

予防策としての機械安全設計の有効性

加部隆史^{*1}, 田中紘一^{*2}, 染谷美枝^{*3}, 杉本旭^{*4}

Safety Design of Machinery: a priori prevention (Analysis of database on industrial accidents)

Takashi Kabe , Kohichi Tanaka , Mie Someya , Noboru Sugimoto

* Takashi KABE:NPO The Safety Engineering Laboratory, 3-39-8 Shoan, Sugunami-ku, Tokyo, 167-0054

A deterministic methodology for the safety of machinery was established in a series of international standards (ISO and IEC). The methodology, being implicitly ensured by the well-trying safety principle, takes effect for the deductive prevention of the accidents originated from the hazards of machinery. In this study, in order to confirm the achievement of high preventability by obeying the conception of the safety of machinery, a data base has been constructed for the 1266 occupational accidents of fatal damage which occurred from 1998 to 2000 in the manufacturing industry in Japan. The ISO12100 and 14121 are adopted as a standard of the methodology to conduct the technical evaluation for foreseeability and avoidability of the accidents in the data base. The preventability has been predicated on a matrix of foreseeability evaluated by the identification of the hazards and avoidability evaluated by the achievement of adequate risk reduction. The analytical result shows that 80 % of accidents would have been prevented if the methodology were applied for the general hazards as specified in clause 4, ISO12100-1. The percentage rises up to 94% when the data are confined to the mechanical hazards. These facts indicate the effectiveness of the deterministic methodology of the safety of machinery as a priori prevention of the machinery accidents.

Key Words : risk-based design, safety engineering, failure analysis, ISO12100, ISO14121

1. 緒 言

「天災は忘れた頃にやってくる」と云うが、災害は天にまかせるのではなく、人の力で予防するのが原則である。機械に関連する事故が発生した際の対応は、各国の法制度や社会因習などにより様々である。次の3通りの対応方法が典型的である。

第1分類 (EU) : 機械の製造者責任が法的に明確であり、市場に流通する機械に安全設計が求められ、違反した場合には製造者に対する処罰規定がある = CE マーキング制度による事前規制。

第2分類 (米国) : 機械の製造者責任は法的には規定されていないが事故発生時には製造者責任法 (PL 法) により厳しく説明責任を追及されるため、事前に安全設計を適用する事が多い = PL 法による事後制裁。

第3分類 (日本) : 機械の製造者責任は法的に規定されていない上、PL 法適用事例も少ない為、結果として機械の製造者は安全設計を実施しない。事故が起こ

ると使用者 (事業者) の責任を追及されるが、その原因は実質的には被災した労働者のヒューマンエラーに帰することが多い。その結果、法的に無過失責任として処理され、被災した労働者は国の労働災害保険 (労災保険) により救済され保証を受ける = 労働安全衛生法 (安衛法) による事後制裁、労災保険による事後救済。

EU では、設計者はリスクアセスメントを実施して、危険源を予見し、そのリスクを回避する設計方を講ずることによって事前責任を全うし、事故を予防する。その方法論の規範となるのが、機械安全の基本国際規格 (以下単に「機械安全」と略記する) ISO12100⁽¹⁾ 及び ISO14121⁽²⁾ をベースとして階層化された規格である。米国の PL 法では、製造物に欠陥があった場合、製造者は「証拠開示制度」⁽³⁾ により説明責任を求められ、リスクアセスメントを実施していないと著しく不利な立場となる。しかし、PL 法はあくまでも事後制裁を目的としているため、予防概念として、一貫した方法論を取り得ない。日本では、設計者責任はなおざりにされ、機械はリスク低減されないまま事業者に供給されてき

*原稿受付 2007 年 4 月 2 日

^{*1} 正員, NPO 安全工学研究所 (167-0054 東京都杉並区松庵 3-39-8)

^{*2} 正員, 長岡技術科学大学名誉教授 (245-0053 神奈川県横浜市戸塚区上矢部 1624-12)

^{*3,4} 正員, 長岡技術科学大学 (940-2188 新潟県長岡市上富岡町 1603-1)

加部隆史 E-mail: kabe@safetylabo.com

た。事業者が技術的な安全方策を施すには限度があるため、人を訓練・管理して安全を確保せざるを得なかった。従って、危険予知=予防という概念しか育ててこなかった。

この様に国によって異なる対応方法も、この10年の間に「機械安全」の方法論に収斂しつつあるように見える。米国はこれまで機械安全分野では、欧州とは一線を画してきた。しかし、最近になって労働安全衛生庁 (OSHA) の規定やいくつかの業界 (半導体, ロボット, 工作機械など) 規格には、「機械安全」の設計原則が採用されている。日本でも WTO/TBT 協定により、国際規格は自動的に日本工業規格 (JIS) に取り込まれている。さらに、06 年には安衛法が改正され、事業者のリスクアセスメントの実施が努力義務化された。このような情勢を鑑みる時、輸出製品に対しては、設計者責任を果たし、国内では果たさないという日本の二重基準体制はもはや許されなくなっている。

「機械安全」は確定論の上に成立している。それは、先人が長年培ってきた安全確保のノウハウの集大成を帰納的に系統化し (Norms are written by blood)⁽⁴⁾、確定した設計原則として構築しているからである。しかし、「機械安全」が新しく開発された機械や常に最新の技術的可能性 (State-of-the-art) に対応できるように、単に経験的な確定論に基づくだけでは不十分であり、何らかの普遍的な安全指針に基づく演繹性が必要である。

本報では、まず、日本の安全思想の特殊性を「機械安全」の思想と比較して論じ、後者の思想は事故の予防概念として有効であることを明らかにする。次に最近日本で発生した労働災害事故事例をデータベース化し、「機械安全」の方法論を適用し、本報で考案したマトリックスに基づき予防措置の効用を検証する。

2. 「機械安全」の方法論

2.1. 確定論

機械に伴う危険源は確定的危険源と偶発的危険源に大別できる⁽⁵⁾。前者は例えば、シャフト、カム、クランクなどの機械運動部のように工学的に確定できる危険箇所、あるいは工具、工作物などの作業手段の機能要素などであり、それらが人と接触すれば必ず何らかの災害の原因となる。後者は部品や工具の破損のように機械のライフサイクルにおいて時間依存確

率に従って、突然、不意に発生する。

実際に発生した労働災害の圧倒的多数は「はさまれ・巻き込まれ」「転倒」「墜落・転落」などの確定的危険源に起因する⁽⁶⁾。それらの災害の発生源 (危険源) は明確であり、危険源からどのようにエネルギー (機械的, 電氣的, 化学的, 熱的, 光学的及びその他の多様なエネルギーが傷害危険性を持つ) が人間に伝達したかを明らかにすることが出来る⁽⁷⁾。このエネルギー伝達は、常に原因が先あって結果が後にくる正の時間軸上で確定論的に定まる。つまり、災害発生の条件が整えば、必ずこの過程を巡って災害が発生する。これは丁度、物体の運動は初期条件で与えられれば、時間軸上で記述できるのと同様である。「機械安全」では、確定論に則り、機械の設計時にリスクアセスメントを実行すれば危険源は同定でき、かつ、それに対するリスク低減方策は確定的に定まるので災害は予防できると考える。

一方、日本における安全思想は確率論に基づく。災害は予期せぬ場所で偶発的に起こり、人間が危険を予知して自ら防ぐ必要があると考える。したがって、機械の設計時に予防策を講じるという発想はなく、予防は人の訓練と管理に頼り、危険予知能力 (感受性⁽⁸⁾) が重要視される。また、日本の大学における機械工学の設計の授業では、学生に偶発的危険源に対する設計方策、すなわち、強度設計あるいは寿命設計しか教えてこなかった。その結果、日本の機械技術者には安全性=信頼性という認識が染み付いている。

2.2. 「安全の原理」

機械の危険状態は危険源を除去するか、危険源と人間が同一空間内で同時に存在しなければ発生しない。後者の状態を実現するためには、機械の作業空間と人間の作業空間とを構造的に隔離するか (隔離の原則)、あるいは両空間の重なりが防げない場合には、人間の作業空間立入り時には機械の出力発生を停止する (停止の原則) が必要である。隔離及び停止の原則に則った装置の制御システム (インタロック) 構築に際しては安全または危険情報の伝達が不可欠である。

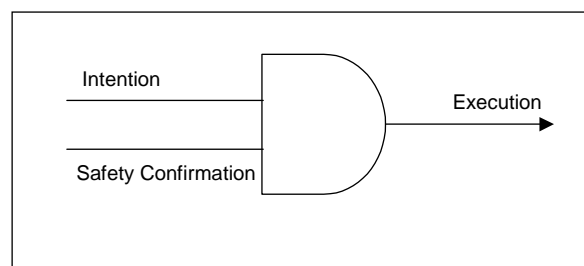


Fig.1. Principle of Safety : Safety Confirmation

90年に杉本と蓬原⁽⁹⁾は機械の安全に係る情報伝達に関する「安全の原理」を提唱した。この原理の論理構造は、図1の様に表される⁽¹⁰⁾。安全の論理を2値変数 S (1, 0)で表して、1を安全、0を安全でない(危険)とする。この安全 S を抽出し伝達するためのエネルギーを論理変数 E (1, 0)で表して、 $E=1$ をエネルギーの存在、 $E=0$ をエネルギーの不在とすれば、抽出して示される安全 S_r は次式で表される。

$$S_r = E \cdot S \quad (1)$$

ここでは論理積を表わす。この式の論理的関係の真理値表を作製すると容易に次式を証明できる。

$$S \quad S_r \quad (2)$$

(1)式は安全の伝達となる物質的手段のエネルギー生成と安全が一致すべきことを示している。(2)式は安全が保証できないのに($S=0$)安全を通報する($S_r=1$)ことのない単調な情報伝達系を要求している。すなわち、安全装置が故障した時、入力があっても($S=1$)出力がない状態($S_r=0$;安全側故障)を許容するが、入力がないのに($S=0$)出力が発生する状態($S_r=1$;危険側故障)を許容しない非対称故障モード(フェールセーフ)特性を要求している。⁽⁹⁾

この「安全の原理」に基づいて構築されるシステムを安全確認型システムと呼び⁽¹⁰⁾、これと対比されるものとして危険検出型システムがある⁽⁶⁾⁽⁹⁾。後者のシステムでは危険(D)を検出して得た危険情報(Dr)を否定して安全情報 S_r を得る。D及びDrを2値変数で表し、(1)式の S をD、 S_r をDrに置き換えて、論理演算をすると(2)式と同様な関係を得る。

$$D \quad Dr \quad (3)$$

この関係に否定演算を施し、 $\neg D=S$ 、 $\neg Dr=S_r$ と置くと(\neg は否定記号)

$$S \quad S_r \quad (4)$$

を得る。(4)式は不等号が(2)式の逆になる。危険検出型システムの場合、入力不在時(安全装置故障時)での出力発生(危険側故障)を許すことになり、安全の原理に反する。

杉本⁽⁷⁾と蓬原⁽¹⁰⁾⁻⁽¹³⁾は「機械安全」では明示していないが「安全の原理」に基づく安全構築が不文律となっていると指摘している。ISO12100-2<1>における「4.11 制御システムへの本質的安全設計方針の適用」条項中の細目「4.11.3 機構の起動・停止」では、2値論理を用いて規定している。すなわち、1の状態を最も高いエネルギー状態と表すならば、機構重加の起動は0の状態から1の状態への移行により、停止は1の状態から0の状態への移行により実行すべきであると定められている。これは「安全の原理」に基づいて解釈

する必要がある。具体的例として、電磁リレーのコイルに電流を供給して、モータを駆動する場合を考える。コイルに供給する電流 S 及びモータに流れる電流 S_r をそれぞれ2値の論理変数とし、リレー接点の動作状態を E とすると、(1)式が成り立つ。細目「4.11.3」では、 $S=S_r$ の状態を要求していることになる。つまり、接点が常に正しい動作をすること($E=1$)、すなわち、接点には故障が絶対に起こらないことを要求しているが、これは現実的でない。実際には、接点間の接触不良によってコイルに電流を供給されてもモータ電流が供給されない($S>S_r$;安全側故障)ならば安全上問題はない。しかし、接点間の溶着や端子間の故意の短絡によってコイルに電流が供給されていないのにモータ電流が供給されること($S<S_r$;危険側故障)は許されない。したがって、(2)式を満足しなければならない。同様な議論は起動や再起動に関しての規定(4.11.2及び4.11.3)についても当てはまる。また、「制御システムの安全に関連する部品」に関する規格ISO13849-1⁽¹⁴⁾では、安全装置の部品のフォールト抵抗に関してカテゴリ分けを行なっている。その内、カテゴリ1~4では、「良く吟味された安全原則(well-trieed safety principles)」を用いた設計を要求している。その原則の中に「フォールトとモードの方向付け」(by orienting the mode of fault)と云う言葉がある。これはISO1200-2⁽¹⁾の細目「4.12.2 “非対称故障モード”構成品の使用」の規定と同義である。それゆえ、蓬原⁽¹³⁾は「良く吟味された安全法則」とは「安全の原理」を意味していると解釈している。

一方、日本で推進されてきた労働安全対策⁽⁸⁾は、人間が危険を察知して機械を止める危険検出型システムで成立している。このシステムでは人間が危険の察知に失敗すると危険側故障が起こり災害の発生する可能性が高くなる。逆にこのシステムで安全を確保するためには、人間の訓練や管理をひたすら徹底し、エラーを失くす(信頼性を上げる)しかない。しかし、人間の行動には限度があるため必ずある時に事故が起こってしまう。

2.3. 予防の為の方法論

ISO/IECガイド51⁽¹⁵⁾は安全規格作成のためのガイドラインを提供している。そこでは絶対安全はありえないので、必ず幾ばくかのリスクが残るが、安全は残留リスクを許容可能なリスク(tolerable risk)迄低減することによって実現できると規定している。それはリスクアセスメントとリスク低減のプロセスを繰り返すことによって達成される。リスクアセスメントでは事故の予見可能性を示し、機械に付随する機械的、電気

的,人間工学的等の危険源の同定・リスクの見積・リスクの評価を行い,文書に記録し,それに基づきリスク低減の為に適切な措置を講じる。リスク低減は,事故の回避可能性を示すが,以下の順番で実行する必要がある(3ステップメソッド)⁽¹⁾⁽²⁾⁽¹⁵⁾

1. 本質的安全設計方策(以下本質的安全設計と略記)
2. 安全防護及び追加保護方策(以下安全防護と略記)
3. 使用上の情報

この手順は,設計者・製造者が提供する使用上の情報に使用者が従うことで,使用者もリスク低減に寄与し得るということを前提としている⁽¹⁵⁾。使用者が講ずる保護方策としては,組織・追加安全防護物の備え・保護具・訓練等が上げられる。なお,これらの保護方策は,設計者を対象とした ISO12100 の規定範囲外である。

3. 事故データベース

3.1. 事故データベースの構築

事故データベースの構築は,経済産業省の研究開発調査(平成 17 年度)の一環として行なわれ,機械安全技術の普及促進事業報告書にまとめられている⁽¹⁶⁾。

国内の事故データは,様々な形態で存在しているが,情報の信頼性・内容の信頼性・対象業種等の観点から,本報の検証分析にはデータの均質性を重視し,中央労働災害防止協会(中災防)が運営する「死亡災害データベース」(対象期間:98~01年)の内,製造業に該当する全データを利用した。すなわち,入力対象は,製造業の労働災害現場で発生した事故の中から「死亡災害」に限定した。

データベースの構築ソフトウェアには操作の容易性,今後の拡張可能性を考慮して File Maker Pro Ver. 7 を採択した。データシートに記載した項目は下記の通りである。

データ照合番号 No.	被災者数
出典事故データベース名・事故番号	発生状況
概要	技術的考察 1
発生年月日	技術的考察 2
業種	技術的考察 3
従業員数	予見可能性
事故と型	回避可能性
起因物	予防可能性

項目 ~ は,抽出したデータ項目である。この内,項目 と の分類は中災防のデータベースの分類に従った。項目 ~ は各データの危険源,安全方策に対して「機械安全」を確定的に適用する際に用いた技

術的考察の評価項目である。項目 ~ は「機械安全」の有効性検証項目で,本報において独自に策定したものである。

技術的考察は下記の三段階に分けて行なった。

技術的考察 1 :発生状況から事故の発生原因を考察し,ISO14121 - JIS B9702:2000「付属書 A(参考)危険源,危険状態及び危険事象の例」に従い分類

技術的考察 2 :発生状況から事故を未然に防ぐための安全方策を考察し,リスクアセスメント原則に従い,§2.3 で示した 3 ステップ 1, 2, 3 の順で可能な防止策を選択し,ISO12100-2 - JIS B9700-2 の大項目に従い分類。ただし,ステップ 3 に対応する「使用上の情報」は使用者が保護方策を実行して初めてリスク低減に有効となる。従って,本報のデータ考察においては,使用者の実行する安全管理及び保護方策(保護具の着用,労働者の訓練など)も「使用上の情報」に繰り入れて評価した。

技術的考察 3 :技術的考察 2 の結果を下に事故を防止する為に具体的なリスク低減措置を考察し,ISO 12100 - JIS B9700-2 の小項目に従い分類。

3.2. 評価基準の策定

「機械安全」の有効性は,事故の「予見可能性」及び「結果回避可能性」の 2 項目でまず検証した。

は,危険源の同定・リスク見積り・リスク評価という一連のリスクアセスメントの流れを指し,はそれに基づくリスク低減プロセスを意味している。つまり,両者の反復プロセスという方法論を適用したか否かの判断をする事となる。「予防可能性」は,との相乗効果を評価する尺度である。

すなわち,予見可能性および結果回避可能性をそれぞれ 2 値の論理変数 F A と表すと,予防可能性 P は,

$$P = F \cdot A \quad (3)$$

で表される。P は民法第 415 条安全配慮義務や民法第 709 条(PL 法第 6 条)不法行為責任の判断基準となる。逆に P の否定論理は,論理和 を使って

$$\neg P = \neg F \vee \neg A \quad (4)$$

と表されるが,これは免責の判断基準となる。

実際には上記 3 つの可能性に対して,2 値の論理で評価するのは現実性がないので,下記のような多値評価とした。

予見可能性(表 1):判断者の専門性及び知識や技術の水準という二つの範疇に対しカテゴリ分けして 1S - 5S までの 5 段階を設定した。

Table 1 . Categorizing of foreseeability

Category of foreseeability	Specialty	Level of special knowledge	Example of activities
(1S)	Foreseeable by common people	General knowledge	
(2S)	Foreseeable by specialist	Specialist of safety management (Safety administrator , etc)	Training of finding hazard (kiken yochi training; KYT)
(3S)		General engineer	Designing
(4S)		Safety engineer	Building of protective measure
(5S)	Unforeseeable	No adequate measure using established knowledge and technique	

回避可能性 (表 2) : 採用する技術または手法という範疇にカテゴリ分けして 1T - 4T までの 4 段階を設定した .

Table 2 . Categorizing of avoidability

Category of avoidability	Technique or measure adopted	
(1T)	Safety technique	Adoption of well-established safety standard or principle (ISO / IEC etc)
(2T)		Safety technique under consideration of the current state of the art
(3T)	Protective measures taken by the user (organization , training , etc)	
(4T)	Unavoidable	

予防可能性 (表 3) : 表 1 の結果を行に , 表 2 の結果を列に表示し , マトリックス (5 × 4 行列) を構成した . 行列の要素は 20 となるが本報では大まかな方向性を確認するという目的のため , 評価結果は High / Middle / High-Middle / Low の 4 段階のグループ分けをした .

Table 3 . Matrix of preventability

Foreseeability \ Avoidability				
	High	High	Middle - Low	Low
High	High	High	Middle - Low	Low
Middle	Middle	Middle	Middle - Low	Low
Low	Low	Low	Low	Low

Explanation of groups

High = preventable by observing Japanese safety-related technical regulations .

Middle = preventable by obeying international safety-standards . Middle-Low = Preventable by safety-related administration taken by the user .

Low = New standards for safety technique or new regulations over administration are required for prevention .

3.3. 専門家による分析

3.1. のデータ入力 , 特に技術的考察 1 - 3 の選別の段階では , 安全技術の知識が必要とされるので , 相応なりスクアセス面と経験者 5 名を選抜し作業を依頼した . 評価の妥当性を齋藤と林本と田中の 2 名で行なった .

4. 分析結果及び考察

収集したデータは総計 1266 件である . これらの中で交通事故や生活災害のように「機械安全」の域外であったり , 判定不能なデータ合計 342 件を分析から除外した . 従って分析に供したデータ数は , 942 件である .

また , 技術的考察 1 , 2 , 3 に対するデータの頻度分布はそれぞれ付表 A1 , 付図 A1 及び A2 にまとめた . また , これらの分布の導出方法は , 付録 A1 , A2 及び A3 に詳述した . なお , 各考察において , 1 データに対して複数の項目が選択された時は , そのうちもっとも蓋然性の高い 1 項目だけに限定して頻度分布を取った .

表 1 , 2 及び 3 のカテゴリ分けに基づいて分析したデータベース件数とその百分率の頻度分布をそれぞれ表 4 , 5 及び 6 に示した . ここで , データは表 A1 を参照して , 危険源を一般的危険源と特別危険源に大別して分析し , 前者の内 , 機械的危険源だけを取り出して分析した結果を括弧内に示した .

表 4 の予見可能性は , 危険源の種類にはほとんど依存せず , 一般人 (1S) の予見は難しいにしても (5% 以下) , 安全管理の専門家 (2S) か一般技術者 (3S) であれば予見可能である (2S+3S = ほぼ 80%) . 全体として , 安全技術

の専門家まで加えると(1S+2S+3S+4S)90%を超える。すなわち、9割以上の事故は技術的に予見可能性があったと結論づけられる。この事は、労災事故の圧倒的多数の事例において、その危険源は確定論的に定まることを示唆する。

表5の回避可能性においては、危険源の種類に対する依存性がある。一般的危険源に対しては、安全技術の適用(1T+2T)により80.2%の事故は回避でき、人の訓練や管理により(3T)回避できるのが17.9%である。なお、機械的危険源に対しては、この傾向は顕著であり、94.9%の事故は安全技術の適用により回避可能である。一方、特別危険源に対する回避可能性は安全技術の適用では41.6%、人の訓練や管理では57.7%となり、安全技術では回避できず、人に頼らざるを得ない事例がむしろ多くなっている。しかし、人に頼ることを前提にすれば、一般的及び特別の両危険源とも全体としてほぼ完璧に回避可能である(1T+2T+3T=98~99%)。

このような回避可能性と危険源との関係は、当然のことながら、リスク低減方策が危険源に依存することを反映している。付録A4において、3ステップメソッドと危険源との関係を調べているが、ステップ1とステップ2は、技術的な安全方策、ステップ3は人に頼る安全方策と位置付けることができる。付録A1によると一般的危険源に対しては、技術的安全方策の頻度は82.4%(95.8%)、人に頼る安全方策の頻度は17.6%(4.2%)となるが(括弧内は機械的危険源に対する値)、特別危険源に対してはそれぞれ41.0%、59.0%となる。表6の予防可能性においても、危険源の種類に対する依存性がある。これは、回避可能性の危険源種類依存性の影響による。一般的危険源に対しては、安衛法を始めとする国内安全技術基準を順守(High)だけでは、30.4%の事故しか予防できない。しかし、国際規格を取り入れると(High+Middle)80.3%の事故が予防可能となる。特に、一般的危険源の内、機械的危険源に限定するとその可能性は94.3%に跳ね上がる。これらの結果は、梅崎と清水の調査結果⁽¹⁶⁾と見合っている。彼らは、機械的危険源に起因する129件の死亡労働災害を調べ、その79.2%は、国際規格を積極的に活用していれば、防ぐことができた結論づけている。

一方、特別危険源に対しては、国内技術基準や国際規格を順守する事により(High+Middle)43.7%の事例が予防できるが、それよりも多い48.1%の事例は、人の訓練や管理に委ねざるを得ない。これは当然予想出来る。特別危険源には、フォークリフト、クレーン

などが関連してくるが、これらの操作者に対しては免許や資格制度が課せられており、人のスキルが安全防護の前提となっている。

Table4 . Data frequency of foreseeability (Parenthesized numbers are for the data of mechanical hazard)

Hazard Category	General hazard		Particular hazard	
	Frequency	Pct(%)	Frequency	Pct(%)
(1S)	16(5)	2.5(1.5)	14	4.8
(2S)	245(108)	38.8(32.2)	113	38.6
(3S)	260(171)	41.2(51.1)	113	38.6
(4S)	80(46)	12.7(13.7)	30	10.2
(5S)	30(5)	4.8(1.5)	23	7.8
Total	631(335)	100.0(100.0)	293	100.0

Table5 . Data frequency of avoidability (Parenthesized numbers are for the data of mechanical hazard)

Hazard Category	General hazard		Particular hazard	
	Frequency	Pct(%)	Frequency	Pct(%)
(1T)	77(53)	12.2(15.8)	18	6.1
(2T)	429(265)	68.0(79.1)	104	35.5
(3T)	113(14)	17.9(4.2)	169	57.7
(4T)	12(3)	1.9(0.9)	2	0.7
Total	631(335)	100.0(100.0)	293	100.0

Table6 . Data frequency of preventability (Parenthesized numbers are for the data of mechanical hazard)

Hazard Category	General hazard		Particular hazard	
	Frequency	Pct(%)	Frequency	Pct(%)
High	192(102)	30.4(30.4)	44	15.0
Middle	315(214)	49.9(63.9)	84	28.7
Middle-Low	93(13)	14.8(3.9)	141	48.1
Low	31(6)	4.9(1.8)	24	8.2
Total	631(335)	100.0(100.0)	293	100.0

最後に今回の調査結果と「安全の原理」の関連について考察する。データベース記載の発生状況の中には、制御システムの詳細まで触れたものはなく、リスク低

減方策が「安全の原理」に則っているかどうかは分からない。付録 A3 に技術的考察 3 で得られた結果を整理して、リスク低減措置方法の頻度分布を危険原の種類別に分類して示した(付図 A2)。これは、措置方法として、制御、一般的機械設計、使用上の情報(人に頼る方法)の 3 つに大別してあるが、「安全の原理」が機能するのは、制御を用いた時である。付図 A2 によると、機械的危険原に対してはその 2/3 は、制御方式によりリスク低減が可能であるので、「安全の原理」が有効に働く。しかし、機械的危険原を除く一般的危険原に対しては、その 61.8% は一般的機械設計に頼らざるを得ず、制御方式が採用できるのは、僅か 5.4% である。また、特殊危険原に対しては、その 59% は使用上の情報に頼り、制御方式は 7.2% しかない。従って、これらの 2 危険原に対しては「安全の原理」はほとんど機能しない。

5. 結論

本報では、まず「機械安全」が暗黙裡に「安全の原理」を基本理念とすることによって、その演繹性を保障していることを論じた。次に、実際に発生した労働災害死亡データ 1266 件(中災防データ)の内、交通事故のように「機械安全」の域外であるデータや判定不能データを取除いた 942 件をデータベース化し、独自開発のカテゴリに従い、評価・分析した。そのカテゴリは、機械安全の国際基本規格 ISO 12100 及び 14121 に則っており、確定論に基づき事故の予見、結果回避、及び予防の各可能性を検証するものである。災害データ分析で得た主たる結果は以下の通りである。

- (1) 事故の起因となる危険原は一般的危険原と移動性や物の吊上げに伴う特別危険原に大別できる。前者は、更に、機械的危険原とその他に 2 分される。これらの 3 つの危険原に起因するそれぞれの事故頻度はほぼ等しい。
- (2) 予見可能性の検証結果は、危険原の種類に依らず、安全専門家ならば、事故の 90% 以上は予見が可能であったことを示す。この事は、機械に関連する労災事故の圧倒的多数の事例において、その危険原は確定論的に定まることを示唆する。
- (3) 回避可能性に関しては、一般的危険原に対しては、安全技術の適用により、80% の事故は、回避可能と判定された。その内、機械的危険性に対しては、回避可能性は 95% に達する。しかし、特別危険原に対しては、58% は人の訓練や管理に頼る必要がある。

(4) 国際規格を取り入れると、一般的危険原に対しては、80% の事故は設計による予防可能性があり、機械的危険原においては、その割合は、94% に跳ね上がる。一方、特別危険原は国際規格を取り入れても 44% の事故しか予防出来ない。

(5) 機械的危険原に対しては、制御によるリスク低減方策が有効であり、予防可能性を大きく向上させている。すなわち、「安全の原理」に基づく制御システムの構築がその裏付けとなっていると考えられる。一方、特別危険原に対しては、多くの事故の防止は人に頼らざるを得なかったが、これには危険発出型のメカニズムが働き、人の信頼性に頼らざるを得ないので、防止機能には限度がある。

謝辞

本報は、NPO 安全工学研究所が、平成 17 年度に経済産業省の委託を受け、機械安全技術の普及促進事業の一環として作製した事故データベースのデータを活用した。

付録 A 事故データベースの内容

事故データ分析に用いたデータベースの内容及び類別の頻度分布の詳細は下記の通りである。

A.1 技術的考察 1

各データ毎に発生状況から、事故の発生原因を ISO 14121(JIS B 9702):2000²⁾「付属書 A(参考)」に従い同定した結果を項目別の頻度分布として、付表 A1 に示した。「付属書 A」では機械で生じ得る一般的な危険原、危険状態、危険事象(以下単に危険原と略記する)として項目 1 機械的危険原ほか項目 19 までが列記され、これらは ISO 12100 において対応がとられている。その他に、特別危険原として移動性、物の吊上げ、及び、人の吊上げ又は移動によって付加される危険原が項目 20~37 に割付られている(項目 30~33 は地下作業によって付加される危険原であるが、中災防のデータに含まれていないので、本報では省いた)。これらの特別危険原は、機械指令 98/37/EC または EN 292-2/1995 の付属書に規定されているが、ISO 12100-1 または 2 には規定されていない。付表 A1 に示した事故発生原因(危険原)の頻度分布は一般的危険原に関しては、頻度の多かった 8 項目は各々の頻度を示し、その他 11 項目に対しては、合計頻度を示した。特別危険原には、移動性があるものとしてクレーン、フォークリフト、荷上げリフト(エレベータ)、人を吊上げるものとして高所作業車などが関連すると判断した。

付表 A1 によると、一般的危険原に基づく災害が全体の 2/3、特別危険原に基づく災害が 1/3 を占めている。その内、前者の 1/2 強が機械的危険原 (項目 1) に基づく災害である。

Table A1 . Frequency distribution of occupational hazards causing fetal accidents in manufacturing factories in Japan

Classification	Hazards	Frequency	Percentage frequency
General hazards	1 . Mechanical	335	36 . 3
	2 . Electrical	35	3 . 8
	3 . Thermal	28	3 . 0
	7 . Materials and substances	69	7 . 5
	8 . Ergonomic	18	2 . 0
	17 . Falling or ejected objects or fluids	16	1 . 7
	18 . Lose of stability / overturning of machinery	24	2 . 6
	19 Slip , trip and fall of persons	89	9 . 6
	The others	17	1 . 8
	Sum	631	68 . 3
Particular hazards	20 ~ 26 . Additional hazards due to mobility	89	9 . 6
	27 ~ 29 . Additional hazards due to lifting	193	20 . 9
	34 ~ 37 . Additional hazards due to the lifting or moving of persons	11	1 . 2
	Sum	293	31 . 7
Totals	924	100 . 0	

A.2 技術的考察2

発生状況から、危険原を同定し、それに対応する安全方策を 3 ステップに分類した結果を付図 A1 に示す。同図は、各ステップで回避可能な事故データ頻度分類を調べたものであるが、危険原をさらに一般的危険原 (機械的危険原 + その他の一般的危険原) と特別危険原に分けて示してある。

この図によると、一般的危険原と特別危険原では、取り得る安全方策の頻度分布は大幅に異なっている。一般的危険原においては、設計者が行う安全方策、ステップ 1 (本質的安全設計) 及びステップ 2 (安全防護) の方策を取り得る事故の合計件数は 520 件に達する。それに対し、使用者が実行する安全方策、ステップ 3 (使用上の情報並びに人の管理・訓練) に頼らざるを得ない事故件数は 111 件であり、圧倒的に設計者が行う安全方策を執り得る事故の方が多い。この傾向は、一般的危険原の内、機械的危険原に限ると、更に顕著となり、両者の頻度比は、321:14 となる。

方、特別危険原の場合は、その比は、120:173 となって逆転し、この危険原に対しては、使用者の実行する安全方策に頼らざるを得ない場合の方が多くなっている。

A.3 技術的考察3

事故の危険原に対応させて、具体的なリスク低減措置方法を ISO 12100-2 の小項目より選択した。それらは、多岐に亘るため、池田と蓬原の分析方法に倣い⁽¹⁸⁾大雑把に次の 3 方法にまとめて、それぞれに該当するデータ頻度分布を危険原の種類別に分類して、図 A2 に示した。

- (1) 制御 - ISO 12100-2 の 4 . 11 項, 4 . 12 項, 5 . 2 項, 5 . 3 項の内、インターロック付ガード、検知保護装置に関連する項(2) 機械設計 - 4 . 1 ~ 4 . 10 項, 5 . 2 項, 5 . 3 項の内固定ガードのように制御を要しないガードに関連する項 . 5 . 4 項, 5 . 5 項
- (3) 使用上の情報 (人の注意, 管理, 訓練に依存する方法) - 6 項

本図によると、危険原の種類とリスク低減措置方法は、強い相関を持ち、機械的危険原は制御、機械的危険原を除く一般的危険原は一般機械設計、特殊危険原は、使用上の情報がそれぞれ圧倒的に頻度が高くなっている。

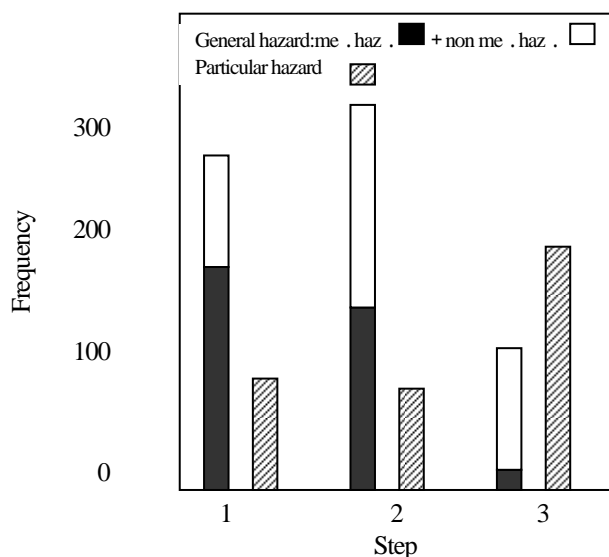


Fig . A1 . Data frequency against step method as classified into general hazard (mechanical hazard plus non mechanical hazard) and particular hazard

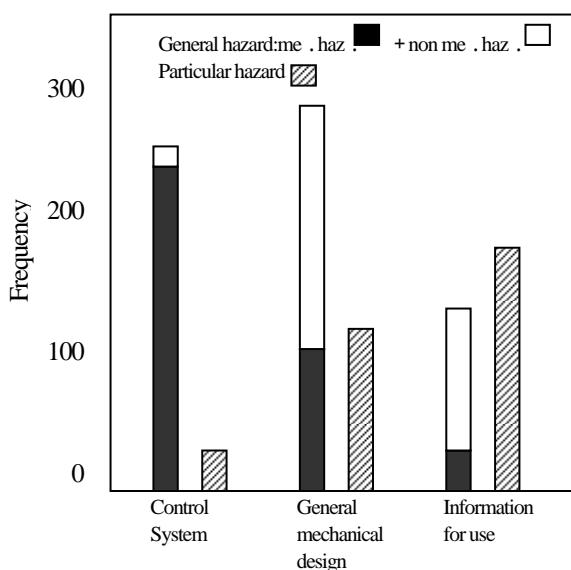


Fig . A2 . Data frequency against protective measure as classified into general hazard (mechanical hazard plus non mechanical hazard) and particular hazard

参考文献

(1) ISO 12100-1, -2:2003 , Safety of machinery – Basic concepts of general principles for design (2003)
 (2) ISO 14121:1999 , Safety of machinery – Principles of risk assessment (1999)
 (3) Kasuo Nagase , Product Liability Law , Hitotsubashi Shuppan (2004)
 (4) A . B . Malyshey , B . G . Gordon , "Deviation" of Responsibility in Using Atomic Energy , "Law and Security" , the journal Issue 1(10) , March 2004
 (5) A . Neudoerfer , Construction of Safety Machinery , Kohichi Tanaka , NPO The Safety Engineering Laboratory (2002)
 (6) Indication of Safety , Japan Industrial Safety & Health Association (2004)
 (7) Noboru Sugimoto , Safety Confirmation System Depending on Machine , Chusaibo Shinsho (2003)
 (8) Masahiro Nakamura , Shape up the danger spirit , Chusaibo Shinsho (2003)
 (9) Noboru Sugimoto , Kohichi Futsuhara , Principle of Safety , JSME C56-530(1990) , p . 2601-2609
 (10) Kohichi Futsuhara , Basic of Safety Engineering , Society of Safety Technology and Application (2004)
 (11) Kohichi Futsuhara , Noboru Sugimoto and others , Basic Structure of Safety Confirmation System , JSME C 54-505 (1998) , p . 2284-2292

(12) Akira Morisada , Takayuki Kobayashi , Kohichi Futsuhara , Standardisation of Man-Machine-System According to International Standard on Safety , Journal of Reliability Engineering Association of Japan , 26-134 (2004) p . 163-179
 (13) Kohichi Futsuhara , Safety Engineering Based on Basicsafety Standards , Society of Safet Technology and Application , Nagaoka University of Technology (2005)
 (14) ISO 13849-1 , 2001 , Safety of machinery – Safety-related parts of control systems Part1:General principles of design (2001)
 (15) ISO/IEC Guide 51: 1999 Safety aspects – Guidelines for their inclusion in standards (1999)
 (16) Research Report on Development of Machinery Safety , Ministry of Economic and Trade- NPO The safety Engineering Laboratory (2006)
 (17) Shigeo Umezaki , Shoken Shimizu , Analysis of Fatal Accidents caused by Industrial Machines , NIIS-SRR-No . 33 (2005) , p . 53-67
 (18) Hiroyasu Ikeda , Kohichi Futsuhara , A Methodology of Applied Risk Analysis Method , Proceedings of 19 . Symposium of Reliability Engineering Association of Japan (2006) p . 48-56