

安全技術のフレームワーク

加部 隆史 (NPO 安全工学研究所)

安全は誰もが望むものであり、基本的人権から出発している。機械安全においては安全を技術で達成する事が前提条件となっている。安全の技術がどのように変遷し、技術的側面・人的側面・組織的側面からの考察を踏まえ、安全に関し現在不確定な点及び今後のあり方を提案したい。

1. 安全技術の現状 (state of the art)

1.1. 技術的側面

機械安全の規格体系は段階的に 1990 年前後から着々と整備されてきており、近年富に制御を中心としてシステム安全の観点からさらに拡充を続けている。現状の安全技術は、以下に示す国際規格の段階的発展に基づいている。

第一段階：製造現場での自動化が日進月歩で進化し、労働災害の形態もそれに伴い変化した事により、1990 年前後に欧州では機械の危険源の見積・評価 (リスクアセスメント) 及びリスク低減を定め、機械の本質安全設計を主体とした**一般設計原則** ISO1200 の基となる EN292 が成立した。実証済みのリスクアセスメントの方法論は ISO14121(当時 EN1050)により定められ国際的に認知されるに至っている。

国内では確定論に基づく安全確認型の考え方を論理式で示す「安全の原理」(1)が時を同じくして発表され、機械の危険源であるエネルギーを安全が確認された状態で初めて投入する或いは危険な状態になった際にエネルギーが遮断されるという「止まる安全」の考え方が紹介された。

第二段階：当初は、マイクロコンピュータを機械の安全制御に使用することは一般的ではなかったが、その後の急速な電子通信技術の進化により、製造現場で、かつ安全関連信号にもコンピュータを使用することが必要不可欠となってきた。機能安全規格 IEC61508 は 1998 年に制定され、電気・電子・プログラマブルコンピュータの安全性を、従来の確定的要素に信頼性の概念を取り入れリスクを定量的に評価する確率的手法も考慮したアンブレラ規格としての影響力を有している。これによりアクチュエータに関連するセンサ信号を安全バスシステムにより通信する事が可能となった。

さらに 1980 年代初頭に登場した AC サーボモータとそれに伴う機械分野での適用範囲の拡大により、1990 年代後半から、安全な減速、静止、停止、不意な起動防止等の安全機能を具備した**安全ドライブシステム** (IEC61800-5-2 ドラフト段階) が開発され、まずは従来の確定的な考えで出発し最近では機能安全の概念をこれに場合により適用するようになっている (図 1 参照)。先駆けはドイツにおけるオフセット輪転機の安全なシャフトレス制御

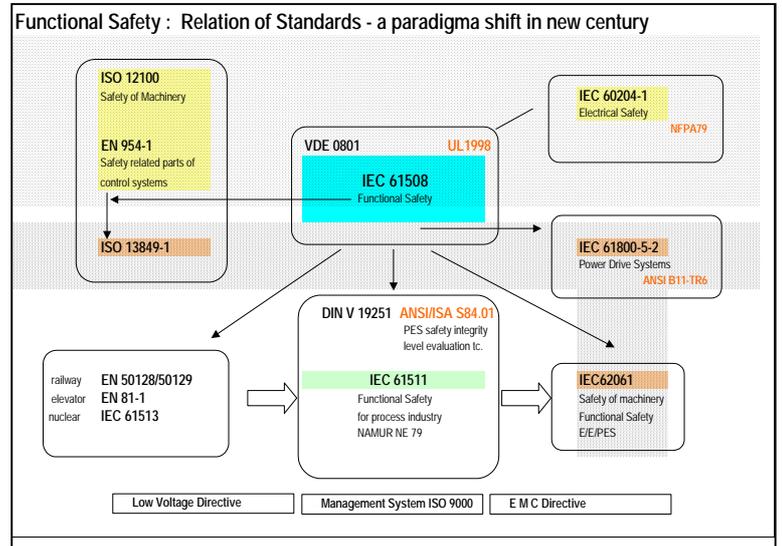


図 1 . 機能安全規格相関関係

である。具体的には、センサ (例えばエンコーダ) の信号を異種冗長性のコントローラにより監視し、指令値とフィードバック値の誤差に応じた判断でパルスをブロックする事によりエネルギー遮断をする (BGIA:図 2 参照)。ここでは、従来一台のモータで機械のカムを用いエネルギー伝達していたものを、各軸を AC サーボモータで同期することにより、制御特性が一段と向上したが、同時に安全関連信号の伝達容量が大幅に増加した為に、信号の通信手段としてバスシステムが適用されている。

第三段階：上述の第一及び第二段階は機械そのものに具備する安全技術の発展を傍観した。しかしながら、実際に重大事故が発生する要因としては、機械そのものの安全性の欠如 (本来これは欠陥) 以外に、人が機械に介入する使用上の問題があり、ここで実際多くの事故が発生している。

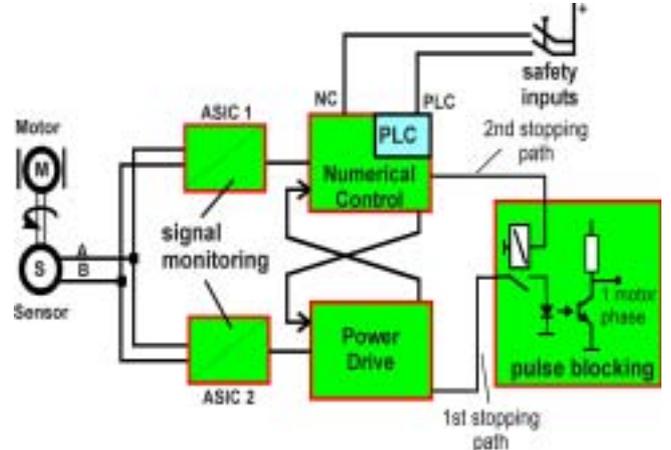


図 2 . 安全ドライブシステム source:BGIA

1.2. 作業員（人的側面）

そこで次に、既存の安全技術を適用した際の作業員の機械への介入状況を傍観してみる。

危険な機械と人が同一作業場で同一時間内に同居し、危険状態が育成されて事故は初めて発生する。これらの事故は自動運転中でなく非定常時での労働災害の発生率がとりわけ高い。産業安全研究所の調査によれば、死亡労働災害約 130 件の分析結果では、少なくとも 3 割以上はこれら危険点近接作業によるものと推察されている(2)。

さらなる問題点として、製造現場で当初の一般設計原則に基づく安全な機械を導入しても、生産性を損なわない為に、或いは作業時間を短縮する為にどうしても安全装置を無効化するという現象が現場では後をたたない。しかるに、機械設計者が安全性を確保しても、使用者側で使い勝手安全な機械にいたずらをするという現象が多々発生するという問題がある。

欧州の場合、1989 年のニューアプローチ関連指令の発令と共に、機械安全が有効に機能する社会システムを一丸となって構築してきた。最近のドイツ職業保険組合中央研究所（BGIA）の 2 年間に亘る調査研究報告書(3)でも、製造現場でおよそ 37% の機械が恒常的或いはまれに無効化されるという事と、安全上の事業者責任に加え欧州機械指令により製造者責任が法的に義務付けられており、無効化という行為は法律違反にも該当するにも係わらず、敢えてアンケート対象となった事業者の 3 割がその事実を受容しているという実態が明らかにされた。

日本と似た機械産業構造と製造現場を有した安全先進国ドイツでのこの調査結果は、日本で機械安全の概念が今後定着した後でも同様に発生する可能性を示唆している。無効化の要因として不具合が発生した製造ラインを安全装置などにより停止する事が設備にとって大切な稼働率を、しいては生産性を著しく低下させる事と、非定常時の作業においてローラの清掃作業時等どうしてもエネルギー遮断を行うと作業不可能となってしまうという事等があげられる。使いにくさの観点から人間工学的設計配慮が不十分な為に無効化する事も大きく取り上げられている。

人が機械に介入し危険状態を育成する理由としては主に以下の事が考えられる；

- 機械設置、試運転
- 機械の段取り
- 機械の保守点検
- 安全装置の無効化
- 工程上の加工物の不具合発生
- 工程上への異物混入
- 加工品搬送時での荷崩れ
- 防護柵から機械のある危険区域への侵入

安全確認型を初め既存の安全技術を適用して現場での安全を確保しようとしても特定の状況下で発生する不確定な状況がある。つまり安全な機械が現場に提供されても人がどうしても機械運転時に介入せざるを得ない状況下、特に非定常運転時での人が機械に介入する事や生産効率を迫及するが為の無理な危険行為などにより発生する事故

の要因・状況が挙げられ、筆者はこれを undefined factor(UDF：不確定な危険要素)

と呼称し、これらの災害要因調査・分析評価・危険源と危険事象の特定・分類化の上、解決の為の演繹的方法論がこれから必要であると考え。これは、残留リスクをどうするかという問題とも密接に関連している。この要因及びそれに伴う結果の解明は世界的にも未だ詳細に行われていない。ここでは、例えば特に様々な機械を総合的に導入する機械集積産業としての自動車産業での経験と知識を活用する事が得策である。

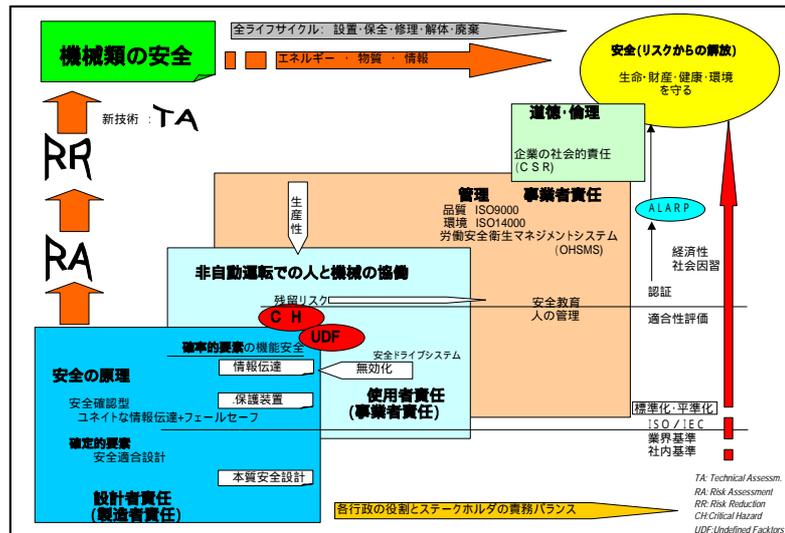


図 3 . UDF

無効化の問題は、この要因のひとつである。便利な機械が使いにくければ、使いやすいように工夫するのが使用者である。タンパープーフの技術をあまり適用しすぎると、利便性が損なわれてしまう事もある。その為にあらたなセンサ等安全技術そのもの或いは危険源を低減する何らかの補助装置等の開発必要性という需要が喚起もされる。さらには、材料投入・調整時等のヒューマンエラーがこれらに加わるので、人の動きに対する電子的な表示・警告等も追加的方策として考えられる。

機械安全と生産性の関連性が解明され UDF への解決案が提示出来れば安全性が向上し、労働災害の防止につながるはずである（図 3 参照）。

しかるに、安全の基本は「止まる」事だが、生産性の観点からは出来る限り「止めない」設備作りが必要となるという事を出発点としての考察が機械安全の真の有効性を向上させる為に必要である。

機械安全の基本は動力のエネルギーをどう制御し、人体に影響を与える危険有害因子を抑制或いは排除し、残留リスクの情報をどう人に伝達するかにある。更には、これらの技術は恒常的に進歩しており、安全技術は単品からシステムへと変遷している。

要するに、機械設計者が安全な機械を市場に提供しても、例えば工作機械で加工物を製作し、それをコンベアで搬出し、ロボットにより仕分け作業をして、さらに後の工程に搬送し、最終的に取出すという様なライン構成の場合である。この場

合、機械設計者は往々にして自ら製作した機械がどのように使用者側で扱われるか情報を入手しない場合が往々にしてある。さらには、全ライフサイクルでの安全を考慮すると、製品納入後の設置、保守、点検、改造等の作業が発生し、その都度リスクアセスメントを実施し文書に記録される事が本来要求される。

最近統合設備の安全性に関する ISO11161 では、例えば自動車産業において、機械設計者と機械使用者の中間に位置するようなシステムインテグレートは、生産工程上の工作機械、ロボット、複合機械等をシステムアップする為に、機械設計者と同様に製造物責任を負うべきであるとされている。

1.3.組織的側面

事故の要因として、これまで見てきた技術的側面、人的側面の他に、組織的側面がある。

労働安全衛生マネジメントシステムは、技術でなく管理である為に、それを実践するには先ず state of the art に基づいた安全に設計された機械が現場に設置されているという前提条件が存在する。つまり、人は間違い・機械は壊れるという前提がないと本末転倒になってしまう。更には技術を出発点とした UDF の問題点が明確になり解決案が提示されて来ないと、折角の普及努力に対する適切な効果は期待が薄い。その意味では、品質管理・環境監理マネジメントシステムと同じ位置付けとなる。

CSR は企業のコンプライアンス及び企業倫理の事項であり、上述の既知の安全技術が適用されている事がやはり前提となってくる。

2.人と機械の協働のこれから

多品種少量生産の現場ではこれから人と機械の協働作業が多く望まれている。そこでも自ずから安全性は確保されるべきであるが、生産性との関連性がここでも問題点として浮上する。つまり UDF と同向き合うかと言う事である。

UDF での解決案としては、例えば安全ドライブシステムにより低速運転で扉を解放状態（本来、安全スイッチの接点は OFF 状態）にしたまま、作業する事が可能となる。これは現在欧州で

プロセス監視

と言う題目で規格化が進行中である。しかしながら、金属加工機械などでは規格で定められた数値を厳守して作業した際に、安全のために低速回転となっているが、実際はそれでは生産効率的に問題がある場合があり、これらも場合により先述の無効化の要因となっている。これをどうするかの問題解決が必要とされる。

又、産業用ロボットの場合、安全ドライブシステムにより、短軸或いはバーチャル空間を設定することにより、従来柵の中でしか作業できなかったロボットと人の協働作業が可能となってきている（図4参照）

柵無し安全での人とロボットの協調

これらの新技术を適用する事により、位置決めセンサやイネープリングデバイスの必要性がなくなる事も意味している。ここではドイツにおいて部分的な解決案は既に提示されているが、特定認

証的な運用をしている為に、現段階でも欧州では今後の法整備が必要とされている。広範囲の作業場での最適な安全技術としては、アクチュエータの安全化の他、研究開発中の

人の動きを監視するセンサ（例えば、安全ビジョンシステム、RFID 等を使用した人の数カウントシステム等）が必要で、それらの信号を最適に伝達する為の安全バスシステムや安全無線システム等が結合され初めてシステムとしての安全性が確保されてくる（安全な actuator- sensor-communication）。これらの技術に対しては、強制定法規の欧州機械指令の現状の枠内ではその運用がかなり制限されている為に、数年内にこの関連の改正作業が実施される予定である。

サービスロボットというあらたな概念のものである、従来の柵に囲まれた産業用ロボットと異なり、危険源であるサービスロボットと人が直接接触し常に危険状態が自立的移動空間として育成される為に、従来と異なる安全の考え方並びに運用が必要とされている。

特に膨大な機能安全規格をこれらの商品に適用してしまうと、費用とのトレードオフの関係から無理が生じてしまう為に、制御関係で安全関連信号を如何に処理するかが大きな課題である。同時に、工場という空間的に隔離された生産現場に設置・稼働される産業用ロボットに対し、一般消費者が対象となるサービスロボットは機械安全の要素に消費者安全の要素が加わる。その上、子供や身体的に不自由な高齢者等の社会的弱者も対象となる為に、安全概念とその運用につき新たなフレームワークが必要とされている。

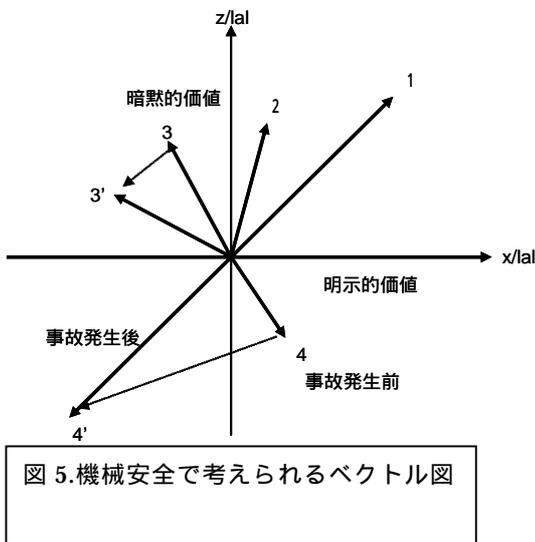
特定のサービスロボットは既に軍用として戦場に投入されているものがあり、自律・学習機能を備えた場合の技術進化によるその帰結の議論などは未だなされていないが、倫理・道徳の観点からは中長期的にはテクニカル・アセスメント(TA)や市民を含めた合意形成のしくみは必要と考える(4)。



図4．柵無し安全 - 人とロボットの協調（REIS-ELAN 社）

3.安全性・生産性・倫理性

機械安全の有効性に関する経済産業省の委託事業報告書の中で安全性と生産性或いは安全性と倫理性等を定量化しベクトル図で考える事が提案されている(5及び図5の一例参照)。暗黙的企業価値としての倫理性、明示的な企業価値としての収益性・生産性というスカラ積に1.が機械安全、2.が現状、3.と4.で事故発生前と事故発生後の相関関係をベクトル図で示している。これは、安全を技術的側面・人的側面・組織的側面から捉えるのに加え、ステークホルダとしての事業者が安全を如何に自社内に取込めるか或いは取込まない際の結果という観点からコスト分析を含めて考察している。特にUDFの概念を考察する上で効率性・生産性・収益性は非常に関連性があり、これらも今後UDFを解明する上での大切な要素となってくる。



4.社会システム

鳥瞰した様に安全技術は日進月歩で進化しており、特に欧州の場合は歴史的に経験を蓄積した第三者認証機関が暗黙知を形式知へと転換した国際標準化システムへの適用過程を活用し便利な機械を、恒常的に改善が繰り返されるその時代の最新技術をもって市場投入することに成功している。同時に、安全の判断が出来る専門要因が設計者・使用者・認証機関においてこれらを支えている。

国内では、機械安全についてのこれらグローバル・セーフティの考え方は黎明期でありそれに伴う社会システムが未だ育成され創めただけである。

UDFの概念整理とその解決案としての方法論を示す事は、ものづくりのノウハウを結集し如何に止まる安全と止めない安全を生産性の観点から両立させるかと言う事になる。これは、経験豊富な国内の人材を活用するという雇用の観点からも意味が出てくる。

4.まとめ

本稿では安全技術の流れを鳥瞰し、これまでの安全技術を基盤とし、尚且つ state of the art の恒常的進化の現状を鑑み今後の整理に向けて、UDFの

概念整理と解決の為の方法論の必要性を提案した。これは、現在の労働災害の主要因に焦点をあて、それを体系化し具体的な問題解決に繋げる為のひとつの布石であると考えられる。

同時にこのUDFの概念は、産業分野では人と機械が協調するという危険源を自ずから育成する傾向が現場での要求から必然的に育成されている事とあいまって、人と機械が共存・接触するのを前提としたサービスロボットに於いては、UDFの概念に基づいたあらたな安全の概念が必要である。

安全は機械・電気・電子・化学・人間工学・設計工学のみならず全ての工学に通ずる共通基盤である。特に、機械をあやつる制御技術は製造ラインのシステム化に伴い横断的にさまざまな機械に適用され、これらの要素を本質安全設計として、開発・設計段階から考慮しないと最適化できない。

事後の設計変更や事故処理としての後対策では安全は経済性が損なわれてしまう事態も招きかねない。ここでは、安全性と生産性の関連が重要で、経済学の観点からは費用便益性効果の分析も必要となる。

国際的に絶対安全はありえないとされている為に(ISO/IEC Guide 51 参照)、事故は起こるので、保険学も関連し、その際に同対処するかという責任論の整理も必要条件である。しいては、安全はリスクからの解放(ISO/IEC Guide51)であり基本的人権と深い係わりを持つ為に、衡平性を基にステークホルダに応じた権利と義務並びに安全規制をどうするか等を考慮すると法学・行政学等が対象となる。それを支える社会システムの適正化も安全を实践する上では必要不可欠となる。

かような状況のもと、安全を統括するには、先ず工学的な基本と科学及び技術の知見を出発点とし、恒常的に進化する state of the art 並びにそれにより同様に变化するし新たな社会システムの要求に対する横断的な学問を包括した「安全学」が必要となり、時代に見合った、かつ責任論を底辺においたあらたな社会的フレームワークが必要とされる。技術と人と組織が一体となり、そして事故の前の予防概念並びに事故の後の保証体制があって初めて機能する安全を支えるあらたな学問領域の必要性も、本稿で同時に提案したい。

参考文献：

- (1)杉本旭・蓬原弘一、安全の原理、日本機化学会論文集第530号C編、1990
- (2)清水尚憲、梅崎重夫、小林茂信、第34回安全工学シンポジウム講演予稿集 P153-156,2004
- (3)安全装置の無効化に関する報告書：Manipulation von Schutzeinrichtungen an Maschinen, HVBG-2006, ISBN:3-88383-698-2
- (4)加部隆史、安全確認型社会システム、日本機械学会 2004 年次大会講演資料集(8),P478-479
- (5)平成 17 年度経済産業省委託事業「機械安全技術の普及促進事業報告書」、田中紘一：3.3.機械安全有効性の総合評価、NPO 安全工学研究所