

機械作業を対象とした安全設計支援システムの開発 —統合生産システム (IMS) のリスクマネジメント戦略を例として—

梅崎重夫*1 濱島京子*2 清水尚憲*1

機械による労働災害は、安全装置などの設備的な保護方策が困難な機械で数多く発生している。このような機械では、人の注意力に依存して安全を確保せざるを得ない。しかし、最近の技術進歩によって、このような機械に対しても、機械安全の観点からの保護方策が可能となるケースが多くなってきた。このため、機械安全と安全管理の連携を考慮した新たなリスクマネジメント戦略の確立が強く要望されている。そこで、両者の連携が不可欠な統合生産システム (IMS) を対象に、筆者らが考案した4種類の総括表を埋めるだけで、比較的容易に機械のリスクアセスメントや保護方策の実施を容易化できる安全設計支援システムを開発した。この総括表は、①危険源等の同定とリスクの定量化、②保護方策の実施、③残留リスクの明確化と安全管理策の実施に関する情報を提供する。以上の成果は、筆者らが提案する保護方策区分、リスク管理区分、危険点近接作業などの諸概念とともに、ISO12100やISO11161を補完する新たなリスクマネジメント戦略として提案可能である。

キーワード: 機械安全, 安全管理, リスク管理区分, 保護方策区分, 危険点近接作業, 統合生産システム

1 はじめに

現在、日本では ISO12100:2010¹⁾ (機械類の安全性—設計の一般原則—リスクアセスメント及びリスク低減) を始めとする機械安全規格にしたがって、機械の設計・製造者が設備的な保護方策を行うのが主流となりつつある。しかし、機械の保護方策に関する知識と技術が急速に普及する一方で、労働災害の発生件数は下げ止まり、重篤度が増大している機械もある²⁾。

この背景には、主に中小零細企業が保護方策の不十分な旧式の機械を多数抱えているという問題がある。しかし、原因はこの点だけに限らない。むしろ、筆者らは、機械作業の中に、作業者の注意力に依存して労働災害を防止せざるを得ない作業が多数存在していることに、機械による労働災害が根絶できない根本原因があると考えられる。

この具体例に、クレーン、建設機械、フォークリフトなどの特に危険な機械による作業がある。また、機械停止が困難な危険点近接作業³⁾ や、作業者が広大な領域内に進入して行なう作業⁴⁾ などにもこれに該当する。

従来、このような作業に対しては、機械の使用者が人の注意力に依存する適切な安全管理策を適用するのが一般的であった。しかし、最近の技術進歩によって、このような機械に対しても設備的な保護方策が可能となるケースも多くなってきている。このため、筆者らは平成18～22年度に実施した本プロジェクト研究で、このような危険な機械を対象に、機械の設計・製造者が行う保護方策(機械安全)と機械の使用者が行う管理的対策(安全管

理)の連携を考慮した新たなリスクマネジメント戦略の検討を試みた。

この検討では、特に次の点に留意した。

1) 多発する機械災害に対しては、リスクの高いものから優先的に対策を実施するという戦略的対応が重要である。このため、各機械または現場単位のリスクを事前に定量評価する手法の確立を試みる⁵⁾。

2) 実際の機械による死亡労働災害(事故の型が「挟まれ・巻き込まれ」と「激突され」に限る)の3分の2近くは、機械停止が困難な危険点近接作業や作業者が広大な領域内に進入して行なう作業などで発生している。これらは ISO12100 に示された戦略では対応困難であり、ISO12100 を補完する新たなリスクマネジメント戦略の構築が不可欠である^{3), 4)}。

3) リスクアセスメントと保護方策の普及促進を図るには、これらの実施を容易化できる支援システムの開発が不可欠である。そこで、機械安全と安全管理の連携が不可欠な統合生産システム (Integrated Manufacturing System. 以下、略して「IMS」と呼ぶ) を対象に、筆者らが考案した4種類の総括表を埋めるだけで比較的容易に機械のリスクアセスメント及び保護方策を実施できる安全設計支援システムを提案する⁶⁾。

以上のうち、本稿では3)について述べる。なお、これらの研究内容は文献3)～6)に詳述したので、詳細は文献を参照されたい。

2 統合生産システムの定義と想定モデル

統合生産システム (IMS) は、複数の機械の協調制御によって単独の機械では得られない技術的效果の実現を目的とした機械群である。この具体例に、ロボット、加工機、コンベア、マテリアルハンドリング機械、自動倉庫、無人搬送車などを協調制御させた機械群がある。これは、部品の搬入から加工、搬出までを自動的に行なうシステムであり、「必要なものを、必要なときに、必要なだけ生産する」多品種少量生産に対応した IMS の典型例

*1 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

*2 労働安全衛生総合研究所 電気安全研究グループ

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 機械システム安全研究グループ

梅崎重夫*1 E-mail: umezaki@s.jniosh.go.jp

である。

しかし、いかに自動化したシステムでも、段取り、運転確認、トラブル処理、保守・点検、修理、清掃などの際には、作業者がIMS内に進入して作業を行う必要がある。このときに、人と機械の協調が不適切であると、両者が誤って接触して人身災害が発生する。したがって、IMSでは人と機械の協調制御の失敗を事前に予測して回避する適切なリスク低減戦略を必要とする。

この戦略を検討する場合、最初に重篤な災害が発生する可能性が高い特定のモデルを対象に検討を行ない、その結果を様々なシステムに水平展開して行くという方法が考えられる。本稿も、この観点から、IMSの中で特に重篤な災害が発生する可能性がある例として、プレス機械3台と搬送用ロボット4台が協調制御されているモデルを想定した(図1参照)。

このモデルで、ロボット(RNo.1)は加工材供給用のローダーであり、ロボット(RNo.4)は製品取出し用のアンローダーである。これらの機械の自動運転によって、材料置き場に置かれた加工材はローダー(ロボットRNo.1)によってプレス機械(PNo.1)に供給され、プレス機械(PNo.1~3)による加工とロボット(RNo.2及び3)による搬送を経て、最終的にはアンローダー(ロボット(RNo.4))によって製品置き場に自動的に搬出される。このとき、作業者はライン内に進入する必要はなく、ラインの外から機械の起動操作や停止操作を行なうことができる。

これに対し、作業者が機械の段取り、金型調整、トラブル処理、清掃などの作業を行なうときは、作業者がライン内に進入する必要がある。この進入場所(図1に記入した3ヶ所の縦方向の矢印)は、プレス機械(PNo.1からNo.3)の操作盤の横と仮定した。なお、通常、大型プレス機械は金型を自動交換するためにムービング・ボルスター(あらかじめ次の製品の金型が設置され、金型

交換時にはボルスターを金型設置場所に自動的に移動する装置)を備えている。しかし、これは図1のモデルを複雑とするので検討からは除外した。

3 危険状態の同定

図1のモデルで最も典型的な危険状態は、段取り、金型調整、トラブル処理、清掃などのために、作業者が機械を停止させてライン内に進入するという状態である。このときに他の作業者が誤って再起動操作を行うと、プレス機械やロボットが不意に起動して重大な災害を発生させかねない。

このため、実際のIMSでは、①作業者がライン内へ進入するときは機械の駆動源を確実に遮断するとともに、②作業者がライン内へ進入する場所にキー、プラグ、ロックアウト⁷⁾などを設置し、作業者の進入を間接的に監視してリスクの低減を図っている。ここで、ロックアウトとは、機械の起動装置にライン内に進入している人数分の鍵をかけることで第三者による誤った起動操作を防止する装置である。

しかし、キーやプラグは作業者による抜き忘れの問題がある。このため、作業者がキーやプラグを抜かなければ、インタロック式ガード⁷⁾が開かないようにして、ライン内に進入できない方式も開発されている。しかし、複数の作業者が1個のキーやプラグを抜いて一緒にライン内に入った後に(これを「供連れ」と呼んでいる)、キーやプラグを持った作業者だけがラインから出て来て、再びインタロック式ガードを閉めた後に再起動操作を行なったときは、この対策は有効でない。同様に、ロックアウトでも施錠を忘れるという問題がある。

また、複数の大型プレス機械が連動しているラインでは、ある工程のプレス機械のトラブル処理のためにライン内に進入した作業者が、他の工程のプレス機械のトラブルを発見して、その工程に直接移動することがある(こ

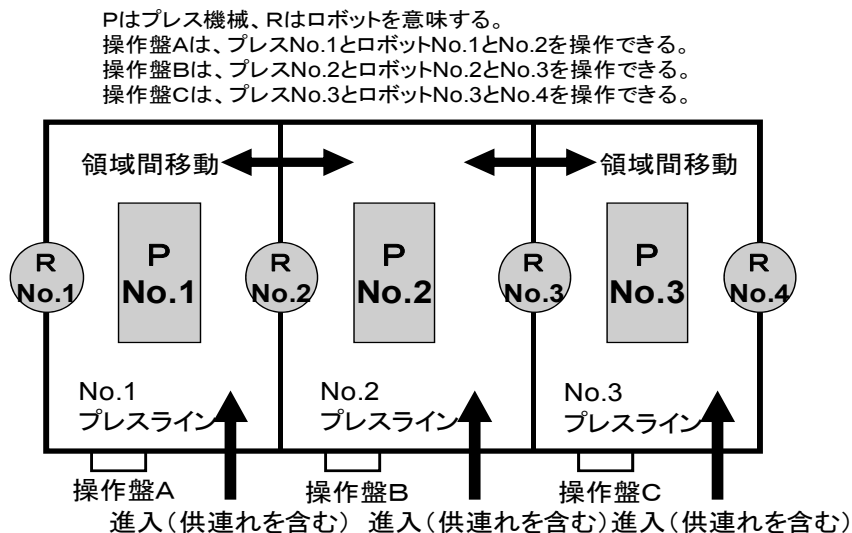


図1 統合生産システムの想定モデル

れを本稿では「領域間移動」と呼ぶ。図 1 に記入した 2ヶ所の横方向の矢印参照)。このときも、他の作業者が気づかないでプレス機械を起動させると、重大な災害を発生させかねない。

以上の「供連れ」と「領域間移動」という危険状態の存在は、従来から経験的に実施されている間接的な監視による保護方策（インタロック式ガード、キー、プラグ、ロックアウトなどを利用した方策）では、確実にない場合があることを示唆している。このため、筆者らは、これらの危険状態に対する対策として、RFID を使って作業者のライン内への進入を監視する研究や、作業者の存在位置を検出する研究なども併せて進めている⁸⁾。しかし、前者のシステムでは「供連れ」問題は依然として残留する。また、後者のシステムでは RFID の位置検出誤差が大きいため、IMS などの大規模システムには適用困難と考えられる。さらに、RFID を使ったシステムはフェールセーフ⁹⁾でないために、危険側故障の発生⁹⁾時に災害に至る可能性も考えられる。

本稿では、以上の点を考慮し、図 1 の IMS を対象にリスクマネジメント戦略の検討を行った。

4 保護方策のモデル化

1) 災害防止の基本式

一般に、機械災害は人体と機械の可動部が誤って接触し、かつ、このときに機械の可動部から人体に対して所定の値を越えたエネルギーが伝達したときに発生する¹⁰⁾。したがって、機械災害を防止するには、作業者の作業領域と機械の可動部の動作領域が重ならないようにするか（空間条件）、または、人体と機械の可動部が接触したときに機械の可動部から人体に対して伝達されるエネルギーを所定の値以下とする（エネルギー条件）ことが災害防止

の必要十分条件となる。

この関係は、作業者の作業領域を H_s （表 1 参照）、機械の可動部の動作領域を M_s （表 1 参照）で表し、人体と機械の可動部の接触があった場合に機械の可動部から人体に対して伝達されるエネルギーの最大値を E_w 、人体に傷害を及ぼさないことが確認できているエネルギーの最大値を ϵ_H とすると、次式で表すことができる。

$$H_s \cap M_s = \phi \text{ or } E_w \leq \epsilon_H \quad (1)$$

ただし、「 \cap 」は領域の積、 ϕ は空領域（重なりがない）を意味する記号である。

(1) 式は、作業者と機械の可動部が共同作業領域を持たないか ($H_s \cap M_s = \phi$)、または機械の可動部から人体に対して伝達されるエネルギーが人体に傷害を及ぼさないほど小さいときに ($E_w \leq \epsilon_H$)、災害が防止できることを意味している。

以後、(1) 式を災害防止の基本式と呼ぶ。

2) 空間条件の維持による災害防止

実際の作業では、作業者と機械の可動部が共同作業領域 ($H_s \cap M_s$) を持つ場合が大部分である。そこで、このような場合は、共同作業空間内に存在する作業者と機械の可動部の接触を早期に予測して回避することで災害の発生を防止する。以後、これを早期回避と呼ぶ。

この関係は、表 1 に示すように、時刻 t において作業者が現に存在している領域を $h_s(t)$ とすると、次のように表すことができる。

$$\forall t : h_s(t) \cap M_s = \phi \quad (2)$$

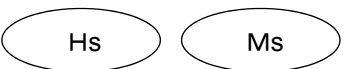
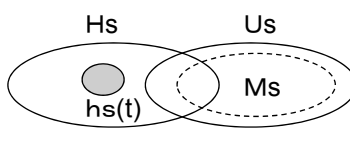
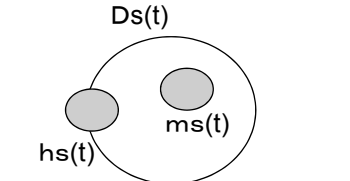
以後、(2) 式を災害防止のための空間条件と呼ぶ。

ただし、「 $\forall t$ 」はすべての t を意味する記号である。

3) 維持制御が失敗したときの災害防止

(2) 式を満足させるには、 $h_s(t) \cap M_s = \phi$ なる条件を維持する制御が必要である。しかし、実際には、維持制御

表 1 保護方策区分の類型

保護方策区分	類型	災害防止条件	関係図
0	エネルギーの制限	$E_w \leq \epsilon_H$	該当なし
1	領域の分離	$H_s \cap M_s = \phi$	
2	a 早期回避 (接触回避)	・ $h_s(t) \cap U_s = \phi$ のとき $W(t) = 1$	
	b 直前回避 (可動部の停止)	・ $h_s(t) \cap U_s \neq \phi$ のとき $W(t) = 0$	
3	a 危険点近接 可動部の移動速度の抑制	・ $h_s(t) \cap D_s(t) = \phi$ のとき $W(t) = 1$	
	b 危険点近接 人体の移動速度の抑制	・ $h_s(t) \cap D_s(t) \neq \phi$ のとき $W(t) = 0$	

の失敗によって作業者と機械の可動部が同一時刻において同一領域内に存在しそうになることがある。このときは直ちに可動部を停止させて、作業者に危害が及ばないようにする必要がある。

この関係は、時刻 t における機械の可動部への運転命令を意味する 2 値論理変数を $W(t)$ で表し、機械への運転実行命令を $W(t) = 1$ 、運転停止命令を $W(t) = 0$ とすると、次式で表すことができる。

$$h s(t) \cap M s = \phi \text{ のとき } W(t) = 1 \quad (3)$$

$$h s(t) \cap M s \neq \phi \text{ のとき } W(t) = 0 \quad (4)$$

(4)式では、機械は瞬時に停止すると仮定している。しかし、実際には、機械の停止にはある程度の時間を必要とする。そこで、人間が領域 $M s$ 内に到達する時点で確実に機械の可動部を停止できるように、機械に停止命令を与えてから実際に停止するまでの間に人間が移動する最大距離を $M s$ に付加した領域を $U s$ とする(表 1 参照)。

これより、(3)式と(4)式は次のように変更できる。

$$h s(t) \cap U s = \phi \text{ のとき } W(t) = 1 \quad (5)$$

$$h s(t) \cap U s \neq \phi \text{ のとき } W(t) = 0 \quad (6)$$

以後、領域 $U s$ を危険区域と呼ぶ。

4) 危険点近接作業における災害防止

実際の IMS では、作業者が機械の可動部を停止させずに、可動部に近接して行く運転確認、調整、加工、トラブル処理、保守・点検、修理、清掃などの作業がある。以後、これらを危険点近接作業と呼ぶ。この具体例に、ロボットのマニピュレータに近接して行く修理作業やロール機に近接して行く清掃作業などがある。

これらの作業の多くは、作業者が領域 $U s$ 内に進入して行く。このとき、 $h s(t) \cap U s \neq \phi$ となるから災害を防止できない可能性がある。そこで、このときの災害防止

条件を一般的に示すために、時刻 t において機械の可動部が現に存在している領域を $m s(t)$ で表すと、(3),(4)式は次のように変更できる。

$$h s(t) \cap m s(t) = \phi \text{ のとき } W(t) = 1 \quad (7)$$

$$h s(t) \cap m s(t) \neq \phi \text{ のとき } W(t) = 0 \quad (8)$$

ここで、(5),(6)式と同様に $m s(t)$ に付加して $D s(t)$ を設けると(表 1 参照)、(7)式と(8)式は次のように書き改めることができる。

$$h s(t) \cap D s(t) = \phi \text{ のとき } W(t) = 1 \quad (9)$$

$$h s(t) \cap D s(t) \neq \phi \text{ のとき } W(t) = 0 \quad (10)$$

以後、領域 $D s(t)$ を危険点近接区域と呼ぶ。

図 2 に、危険点近接区域の概略を示す。この図では、検討を簡単にするために、機械の可動部はプレス機械のスライドのように直線運動(図の z 方向)を行い、手指は機械の可動部の運動方向に対して直角に(図の y 方向から)接近するものと仮定する。なお、同様の検討はロボットに対しても可能であるが、これは三次元的な検討を必要とするために本稿では省略する。

図で、災害を防止するには次のいずれかの条件を満足する必要がある。

- (a) 作業者の手指が機械の可動部の直下に到達する前に、機械の可動部が停止する。
- (b) 作業者の手指が機械の可動部の直下に進入した場合でも、人体を圧碎しない隙間 c 以上を残して機械の可動部が停止する。

ここで、時刻 t での機械の可動部の移動速度を $v_M(t)$ 、作業者の手指の移動速度を $v_H(t)$ 、機械が制動を開始する時間を t_0 、機械の停止に要する時間を Δt_B とすると、災害防止の条件は次式で表現できる。

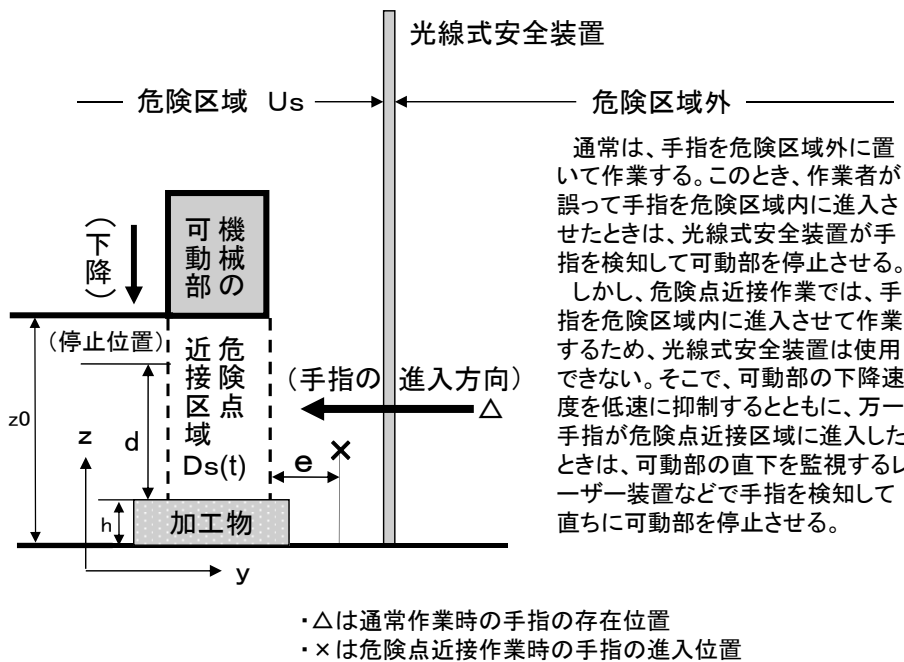


図 2 危険区域と危険点近接区域

$$\int_{t_0}^{t_0+\Delta t} v_M(t) dt < c \quad (11)$$

$$\int_{t_0}^{t_0+\Delta t} v_H(t) dt < e \quad (12)$$

ただし、 $c = z_0 - d - h$ で、 z_0 は時刻 t_0 における可動部の下端の位置、 h は加工物の厚さ、 d は人体の圧砕危険を回避するために ISO13854¹⁾¹⁾(機械の安全性—人体各部の圧砕の危険を回避する最小の間隔)に規定された最小隙間である。また、 e は時刻 t_0 における手指の位置と危険点近接区域間の直線距離を意味する(図2参照)。本稿では、 e を離隔距離と呼ぶ。

5) 保護方策の類型化

表1は、以上の検討結果を考慮して保護方策を類型化した結果である。以後、これを保護方策区分と呼ぶ。この表の中から作業形態に応じた最適な保護方策を選択することで、適切な災害防止対策の実施が可能となる。

5 リスク評価手法の提案

1) リスクの定量的評価手法の概要

次に、本プロジェクト研究で重点とするリスクの定量化手法の概略を述べる。災害の多発している機械作業で労働災害を大幅に減少させるには、リスクの高い作業から優先的に対策を実施することが効果的である。しかし、現状では、リスクの定量化に主眼を置いた手法が機械安全分野では十分確立していないために、現場の安全管理の担当者などの意志決定に困難を生じている。

そこで、機械作業のリスク低減戦略を支える重点技術として、主に機械設備を使用する製造業の現場を対象に、各機械または現場単位のリスクを事前に定量評価できる手法の確立を試みた。

具体的には、次の手法を対象に研究開発を進めた。

(a) 演繹的推定

人間機械作業システムに安全確認形インタロックを適用したときの危害の発生確率の低減効果をマルコフ解析を利用して定量的に推定する(付録1参照)。

(b) 帰納的推定

機械の種類ごとに過去数年間に発生した労働災害の労働損失日数を集計し、機械ごとに危害の発生確率と重篤度を定量的に推定する。この推定は死亡、障害、及び休業災害のすべてに対して行う(付録2参照)。

(c) 簡易推定

(d) リスクレベルを巨視的評価(I~III)と微視的評価(1~20)の組み合わせによって定量的に推定する。前者は保護方策、後者は管理的対策の効果を示す。

以上のうち、本稿では(c)の簡易推定によってリスク評価を試みる。ただし、本プロジェクト研究の成果としては(a)の演繹的推定と(b)の帰納的推定の手法も重要であるので、付録1及び2に概要を示した。

2) 簡易推定に基づくリスク評価

実際のリスク評価では評価結果を次の3種類に区分すると都合が良い。以後、これをリスク管理区分と呼ぶ⁵⁾。

各区分は、次のような意味を持つ(図3参照)。

(a) 区分I: 明らかに適切なレベルまでリスクが低減されている(「安全」に対応)。

(b) 区分III: 明らかに適切なレベルまでリスクが低減されていない(「危険」に対応、原則作業禁止。やむを得ない場合に十分な熟練を有する者が特別に管理された状態で作業を実施する)。

(c) 区分II: 区分IまたはIIIと判定できないもので、合理的に可能な限りリスクが低減されている(「ALARP」に対応: As low as reasonably practicableの略)。

実際の災害防止対策では、保護方策はリスク管理区分をIIIからIへ遷移させるなど、顕著なリスク低減効果を持つことが多い。これに対し、人の注意力に依存する管理的対策では、多くの場合顕著なリスク低減効果は期待できない。しかし、このような場合でも、そのリスク低減効果を適切に評価する手法は必要である。また、リスク評価では、評価者の主観によって評価がばらつくことがある。したがって、評価手法はこのばらつきに配慮した手法でなければならない。

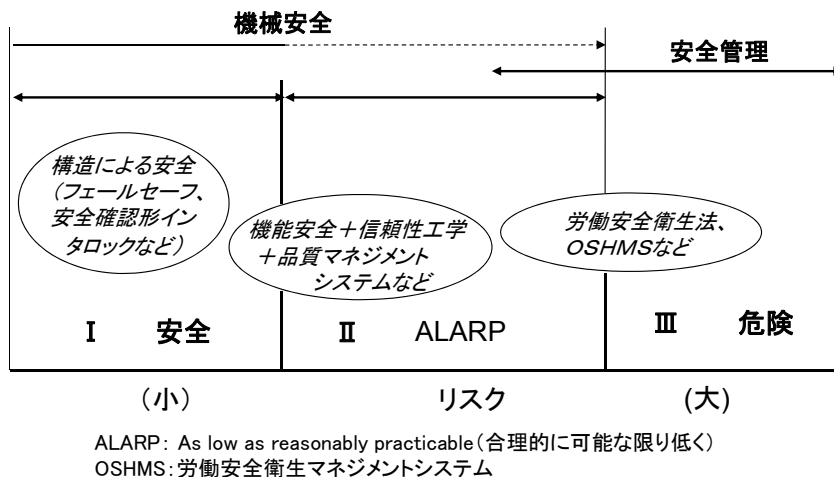


図3 リスク管理区分の意味

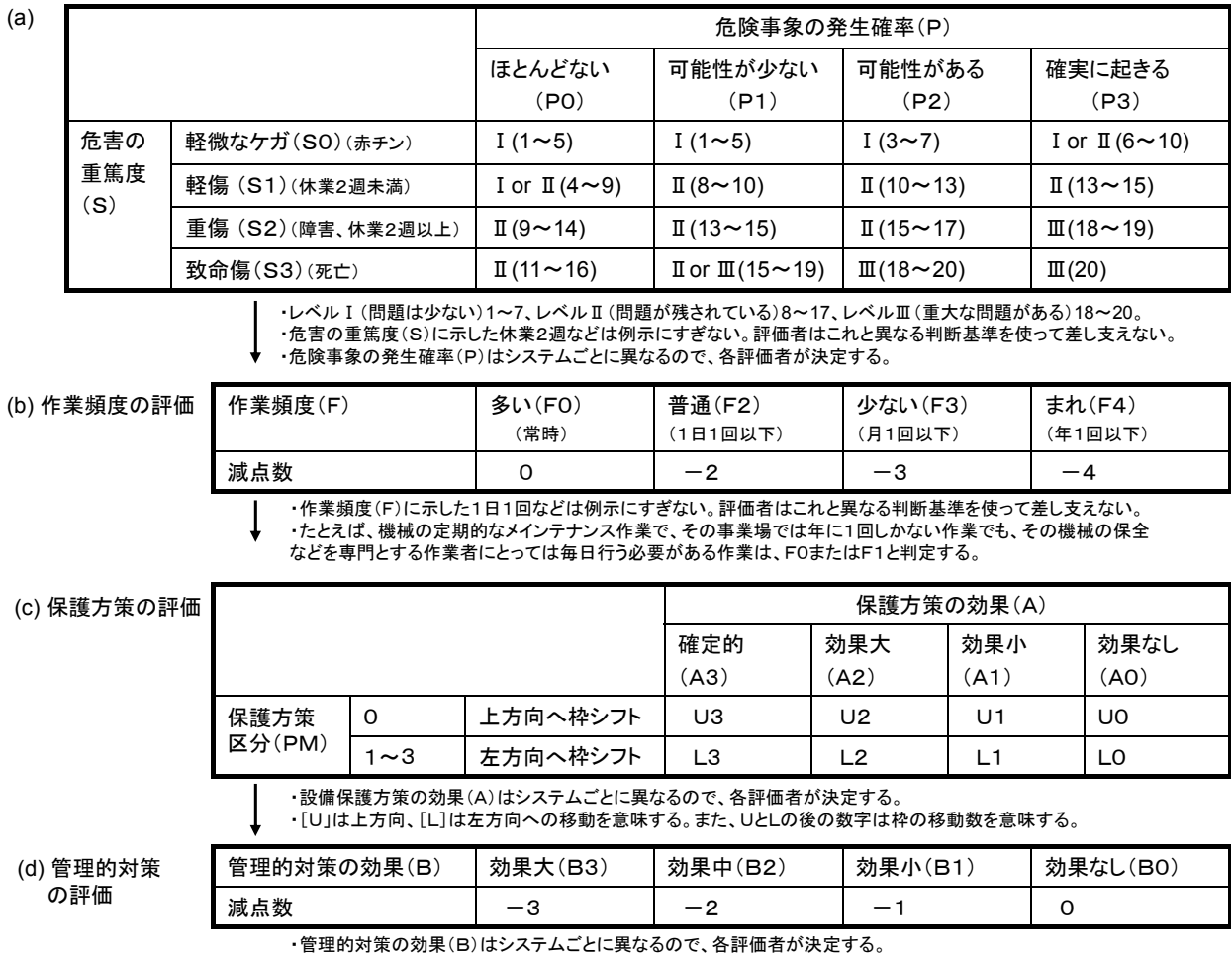


図4 リスク管理区分の決定法

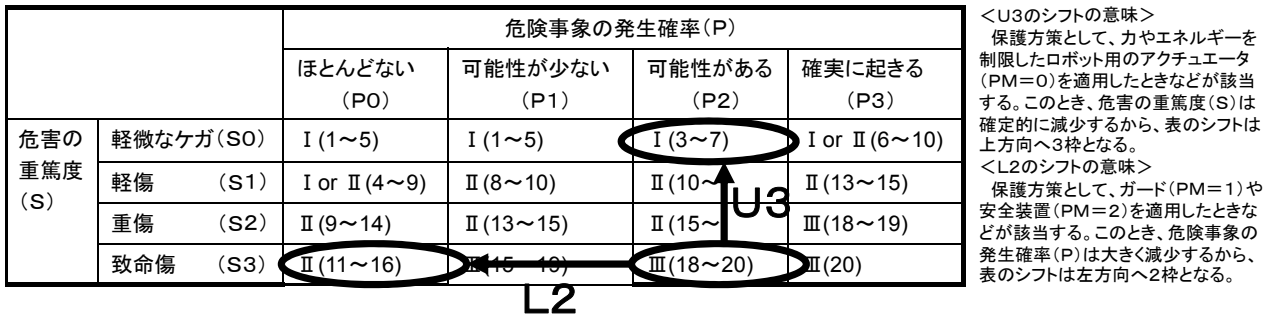


図5 保護方策の効果を意味するシフト

図4及び図5は、以上の点を考慮して筆者らが提案する新たなリスク評価手法である。この手法では、リスクレベルを巨視的評価 (I~III) と微視的評価 (1~20) の組み合わせによって (たとえば、II (15) などの表記) 表現している。また、図5では、保護方策の効果をマトリックス表上のシフト移動として表し、リスク低減の顕著な効果を表現している。これに対し、管理的対策のリスク低減効果は人の注意力に依存するために、その効果には明らかに限界がある。このため、本評価表では、管理的対策の効果は微視的評価指標を最大3だけ減点する効果に過ぎないとした。

なお、微視的評価で (9~14) などと幅を有するようにしたのも、リスク評価に含まれる不確定性 (ばらつき) を考慮したためである。この場合、評価者は設定されたばらつきの範囲内で評価者が最適と考える数値を選択する (たとえば、図4のII (9~14) からII (11) を選択するなど)。

6 リスクマネジメント戦略の提案

1) 総括表を利用したマネジメント戦略

次に、以上の評価手法を実際のリスクマネジメント戦略に適用する。この戦略では、システムティックな手法を採用しないと、戦略の実施は困難を極める。そこで、

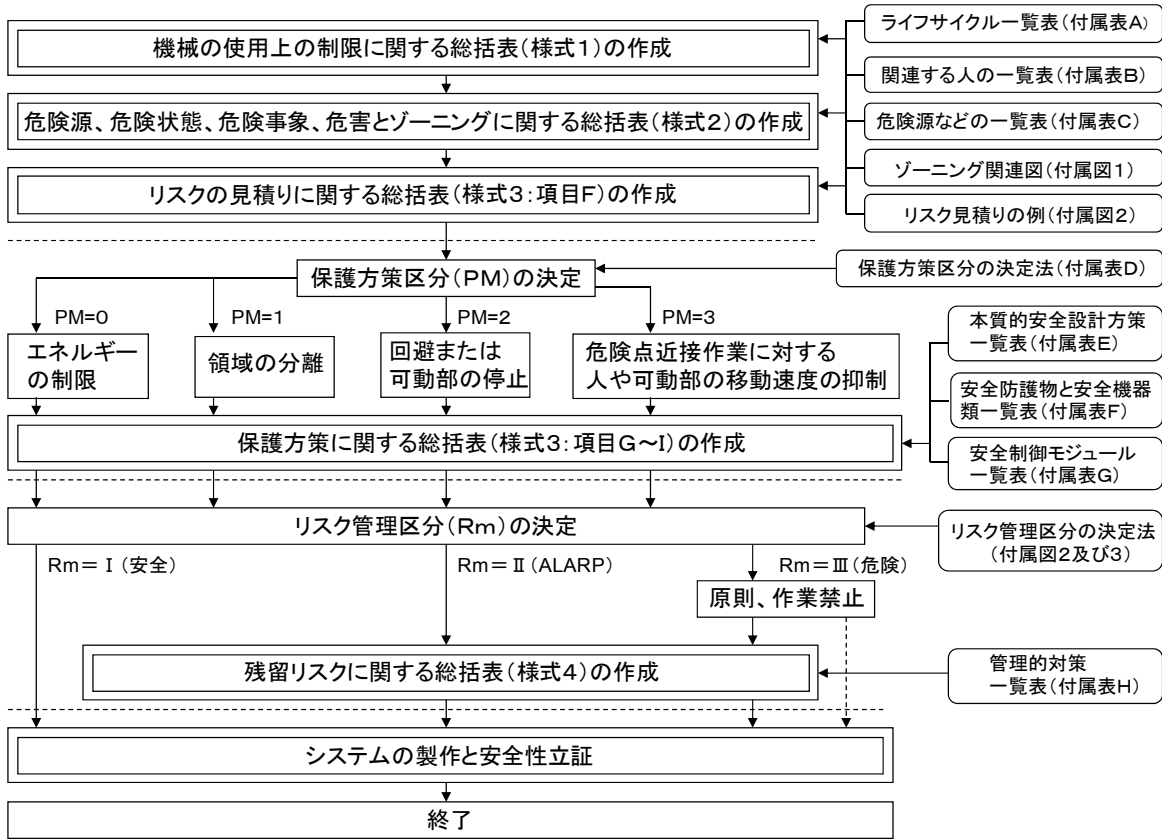


図6 統合生産システムのリスク低減戦略

図6のプロセスに従って様式1から様式4(表2~5参照)を順番に埋めていくだけで、安全要求事項の抽出が完了するように手順を設定した。以下、特徴を示す。

2) 戦略の概要

(1) 安全要求事項抽出の容易化

設計者などが、様式1から様式4の総括表(表2~5参照)を埋めるだけで、比較的容易に機械の安全要求事項を抽出できる方式を採用した。このうち、様式1は使用上の制限、様式2は予想される危害と人と機械の空間的關係、様式3は保護方針、様式4は残留リスクに対する管理的対策を記述する。さらに、これらの様式の作成を支援するため、付属表A~Hおよび付属図1~3を備えている。

(2) 保護方針と安全性立証の容易化

設計者などが、あらかじめ安全性が立証された基盤技術や基本モジュール(付属表E~Gに記載)を組みあわせることで、比較的容易に保護方針を実施できるように配慮した。この方法は、機械の安全性立証(認証)を容易化できるだけでなく、保護方針の実施時における生産性向上策としても効果的と考えられる。

(3) 残留リスク対策の明確化

前述のように、リスク管理区分という概念を導入することによって、保護方針後の残留リスクレベルの明確化を図れるようにした。また、設計者などが様式4の総括表を埋めるだけで、比較的容易に残留リスク対策の明確化を図れるように配慮している。

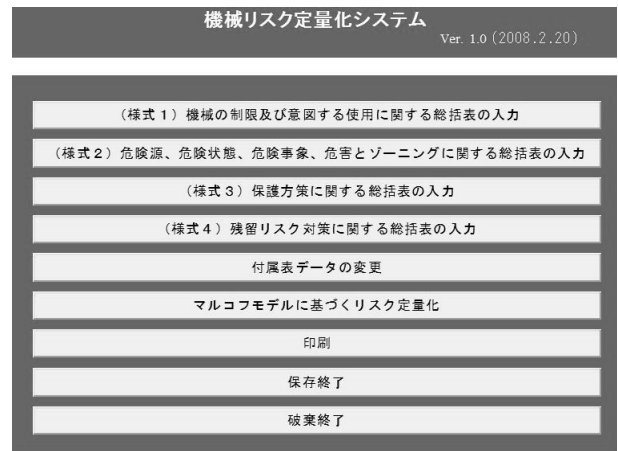


図7 システムのトップ画面

3) リスク低減戦略の実施支援システムの試作

以上のツールを利用してリスク低減戦略の実施を容易化するための支援システムを試作した。図7に、システムのトップ画面を示す。図6に示したリスク低減戦略の流れのとおり、上から順に実行して行くことで、様式1から順に総括表への記入が行われるプロセスとなっている。

本システムの基本構成図を図8に示す。本システムの基本ソフトにはMicrosoft Excelを採用し、図7に示した各種様式や付属表をExcelのシート上に実装した。このシートに必要な事項を記入することで、一連のリスク低減戦略を実施できるようになっている。

基本ソフトにExcelを選定した理由は、現在、多くの

表2 統合生産システムにおける機械の制限及び意図する使用に関する総括表(様式1)

項目	機械の制限及び意図する使用	
機械の種類、製造者、型式またはモデル、製造年	プレス機械、〇〇製作所製、PRS1、昭和58年製	
機械の使用目的または用途	統合生産システムにおける加工(プレス)用機械として使用	
ライフサイクル	段取り、加工、運転確認、トラブル処理、保守・点検、修理、清掃など	
機械の仕様	可動部の種類、寸法、重量	金型(幅Om×奥行Om×高さOm, 重量Δkg)またはスライド(幅Om×奥行Om)
	動作範囲	付属図1記載
	可動部を駆動する駆動源の種類、能力など	油圧式(油圧ポンプ)
	可動部の加工能力、移動速度、回転数など	加圧能力5000KN、スライドの最大下降速度 Om/sec
	運転モードの種類	寸動、安全一行程、連続
	可動部の操作方法	両手操作式
	製品寸法(縦×横×高さ)と重量(kg)	縦Om×横Om×高さOm, 重量Δkg
	機械本体の寿命	約〇年
	交換すべき部品と交換間隔	部品A:6ヶ月、部品B:1年、部品C:3年
	設置場所の制約条件(設置スペース、床強度など)	設置スペース 縦Om×横Om×高さOm, 床強度 Okg/m ²
物理的環境の制約条件(温湿度、衝撃・振動、ノイズ、外乱光、塵埃など)	騒音や振動が大きいため遮音ガードを設置。無線操縦式のクレーンが周辺を走行。すぐ横に有機溶剤を使用する塗装工程あり。	
他の機械とのインターフェース	ロボットとの協調を考慮した制御システムの安全関連部が必要。	
人の条件	人の種類と職制、人数	作業主任者1名、一般作業員2名が作業に従事。いずれの者もトラブル処理などのためにライン内に進入する。その他、保全作業員、金型技術者、生産技術者などもライン内に進入することがある。
	作業領域	付属図1記載
	作業の具体的内容	作業主任者や一般作業員:段取り、加工、運転確認、トラブル処理、清掃など。 保全作業員:保守・点検、修理など。生産技術者や金型技術者:設備や金型の点検など。
	作業員の経験年数、技能の程度、資格など	作業主任者(経験8年)、一般作業員(経験1年と3年)、経験1年の作業員はやや未熟練
複数作業員間の連絡調整と役割分担	原則として作業主任者が実施。作業主任者不在のときは経験3年の熟練作業員が連絡調整に従事。	
機械の通常の使用(具体的)	作業主任者や一般作業員がラインの外から機械を操作して自動運転を行なう。	
人による予見可能な誤使用(具体的)	人がライン内に進入しているときに他の作業員が機械を再起動。作業員の供連れ。領域間移動	
機械または制御システムの安全関連部の故障、不具合時の挙動(具体的)	制御システムの安全関連部の危険側故障によって機械が不意に起動したり、運転中の機械が止まらなくなる。	

注) 例示のため、簡略化して記載している。

表3 統合生産システムの危険源、危険状態とゾーニングに関する総括表(様式2)

A 機械の名称	B 作業のライフサイクルまたは作業内容	C 作業員	D			E		
			D1 起因物	D2 危険状態または危険事象	D3 危害	E1 ヒューマン・ゾーン	E2 マシン・ゾーン	E3 協調ゾーン
プレス機械	トラブル処理作業	作業主任者、一般作業員、保全作業員、生産技術者、金型技術者など	金型またはスライド	・人がライン内に進入しているときに、他の作業員が誤って機械を起動する。 ・作業員の一人だけがキーを持った状態で、複数の作業員が同時にライン内に進入する(供連れ)。 ・特定の工程から進入した作業員が他の工程に移動する(領域間移動)。	作業員が金型またはスライドに挟まれる。	図1上に記載する	図1上に記載する	図1上に記載する
.

注1) ヒューマン・ゾーンは人の種類ごとに分けて記載する。マシン・ゾーンでは危険区域、危険点近接区域の区別や、安全距離、最小隙間なども考慮する。

注2) ゾーニングは、表1に記載した保護方策区分における空間的関係も考慮して検討する。

表4 統合生産システムの保護方策に関する総括表(様式3)

A 機械の名称	B 作業のライフサイクルまたは作業内容	C 作業員	F 保護方策実施前のリスクの見積り				G 保護方策				H 保護方策実施後のリスクの見積り	I 機械の使用者に提供する使用上の情報の内容(取り扱い説明書、警告・表示、製造者による訓練など)	
			S 重篤度	F 作業頻度	P 発生確率	R リスク管理区分	G1 保護方策区分	G2 本質的安全設計方策またはフォールト・トレラント方策	G3 安全防護物(ガードまたは保護装置)の適用	G4 制御システムの安全関連部			A 設備保護方策の効果
プレス機械	トラブル処理作業	作業主任者、一般作業員、保全作業員、生産技術者、金型技術者など	S3	F2	P3	III (18)	2a または 2b	・通常作業時の自動運転による本質的安全設計方策(自動化) ・RFIDを利用した識別システムで、指名者以外をライン内に進入させないフォールト・トレラント対策	・電磁ロック式の可動式ガードの適用 ・キースイッチと監視装置(マット、光線など)を併用した安全確認形インタロックシステムの適用	異種冗長化された汎用安全コントローラと認証済の制御モジュールの適用によって、カテゴリー4(JISB9705参照)の故障対策の実施	L2	II (11~16)	作業標準、操作マニュアル、特別教育など
.

事業場においてリスクアセスメントの実施に Excel が使 やすいように配慮したものである。
用されていることから、既存の情報資産との連携がとり

機械作業を対象とした安全設計支援システムの開発

表5 統合生産システムの残留リスク対策に関する総括表 (様式4)

A 機 械 の 名 称	B 作 業 の ラ イ フ サ イ ク ル ま た は 作 業 内 容	C 作 業 者	J 残 留 リ ス ク の 明 確 化	K 管 理 的 対 策 実 施 前 の 残 留 リ ス ク の 見 積 も り				L 管 理 的 対 策 の 内 容	M 管 理 的 対 策 実 施 後 の 残 留 リ ス ク の 見 積 も り		N 備 考 (管 理 的 対 策 の 実 施 後 も 残 留 す る 重 大 リ ス ク、 機 械 の 使 用 者 か ら 設 計 ・ 製 造 者 へ の 要 望 な ど)
				重 篤 度 S	作 業 頻 度 F	発 生 確 率 P	リ ス ク 管 理 区 分		管 理 的 対 策 の 効 果 B	リ ス ク 管 理 区 分	
プ レ ス 機 械	ト ラ ブ ル 処 理 作 業	作 業 主 任 者、 一 般 作 業 者、 保 全 作 業 者、 生 産 技 術 者、 金 型 技 術 者 な ど	・ラインへの進入場所に監視装置 (マット、光線など)を設けても、 正確な人数のカウントができない ために供連れを見逃すことがあ る。 ・供連れや領域間移動の警報のリ セットは、リセット権限を持たな い作業者でも行える。また、リセッ ト権限を持つ作業者でも、リセッ トと再起動操作は人の注意力に依 存した作業である。	S 3	F 2	P 0	Ⅱ (11~16)	作 業 標 準、 操 作 マ ニ ュ ア ル、 特 別 教 育 な ど	B 3	Ⅱ (12)	
.

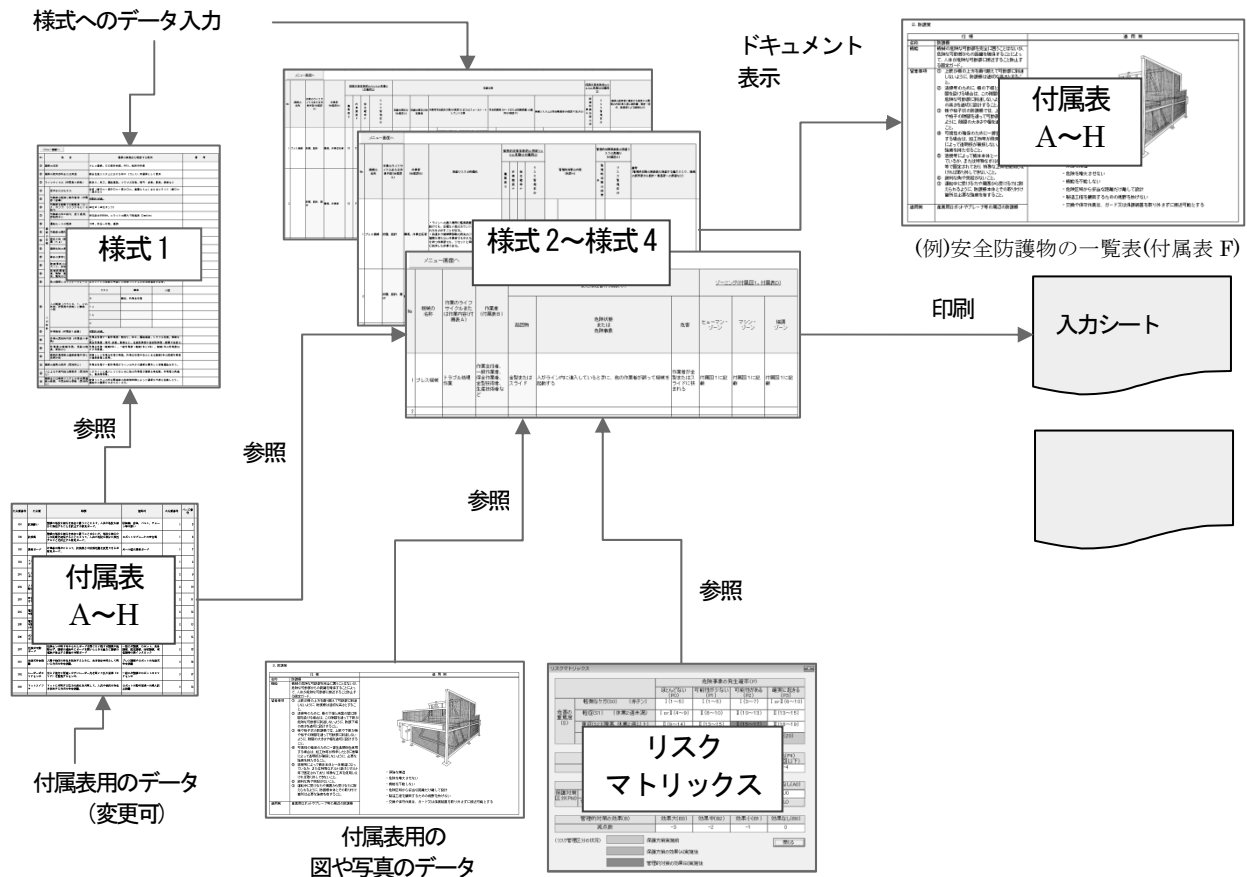


図8 システム構成図

4) 試作システムによるリスク評価の具体例

次に、図1に示した想定モデル(プレス機械とロボットが連動している自動ライン)で行なうトラブル処理作業を対象に、リスク評価の具体的手法を示す。以下、リスク管理区分(図3参照)にて、どのようにリスクの評価値が変化していくか具体的に示す(図9参照)。

(a) 初期のリスク管理区分

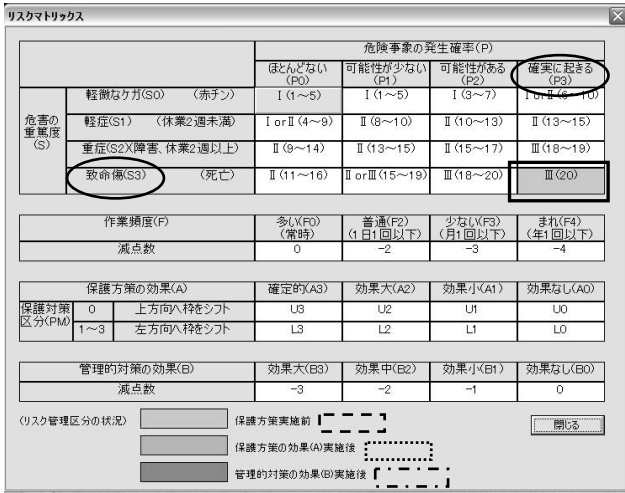
この事例では、危害の発生時は最悪の場合、死亡災害となる可能性がある(S3が該当)。また、危険事象の発

生確率も作業者がシステムの内部に進入してトラブル処理などの作業を行なう際は非常に高いと考えられる(P3が該当)。このため、初期段階におけるリスク管理区分をⅢ(20)と判定した。

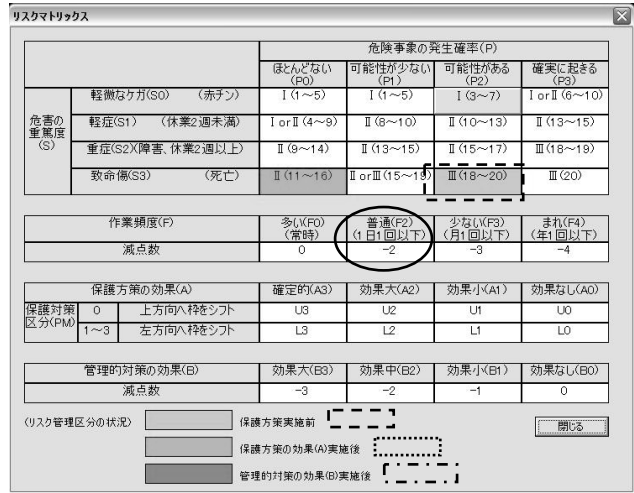
システムにおけるリスク管理区分の画面を図9(a)に示す。S3およびP3が楕円で、Ⅲ(20)が太線枠で示されている。

(b) 作業頻度考慮時のリスク管理区分

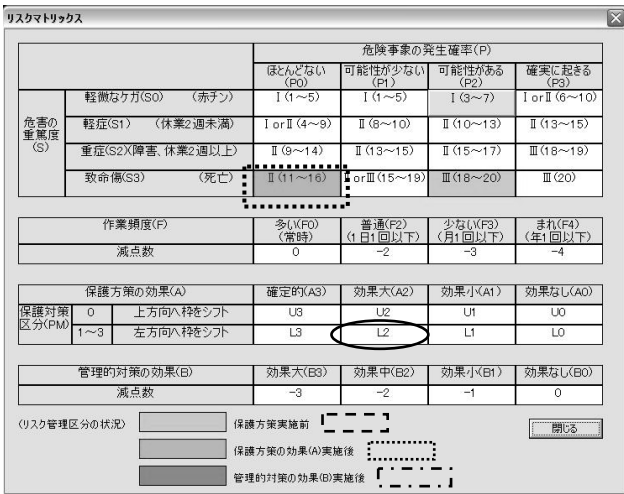
この事例のラインは自動化されているために、システ



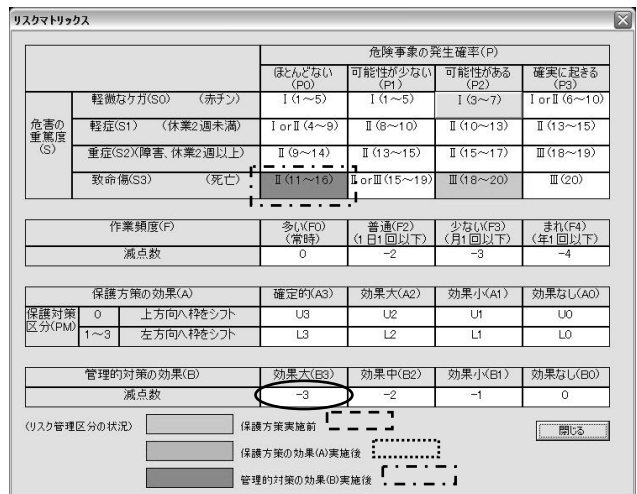
(a) 初期のリスク管理区分 (——— 線枠で囲まれた区分)



(b) 作業頻度考慮時のリスク管理区分 (----- 線枠)



(c) 保護方策適用後のリスク管理区分 (..... 線枠)



(d) 管理的対策実施後のリスク管理区分 (— · — 線枠)

図9 リスク管理区分の遷移

ム内の作業頻度は1日1回以下と想定される (F2 が該当). この点を考慮し, 数値を2だけ減点し, リスク管理区分をIII (18)と修正した. これは, 図9(b)のリスク管理区分画面にて, 破線枠で表示されている. 上記(a)と比べ, リスク管理区分が左に1つシフトしていることがわかる. なお図9(b)の楕円は作業頻度F2を示している.

(c) 保護方策適用後のリスク管理区分

保護方策として, ラインの入口に電磁ロック付きインタロック式ガードを適用する. また, キースイッチと監視装置を併用した安全確認形インタロックシステムを適用する. これらの装置は, 保護方策区分がPM=2に該当するから(表1の保護方策区分2), 保護方策の効果は図4(a)の表に対して左シフト側となる.

また, これらの装置は人のライン内への進入という危険状態に対して保護効果があるから, 効果大 (A2) と考えられる. そこで, 保護方策の効果をもとにL2と判定した. これより, リスク管理区分は図9(a)の表の枠を左方向に2だけシフトし, II (11~16)となる. 図9(c)に, 保

護方策の効果をもとに楕円, 保護方策適用後のリスク管理区分を点線枠で示す. 図9(b)と比較すると, 保護方策適用前後でリスク管理区分が, 変化していることがわかる. (d) 管理的対策実施後のリスク管理区分

教育・訓練などの管理的対策の効果を図9(d)にしたがって効果大とする (B3に相当). 以上を総合的に判断し, リスク管理区分を最終的にII (12)と判定した. このときのシステム画面の様子を図9(d)に示す. 管理的対策の効果が楕円, 管理的対策適用後のリスク管理区分が一点鎖線枠で示されている.

なお, 図9(a)~(d)に示すように, この事例での保護方策では, 危害の重篤度は下げられない. また, 管理的対策の実施後も, リスク管理区分は保護方策適用後のII (11~16)に留まる.

もし, リスク管理区分をこれよりもさらに低いレベル (現在の表示位置よりも上方の区分)にシフトしたい場合は, 適用する保護方策は区分0 (エネルギーの制限)のものを採用しなければならない. このように, 本システムでは, 保護方策と管理的対策の効果を数値的に表現し,

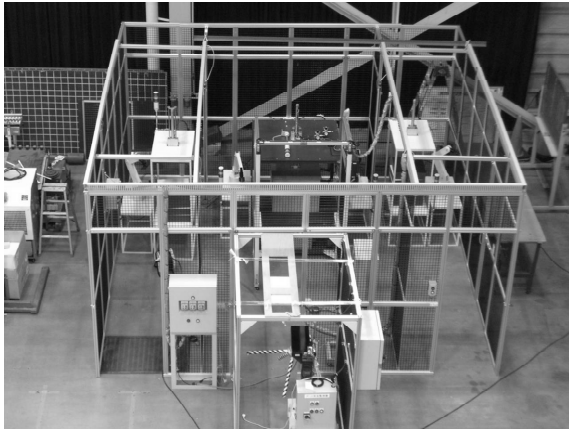


写真1 統合生産システムの保護方策の検討モデル

演算方法を規定したことで、リスク低減対策の効果を視覚的に把握することが可能となっている。

5) 試作システムの今後

図6に示す付属表や付属図は、様式にデータを記入する際に参照する辞書的性格を有するデータである。現在、これらのデータはシステムとは別のファイル(Excelブック)として保有させている。

しかし、こうした辞書的なデータは、情報を集約してデータベース化することで、本システムだけでなく、他の安全システムからも使用が可能となる。そこで現在、データベース化の準備を進めている。今後は、本システムの様式作成画面からデータベースを直接参照する仕組みを構築する予定でいる。

7 おわりに

以上、IMSを対象としたリスクマネジメント戦略のあり方を考察した。この検討によって得られた成果は次のとおりである。

- 1) IMSでは、①人のライン内への進入だけでなく、②人による機械の誤った再起動操作、③複数の人が同時にライン内に進入する供連れ、④ライン内を複数の小領域に分割したときの人の領域間移動なども危険状態として考慮する必要がある。
- 2) 危険状態が数多く存在すると、安全要求事項の抽出や制御システムの安全関連部の構築には困難を極める。そこで、設計者などが様式1から様式4の総括表を埋めるだけで、比較的簡単にシステム設計に必要な安全上の要求事項を抽出できる方法を提案した。
- 3) 上記の方法では、リスク管理区分、保護方策区分、危険点近接作業などの新たな概念を導入することによって、新たなリスクマネジメント戦略の構築を試みた。この方法にしたがって、あらかじめ安全性が立証されたモジュールを組み合わせることでシステムを構築するならば、安全性立証(認証)を容易化できるだけでなく、安全システム構築時における生産性向上策としても効果的と考えられる。
- 4) 以上の成果は、ISO11161¹⁾²⁾(統合生産システム

—基本要素事項)の見直し作業にも活用できる。

今後は実際のシステムに本提案を適用し、その妥当性を検証するとともに精緻化を図って行きたい。

謝辞

本研究では、平田機工株式会社の木下博文氏、セーフティプラスの平沼栄浩氏、及び日本機械工業連合会の石坂清氏と宮崎浩一氏の助言を頂いた。紙上を借りてこれらの諸氏に深い謝意を表する。

参考文献

- 1) ISO12100:2010, Safety of machinery, general principles for design – Risk assessment and risk reduction –
- 2) 梅崎重夫, 清水尚憲, 齋藤剛, プレス作業の労働災害分析と災害防止対策の考察, 労働安全衛生研究, Vol.1, No.2 (2008) 111-118
- 3) 梅崎重夫, 清水尚憲, 危険点近接作業の災害防止戦略に関する基礎的考察, 日本機械学会論文集, Vol.71, No.711, C編 (2005) 200-207
- 4) 梅崎重夫, 清水尚憲, 深谷潔, 複数作業者が大規模生産ライン内で行なう作業を対象とした災害防止戦略の基礎的考察, 日本機械学会論文集, Vol.71, No.709, C編 (2005) 2832-2840
- 5) 梅崎重夫, 濱島京子, 清水尚憲, 宮川高志, 人間機械作業システムにおける危害の発生確率の発生確率の定量的評価手法の提案—英国HSEが示したリスク管理目標の達成手法に関する考察—, 労働安全衛生研究, Vol.3, No.1 (2010) 27-36
- 6) 梅崎重夫, 清水尚憲, 濱島京子, 木下博文, 平沼栄浩, 宮崎浩一, 石坂清, 統合生産システム(IMS)におけるリスク低減戦略の基礎的考察, 労働安全衛生研究, VOL.1, No.3 (2008) 219-229
- 7) 清水尚憲, 梅崎重夫, 池田博康, 生産システムで使用される安全手段の仕様調査, 産業安全研究所特別研究報告, NIIS-SRR-No.19 (1999) 25-77
- 8) Shoken SHIMIZU, Shigeo UMEZAKI, A proposal of the comprehensive risk reduction method for hazardous point nearby operation – the development of safety system for wood processing machines-, Safety of Industrial Automated Systems(SIAS) (2005) CDROM
- 9) これからの安全技術—工作機械等の制御機構のフェールセーフ化に関するガイドラインの解説—, 中央労働災害防止協会 (2000)
- 10) ハイソリッヒ, 産業災害防止論, 海文堂 (1982)
- 11) ISO13854, Safety of machinery – Minimum gaps to avoid crushing of parts of the human body (1996)
- 12) ISO1161, Integrated manufacturing system-Basic requirement, 2007/CD Amd1:2008-5 (2008)
- 13) 梅崎重夫, 杉本旭, 中村英夫, 産業機械の安全方策に関する基礎的考察—リスク評価に含まれる不確定性を考慮した安全方策の提案—, 日本信頼性学会誌, Vol.23, No.7 (2001) 659-67

「付録 1」

本研究で提案するリスク管理目標では、労働者一人あたりの死亡労働災害の発生確率を無災害レベルに相当する 10^{-11} 回/h 未満に設定している。しかし、この目標値を達成する具体的な方法論は必ずしも明確でない。そこで、人間機械作業システムにおける危害の発生確率をマルコフ解析の利用によって定量的に推定できる評価式を提案した。この手法の提案にあたっては、特に次のような点に留意した。

1) モデルが複雑になると直感的理解が困難となり、解析に伴う誤りの発見が難しい。そこで、解析式を線形で表現し、直感的理解が可能となるようにする。これは、解析結果の妥当性を検証するとき大変重要である。

2) リスク評価には必ず“不確かさ”が伴うが、これを適切に処理する方法が確立していない。そこで、“安全とも危険とも判断できない不確かなものはすべて危険と判断する”という基本原則にしたがって、不確かさに対しては安全側の評価を行う¹³⁾。

次式は、以上の点を考慮した上で提案する危害の発生確率 U の評価式である。

$$U = K \cdot [W_F] \cdot [\beta / (N+1)] \cdot [(\lambda \eta \tau)^N] \cdot [H_L] + (1 - K) \cdot [W_F] \cdot [H_L]$$

ここで、 K は全災害防止対策の中で保護方策によって

対応できる割合、 $\beta / (N+1)$ は危険事象の発生確率、 W_F は作業頻度、 $(\lambda \eta \tau)^N$ は保護方策の効果、 H_L は管理的対策の効果に対応するパラメータである。

ただし、 β : 危険事象の発生確率 (回/h)、 λ : 保護装置を含む制御システムの安全関連部の不信頼度 (回/h)、 η : 制御システムの安全関連部の非対称誤り率 (回/回) (すべての誤りに対して危険側となる誤りの割合をいう)、 τ : 制御システムの安全関連部のチェック間隔 (h)、 N : 制御システムの安全関連部の異種冗長度、 W_F : 作業頻度 (全時間の中で作業を行なう時間の比率。単位は時間/時間)、 H_L : ハインリッヒの法則として一般的に知られている不確定性 (回/回) を意味する。

「付録 2」

労働損失日数 L は次の式で計算する。

$$\begin{aligned} L = & \text{死亡災害の発生件数 (件)} \\ & \times (\text{死亡時の労働損失日数である 7,500 日}) \\ & + \text{障害を伴う災害の発生件数 (件/年)} \\ & \times \text{障害を伴う災害の平均労働損失日数 (日)} \\ & + \text{休業災害の発生件数 (件/年)} \\ & \times \text{休業災害の暦日の平均休業日数 (日)} \\ & \times (300/365) \end{aligned}$$