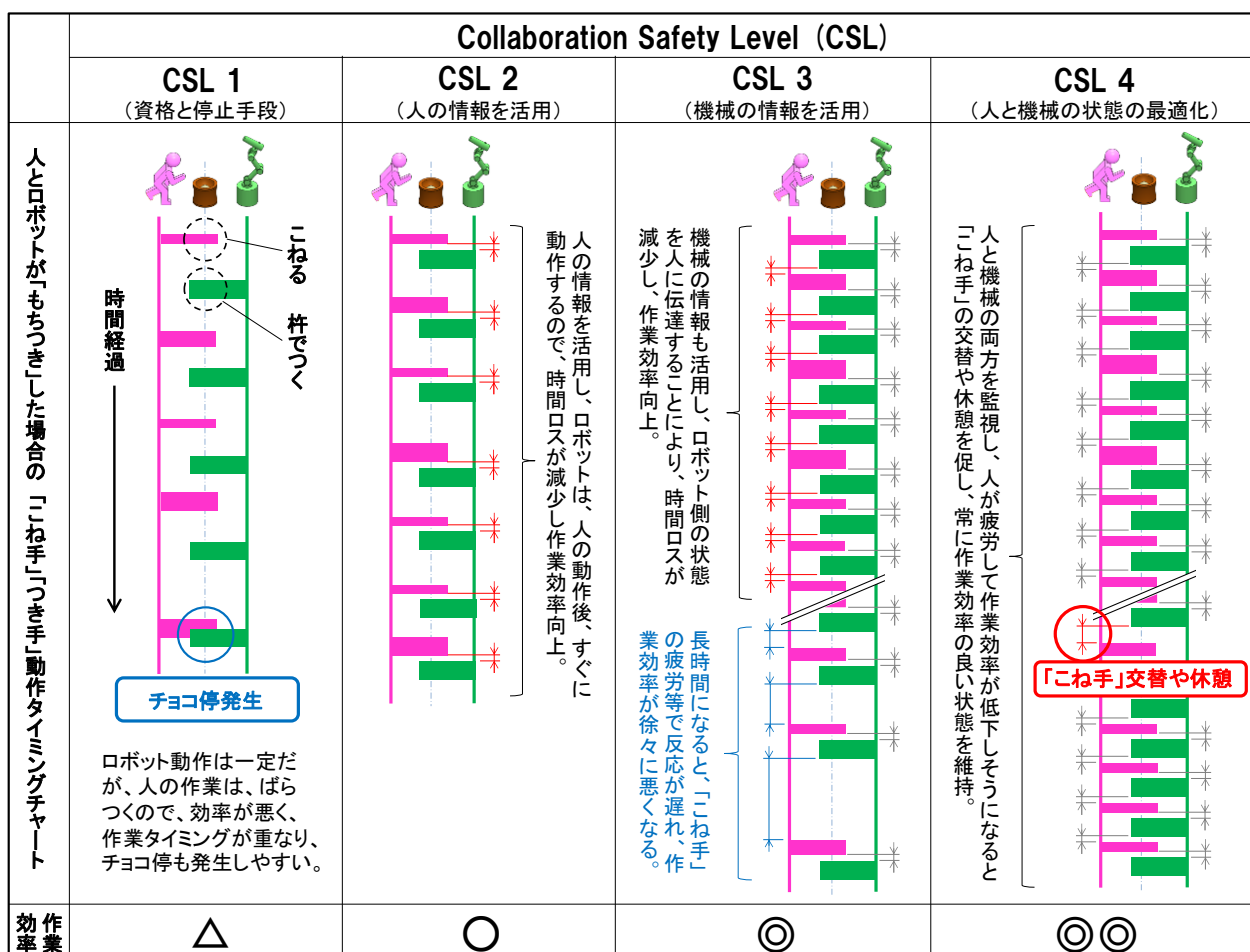


図8 “もちつき”における CSL各レベルと作業効率
Fig.8 Productivity of each level of CSL in "rice cake pounding "

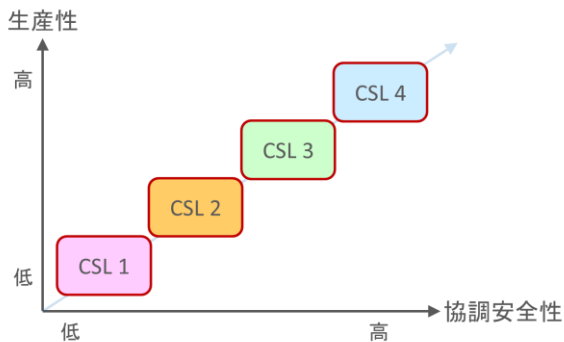


図9 CSLと協調安全性および生産性
Fig.9 CSL, collaboration safety, and productivity

CSL 3の場合、作業者は機械側からの情報伝達を活用するため、恐れることなく、動作を行うことができるため、同じ時間内でのもちつき回数はCSL 2よりもさらに高くなる。

CSL 4の場合、人の反応速度が低下してくれば、人と機械の状態を最適化するために作業者の交代を行うことにより、もちつき回数が多い状態を長時間安定的に維持できるので作業効率はさらに高くなる。

従って、CSLは図9に示すように、協調安全としての安心な作業環境の評価水準であるとともに、作業効率の評価水準としての役割も期待できる。

9. おわりに

協調安全、Safety2.0の考え方により、人と機械のインターフェース環境は今まさに劇的に変化しようとしている。この変化に対応し、安全、安心な作業現場構築を実現するためには、その目標や評価基準として今回提案したCSLの指標は必要不可欠である。また、これまで説明したように、CSLの指標は、人と機械と環境がIoT技術などを活用してリアルタイムに協調することで、高生産性と安全性が高次元で両立することが可能であり、第4次産業革命、さらに我が国における“ロボット革命”、“Connected Industries”実現のための画期的なコンセプトである。

また、この実現のためには、人と機械のインターフェースとして、従来の安全機器や制御機器に加え、Safety2.0のコンセプトに沿った適切な水準を満たした新たなシステムや機器等も必要となる。

今後、より詳細に日本発の協調安全の評価水準であるCSLの考え方をテストケースとして開発・提案し、ケーススタディすることで概念を具現化し確立していく所存である。また、そうすることで従来欧州が主導していたSafety1.0に基づく国際安全規格を、Safety2.0では日本が主導できるようになると考える。

10. 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(JISB9705-1): 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] 向殿政男: ロボットの安全技術の概要と最新動向; ロボット, 日本ロボット工業会, No.211, pp.1-7, (2013)
- [7] 土肥正男: 多品種変量生産で先駆けたロボット制御セル生産システムと Industry4.0 を凌駕する新しい考え方 (特集 ロボットを活用した生産システム設計のポイント) -- (ロボットセルの現状と課題); 機械設計 = Machine design No.60(14), 日刊工業新聞社, pp.14-19(2016)
- [8] 藤田俊弘: Safety 2.0 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 Safety 2.0 シンポジウム"日本発! 協調安全がもたらす生産現場革命"; 日経BP社 (2016)
- [9] 土肥正男: これが Safety 2.0 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 Safety 2.0 シンポジウム"日本発! 協調安全がもたらす生産現場革命", 日経BP社 (2016)
- [10] 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, Safety 2.0 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)
- [11] Toshihiro Fujita: Safety concept and personnel competency certification program essentially required for implementation of human - robot collaboration safety; the 11th IEC ACOS Workshop "Safety considerations for next generation industrial automation" (2017)
- [12] 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パーシ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)
- [13] 土肥, 岡田, 前田, 藤谷, 藤田: 人-ロボットの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)