

人間機械協調システムにおけるリスク低減戦略の基礎的考察

—統合生産システム(IMS)と土木建築構造物の自動施工システムに共通するリスク低減戦略—

Basic consideration of risk reduction strategy for man-machine co-operated systems

- Risk reduction strategy for Integrated Manufacturing System (IMS) and automated construction system -

梅崎重夫*, 清水尚憲**, 濱島京子***

Shigeo UMEZAKI, Shoken SHIMIZU and Kyoko HAMAJIMA

*博士(工学)(独)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部長(〒204-0024 清瀬市梅園 1-4-6)

** (独)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上席研究員(〒204-0024 清瀬市梅園 1-4-6)

***博士(工学)(独)労働安全衛生総合研究所 電気安全研究グループ研究員(〒204-0024 清瀬市梅園 1-4-6)

This paper shows a new risk reduction strategy for automated construction systems. In this strategy, the designer identifies 5 kinds of typical hazardous events of automated construction systems, decides zoning areas of man and machine cooperative working systems, and designs safety control system by using modules that the safety was proven. In this process, safety requirements can be clarified only by writing 4 kinds of new design sheets. The new concept of risk management division and protective measures division are suggested for that purpose.

Key Words: Automated construction system, man-machine cooperation, Risk management division, Protective measures division

キーワード: 自動施工システム, 人間機械協調, リスク管理区分, 保護方策区分

1. はじめに

人間機械協調システムにおけるリスク低減戦略の確立は、製造業でも重要な課題となっている。このため、著者らは、製造業における人間機械協調システムの代表例として、統合生産システム(以下、IMSと呼ぶ)を対象にリスク低減戦略の検討を進めてきた。

このIMSは、複数の機械が協調制御された自動生産システムである。しかし、自動化といっても、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。このときに人間と機械の協調制御が不適切であると、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、人間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策を必要とする。

同様の方策は、土木建築業で使用する自動施工システムでも必要と考えられる。ただし、IMSと自動施工システムは次の点で異なるので、これらの点を考慮したリスク低減戦略の再構築が必要である¹⁾。

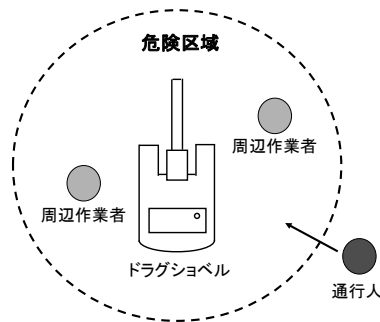
(1) IMSは、通常はライン内に人が進入しない自動生産システムである。これに対し、自動施工システムでは通常作業時に人と機械が混在する作業支援システムの形態となるのが一般的である。

(2) IMSによる事故の型は、主に機械による“挟まれ・巻き込まれ”である。これに対し、自動施工システムでは、機械による“挟まれ・巻き込まれ”だけでなく、移動中の機械と人の接触、傾斜面などでの機械の転倒、荷振れによる人と荷の接触なども考慮する必要がある。

(3) IMSでは、機械の可動部の停止によって作業者の安全を確保する。これに対し、自動施工システムで使用される機械の中には、ドラグショベルのように可動部の迅速な停止が期待できない機械がある。このような機械に対しては、人と機械の接触を早期に検知して回避するシステムの構築が優先される。

(4) 屋外で使用する自動施工システムは、一般に環境条件(降雨・降雪・塵埃・外乱光など)が厳しい。

本論文では、以上の相違点を踏まえた上で、自動施工システムに適用可能なリスク低減策の検討を試みる。



注1)ドラグショベルに対する運転指令は機械から離れた場所の操作室内でオペレータが行う。
注2)周辺作業員の検知や識別のために、RFIDを利用した作業員識別装置やレーザー式スキャン式の人体検知装置を使用する。

図1 自動施工システムのモデル

2. 本報で対象とする自動施工システムの例

機械システムのリスク低減戦略を検討する場合、最初に重篤な災害を発生する可能性が高い特定のモデルを対象にリスク低減プロセスの検討を行ない、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策をとることがある。本報も、以上の観点から、自動施工システムの中で特に重篤な災害を発生する可能性がある例として、ドラグショベルの周辺で複数の作業員が作業を行なうシステムを想定した(図1参照)。この場合、ドラグショベルに対する運転指令は機械から離れた場所の操作室内でオペレータが行なう。

なお、実際の自動施工システムでは、掘削時の土砂崩壊による危険を防止するために鋼矢板を打設する作業、掘削後の地中にヒューム管などを埋設する作業、トラックに廃土を積み込む作業なども必要である。しかし、これらの作業に対する自動施工技術は初期段階の研究が進められているに過ぎないため、本報のモデル化の対象からは除外した。

3. 危険事象または危害の分類と協調制御

次に、図1のモデルで発生する危険事象を分類する。表1は、やや古いデータではあるが、著者が平成5～7年に発生したドラグショベルによる死亡労働災害(危害)203件を典型的災害事例としてまとめたものである。

このうち、“挟まれ・激突”は作業員の作業領域と機械の可動部の動作領域(タスクエリア)の協調制御問題として捉えることによって、リスク低減策の一般化が可能である。これに対し、“転落・転倒”と“飛来・落下”は主として路面環境や搬送物(土砂や石など)の性質に起因して発生する災害であり、機械と作業環境間の協調制御問題として捉えることができる。本報では、以上のうち、主に人間と機械の協調制御に関する問題を扱う。

4. 人間機械協調システムの災害防止条件の考察

4.1 災害防止の基本式

次に、自動施工システムを対象とした人間機械協調シ

表1 ドラグショベルの死亡災害統計(総計203件)

	大分類	小分類	
1	転落・転倒 84件(41.4%)	路肩から転落	24件(11.8%)
		斜面から転落/斜面で転倒	25件(12.3%)
		平坦地で路面状態が悪く転倒	5件(2.5%)
		バケット移動中に転倒	10件(4.9%)
		トラックの荷台から転落	6件(3.0%)
		その他	14件(6.9%)
2	挟まれ・激突 91件(44.8%)	旋回時に挟まれる	18件(8.9%)
		後退時に挟まれる/後退時にひかれる	18件(8.9%)
		バケットに挟まれる/バケットが激突する	23件(11.3%)
		操作レバーと接触し機械が不意作動	19件(9.4%)
		その他	13件(6.4%)
3	飛来・落下 22件(10.8%)	搬送物の落下	17件(8.4%)
		搬送物が人体に激突	5件(2.5%)
		その他	0件(0.0%)
4	その他	6件(3.0%)	

ステムの災害防止条件を考察する。

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誤って伝達したときに発生する。したがって、機械災害を防止するには、作業員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、作業員の作業領域を H_s (表2参照)、機械の可動部の動作領域を M_s (表2参照)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²⁾。

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

式(1)は、作業員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($E_w \leq \epsilon_H$)に、災害が防止できることを意味している。以後、式(1)を災害防止の基本式と呼ぶ。ただし、「 \cap 」は領域の積、 ϕ は空領域を意味する。

4.2 空間条件を考慮した災害防止

実際の作業では、作業員と機械の可動部が共同作業領域を持つ場合($H_s \cap M_s \neq \phi$)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員と機械の可動部の接触を予測して回避することで災害の発生を防止する。この関係は、表2に示すように、時刻 t において作業員が現に存在している領域を $h_s(t)$ 、機械の可動部が現に存在している領域を $ms(t)$ とすると、次のように表すことができる。

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

表2 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	$E_w \leq E_H$	該当なし
1	領域の分離	$H_s \cap M_s = \Phi$	
2a	早期回避 (接触回避)	$\cdot h_s(t) \cap U_s = \Phi$ のとき $W(t) = 1$	
2b	直前回避 (可動部の停止)	$\cdot h_s(t) \cap U_s \neq \Phi$ のとき $W(t) = 0$	
3a	危険点 近接	可動部の移動速度の抑制 $\cdot h_s(t) \cap D_s(t) = \Phi$ のとき $W(t) = 1$	
3b		人体の移動速度の抑制 $\cdot h_s(t) \cap D_s(t) \neq \Phi$ のとき $W(t) = 0$	
4	危害のひどさの 低減	$E_w \leq E_H'$	該当なし

$v_M(t)$: 時刻 t での機械の可動部の移動速度,
 $v_H(t)$: 作業者の手指の移動速度,
 c : 人体の圧かけ危険を回避するために
ISO13854に規定された最小隙間,
 e : 時刻 t_0 における手指の位置と機械の
可動部の動作領域間の直線距離(離隔距離)

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

式(2)を満足できる方策に早期回避がある。これは、危険事象である人間と機械の接触を早期に予測して回避する方策である。この方策では、予測から回避までの時間的余裕があるほど回避の可能性は高まるし、生産能力も維持できる。したがって、安全性と生産性の両立を目指すならば、機械の設計・製造者は早期回避策を優先的に採用しなければならない。

しかし、実際には、危険事象は常に早期回避できるとは限らず、危険事象を直前で回避しなければならない場合も考えられる。このとき、危険事象の予測と回避の失敗は許されないから、直前回避策では安全確認形インタロックなどの確定的な保護方策によって可動部を確実に停止しなければならない。

この関係は、機械の停止に要する時間を Δt_B で表し、 Δt_B の間に人間と機械の可動部が移動する可能性のある領域を $D_s'(t)$ で表し、領域 $D_s'(t)$ と領域 $ms(t)$ の和を領域 $D_s(t)$ とすると(表2参照)、次式となる。

$$h_s(t) \cap D_s(t) = \phi \text{ のとき } W(t) = 1 \quad (3)$$

$$h_s(t) \cap D_s(t) \neq \phi \text{ のとき } W(t) = 0 \quad (4)$$

ただし、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、運転実行命令を $W(t) = 1$ 、運転停止命令を $W(t) = 0$ とする。

4.3 エネルギー条件を考慮した災害防止

実際の機械作業の中には、可能部の迅速な停止が困難なために、作業者の安全を確保できないものがある。このような場合、次善の策として可動部の持つエネルギーを制限するなどの方策によって、危害のひどさを低減せざるを得ない(たとえば、ショベル系掘削機の旋回速度を一定値以下に制限することで、吊り荷が人体に激突したときの被害を軽減する対策など)。このとき、 E_H' の値を“災害を確実に防止できないが、被害軽減のためにやむを得ず許容する人体に伝達されるエネルギーの最大

値”と定義すると、被害軽減の条件は次式で与えられる。

$$E_w \leq E_H' \quad (5)$$

ただし、 E_w には機械の可動部が有するエネルギーだけでなく、搬送物が有するエネルギーも含む。

4.4 保護方策区分の提案

表2は、保護方策ごとに災害防止条件をモデル化したものである。以後、これを保護方策区分と呼ぶ²⁾。このうち、保護方策区分0(エネルギーの制限)と1(領域の分離)は自明である。また、2は早期回避の2aと直前回避の2bに分けられる。さらに、保護方策区分3は著者らが危険点近接作業²⁾と呼んでいる作業に対する保護方策である。この方策は自動施工システムで適用できるケースは少ないと考えられるが、念のため項目だけを記載した。この詳細は文献2)などを参照されたい。

5. リスク低減戦略とリスク管理区分の提案

図2に、本報で提案するリスク低減戦略を示す。この戦略では、機械の設計・製造者が様式1から様式4(表3に様式3、表4に様式4を示す)を図2のプロセスに従い順番に埋めて行くだけで安全要求事項の抽出が完了する。このうち、様式1は使用上の制限、様式2は危険源、危険状態、危険事象及び危害とゾーニング、様式3は保護方策、様式4は残留リスクに対する管理的対策の総括表である。

また、この方法では、総括表の作成を容易化するために、付属表AからHと付属図1から3を備えている。ここで、付属表は主にリスク低減戦略に必要な安全技術情報であり、付属図は人間と機械の作業領域のゾーニングのために利用する。これらの付属表に記載された基盤技術や基本モジュール(付属表EからGに記載)を活用することによって、比較的容易に保護方策を実施できる。これは機械の安全性立証(認証)を容易化できるだけで

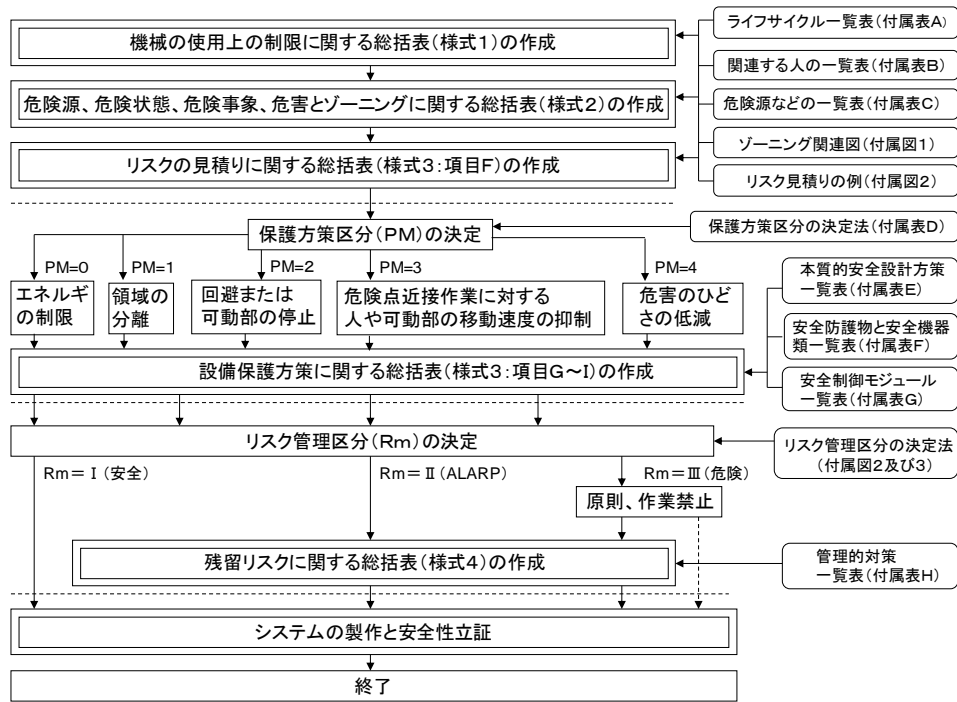


図2 人間機械協調システムのリスク低減戦略

表3 統合生産システムの保護方針に関する総括表（様式3）

No	A 機械の名称	B 作業のライフサイクルまたは作業内容 (付属表A)	C 作業員 (付属表B)	F 保護方針実施前の リスクの見積り (付属表2)				保護方針				H 保護方針実施 後のリスクの 見積り (付属表2)	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	F	P	III	保護方針 区分 (付属表 D)	本質的安全設計方 策(付属表E)	安全防護物(ガードま たは保護装置)の適用 (付属表F)	制御システムの安全関 連部 (付属表F及びG)			設 備 保 護 方 策 の 効果 A
①	ショベル系掘削機	溝掘削作業	掘削機オペレータ、周辺作業員、誘導員、通行員	S3	F0	P3	III(20)	2a	小旋回型の使用(カウンターウェイトの突出を少なくし、挟まれ・巻き込まれの発生頻度を少なくする)	フェールセーフなセンサースキャン式の人体検知装置(ただし、警報を伝えるだけで機械を自動停止できない)	異種冗長化された汎用安全コントローラと認証制御モジュールの適用によって、カテゴリ3(ISO13849参照)の故障対策の実施	L2	II or III(15-19)	作業標準、操作マニュアル、特別教育など

表4 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）

No	A 機械の名称	B 作業のライフサイクルまたは作業内容 (付属表A)	C 作業員 (付属表B)	J 残留リスクの明確化	K 管理的対策実施前の 残留リスクの見積り (付属表2)				L 管理的対策の内容(付属表H)	M 管理的対策実 施後の残留リ スクの見積り (付属表2)		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)
					S	F	P	II or III (15-19)		管 理 的 対 策 の 効果 B	リ ス ク 管 理 区 分	
①	ショベル系掘削機	溝掘削作業	掘削機オペレータ、周辺作業員、誘導員、通行員	作業員の接近を人体検知装置で検知したにもかかわらず、機械を迅速に停止できずに挟まれ・巻き込まれ災害に至る。	S3	F0	P1	II or III(15-19)	作業標準、操作マニュアル、特別教育など	B2	II(15)	

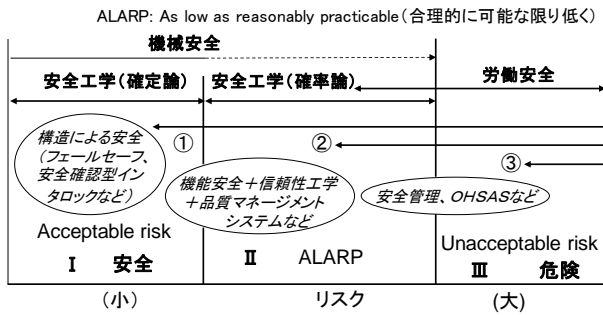


図3 リスク管理区分の意味 (付属図3)

なく、保護方策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。

以上のプロセスで特に重要な概念がリスク管理区分である。これは、リスク評価結果をI (安全)、III (危険)、II (ALARP) の3領域に区分したものである(図3参照)。各区分は、次のような意味を持つ^{2), 3)}。

- (a) 区分I: 明らかに適切なリスク低減を達成
- (b) 区分III: 明らかに適切なリスク低減を達成していない(原則作業禁止。やむを得ない場合に特別管理作業)
- (c) 区分II: 区分IまたはIIIと判定できないため、合理的に可能な限りリスクを低減(ALARP領域: As low as reasonably practicableの略)

実際のリスク低減策では、確定的な保護方策は図3のリスク管理区分を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。たとえば、本システムでは、人体のショベルへの接近状況(作業位置など)を確実に検知できる安全装置を設置できれば、顕著なリスク低減効果が期待できる。しかし、実際には、ショベル周辺のすべての領域を確実に検知できるセンシング手段は現状では存在しない。このため、実際には、監視人を置くなどの管理的対策によって、労働災害の発生を防止せざるを得ない。しかし、人の注意力に依存する非確定的な管理的対策では、多くの場合顕著なリスク低減効果は期待できない。一方、非確定的な管理的対策でも、そのリスク低減効果を適切に評価できる手法は必要である。また、リスク評価では、評価が主観によって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4及び図5は、以上の点を考慮して著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。ここで、巨視的評価は主に確定的な保護方策の効果を、微視的評価は主に非確定的な管理的対策の効果を表すために使用する。

また、図4では、保護方策の効果をマトリックス表(図4(a)参照)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なったのは、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(例えば、図4のII(9~14)からII(11)を選択するなど)。

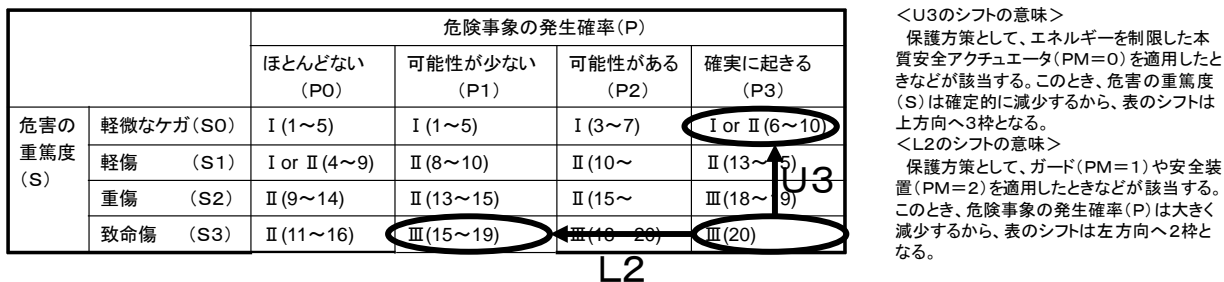
6. 本提案に基づくリスク評価の具体例

次に、図1のドラグショベルを利用した自動施工システムを対象にリスク評価の具体例を示す。具体的な評価は、図4及び図5を参考にした。

- (a) 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人と機械が常時近接しているために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図4(a)にしたがってIII(20)と判定した。
- (b) この事例のシステムは人と機械が混在して作業するために、作業頻度は“多い”(常時)と想定される(F0が該当)。この点を考慮し、図4(b)にしたがって減点数を0とし、リスク管理区分をIII(20)のままとした。
- (c) 保護方策として、RFIDを利用した作業者識別システムの適用を考える⁴⁾。これは、RFIDを装着した人の接近をドラグショベルの運転者に警告する装置である。しかし、この装置ではRFIDを装着していない通行人などを監視できない。また、RFIDは位置検出誤差が大きいため、作業者の位置の正確な検出は困難と考えられる。さらに、RFIDを使ったシステムはフェールセーフでないために、故障の発生時に災害に至る可能性も考えられる。以上を考慮した場合、この装置は図4(a)の表の枠を左方向に高々1だけシフトする効果しかないと判定した。これより、リスク管理区分は依然としてIII(18~20)のままとなる。
- (d) 上記問題が生じないように、本質的安全設計方策として小旋回型のドラグショベルを適用した。これは、挟まれ・巻き込まれ災害の発生頻度を減らすために、カウンターウェイトの突出部分を少なくしたものである。また、安全防護物としてレーザー式の人検知装置を適用した。これは、人の接近をドラグショベルの運転者に警告する装置である。この装置は警報装置ではあるものの、RFIDを装着した人以外も検知でき、フェールセーフでもある。以上の対策は、図4(a)の表の枠を左方向に2だけシフトする効果はあると判定した。これより、リスク管理区分はII or III(15~19)となる。
- (e) 上記のままでは残留リスクが大きく、適切なリスク低減を達成できない。そこで、能力向上教育などの



図4 リスク管理区分の決定法 (付属図2)



注) 本質安全アクチュエータは危険事象の発生確率(P)の低減策としても有効である。したがって、このアクチュエータの適用時には、上図のシフトは厳密には左方向(Pの低減)と上方向(Sの低減)の両方が起こる。ただし、この点は説明を複雑にするので上方向にだけシフトが起こると説明した。

図5 保護方策の効果の意味するシフト

管理的対策を実施し、これを図4(d)にしたがって中程度の効果とした (B2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(15)とした。

めている。また、図2に示したシステムは安全設計用の支援システムとして別途開発を進めている。

7. おわりに

以上、自動施工システムを対象としたリスク低減戦略を提案した。本手法は、従来利用されている手法と比較とするとやや難しいかもしれない。しかし、機械安全分野で実施されている確定的な保護方策と、労働安全分野で実施されている非確定的な管理的対策の連携によるリスク低減効果を正確に判定するには、現状ではこのような方法を採用する以外ないと著者らは考えている。

ただし、実際の現場に適用するには、実施が容易な手法であることも必須である。このため、現在、本手法を土木建築分野だけでなく、製造分野、電力分野、信頼性分野に対しても行い、各分野の専門家から意見集約を進

参考文献

- 1) 池田博康・梅崎重夫・佐々木哲也・清水尚憲・富田一・呂健・大嶋勝則・高梨成次, 建設用ロボットの安全制御技術に関する研究報告, NIIS-SRR-NO. 21 (2000) 31-52
- 2) 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
- 3) 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
- 4) 和田慎司, 建設機械施工の安全対策補助システムー能動型RFIDの応用ーバックホー作業の事故低減を目指してー, 建設機械, Vol. 44, No. 9 (2008) 38-41

(2008年8月22日受付)