

7. 危険点近接作業の災害防止戦略に関する基礎的考察*

梅崎重夫**, 清水尚憲**

7. The Basic Consideration on Accident Prevention Strategy of the Hazardous Point Nearby Operation*

by Shigeo UMEZAKI** and Shoken SHIMIZU**

Abstract; It is a common knowledge for safety engineers to perform machine safe measures based on the risk reduction process described in ISO12100. Its process consists of the "inherently safe design measure", "safeguarding" and other supplemental countermeasures. However, there are many "hazardous point nearby operations", that is the operation of process confirmation, adjustment, preparing, trouble-shooting, maintenance, inspection, repairing, cleaning of the machine etc.. It is very difficult to apply above safe measures for these operations because a operator is close to machine moving parts without stopping it.

This paper shows a new safety strategy not only for operations that the "inherently safe design measures" and the "safeguarding" can be used, but also for "hazardous point nearby operations". New concepts of the risk management division (Ⅰ:safe condition, Ⅱ:uncertain condition, Ⅲ:hazardous condition), the accident prevention division (0:restriction of speed and force, 1:separation and fixation of human and machine space, 2:machine stop in hazardous condition, 3:hazardous point nearby operation) and the supporting protective device (typeA:periodic checking for protective devices, typeB:periodic training for operators) are suggested for that purpose.

These results can be used as a complement of ISO12100. Following measures are especially to be taken for the hazardous point nearby operation.

- 1) Improving the operation method to start a machine from the outside of safeguarded space. This causes transition of the accident prevention division to division1.
- 2) Application of safety confirmation system to stop a machine in hazardous condition. This causes transition of the accident prevention division to division2.
- 3) Even if 1) and 2) are difficult, trying to reduce a risk as far as reasonably practicable by applying the supporting protective device or realizing a restricted (low speed) machine operation.
- 4) In the case of application of the supporting protective device, clarify the matter to be informed from a manufacturer to a user. The manufacturer delivers information of residual risk to the user. It means the risk transmission.
- 5) Preparing safe operation procedures and planning education and training for using the supporting protective device.

Keywords; Safety, Safety Control, Industrial Machine, Accident Prevention Method, Hazardous Point Nearby Operation, ISO12100

* 本章は、日本機械学会論文集に掲載した論文¹⁾に新規事項を追加して修正したものである。

* 機械システム安全研究グループ Mechanical and System Safety Research Group

1. はじめに

機械作業の中には、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う運転確認、調整、加工、トラブル処理、保守・点検、修理、清掃、除去などの作業がある。以後、これらを危険点近接作業¹⁾と呼ぶ。

この作業に関連した労働災害は、本報告書の第6章に示す労働災害分析結果によれば、産業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44.2%を占めている。したがって、この作業に対する適切な災害防止戦略を確立すれば、労働災害の大幅な減少が期待できる。このため、本論文では、危険点近接作業を対象とした災害防止戦略の抜本的検討を行った。

なお、本論文では、機械災害のうち「挟まれ・巻き込まれ」と「激突され」災害を対象を限定した。また、本論文では、説明の都合上、確定的安全方策²⁾と非確定的リスク低減策²⁾という用語を使用する。このうち、確定的安全方策には、杉本・蓬原・向殿らが開発した安全確認形インタロック^{3)~6)}の適用などが含まれる。これは、故障時に必ず安全側(機械停止側)となる非対称誤り特性²⁾を備えている。また、非確定的リスク低減策には、プログラマブルな電子制御装置の機能安全性向上²⁾、機械の信頼性向上、人に対する訓練の強化、安全管理体制の強化などが含まれる。以上の用語の詳細な解説は、文献2)を参照されたい。

2. 本論文で提案する災害防止戦略の要点

科学技術の分野では、学問体系の基礎となる原理が先験的(アприオリ)に定義され、この原理から演繹的に導出される関係として個々の知識が体系化されている。たとえば、ニュートンの運動方程式を原理とする古典力学や、マクスウェルの方程式を原理とする電磁気学などは、この典型的な例である。

同様に、糸川・杉本・蓬原・向殿らが構築した確定的安全方策でも、「安全の原理」³⁾から演繹的に導出される関係として工学大系を構築する試みが進められている^{3)~6)}。この原理は、次のように要約できる。

(a) 安全に関する認知・判断・回避などの過程では、安全とも危険とも確定できない不確定性を伴う。

(b) 不確定性に対しては、必ず最悪値評価を行う。すなわち、不確定を危険と見なして対処する。

一方、危険点近接作業の災害防止対策では、一般に確定的安全方策(Fig.1(a)参照)と不確定性を

伴う非確定的リスク低減策(Fig.1(b)参照)の連携によって対策を実施するために、両者の連携を考慮した独自の理論体系を必要とする。このため、著者は、「安全の原理」を補完できる戦略的概念として、リスクの概念の採用を検討してきた。この具体例に、ISO/IECガイド51⁷⁾に記載された許容可能なりスク(Tolerable risk)や残留リスク(Residual risk)の概念、またはISO12100-1⁸⁾に記載された”適切なリスク低減”(Adequate risk reduction)の概念がある。しかし、著者は、その検討過程で、既存のリスク概念を危険点近接作業の災害防止対策に適用するには、少なくとも次の点で問題があるとの結論に達した。

(a) 危険点近接作業の災害防止対策では、「結果的にリスクが低減できれば良い」との観点から、様々な対策が渾然一体となって使用されることがある。しかし、仮にこのような対策によって結果的に”適切なリスク低減”が達成されたと言っても、安全性の立証が伴わないため、災害を防止できる確証が得られない。

(b) 危険点近接作業では、不確定性の高い非確定的リスク低減策の併用を必要とする。このような対策では、リスクの定量的評価によって危害の発生確率を推定しても、その推定値に含まれる不確定性の方が推定値と比較して桁違いに大きくなることも考えられる。

(c) 「安全」か「危険」かを判定する閾値は、評価者の主観、現時点の技術レベル、社会情勢、費用対効果などの要因の影響を受けて変動する。

Fig.2は、以上の点を考慮した上で、著者が提案する機械作業の災害防止戦略の概略図である。ただし、この提案は膨大となるので、本論文では、①災害防止条件の解明、②災害防止技術の選択と適用、及び③残留リスクの評価という課題に限定して戦略を検討した。この要点は次の通りである。

(1) 演繹的災害防止対策の提案

人間機械システムで発生する機械災害を「災害防止の基本式」として一般的に表現し、「安全の原理」及び基本式から演繹的に導出される関係として災害防止対策を体系付ける。

(2) 災害防止対策の優先順位の提案

確定的安全方策を優先的に採用して安全性を立証した後に、次善の策として非確定的なりスク低減策を適用する²⁾。

(3) リスク概念の再構築

安全の原理を補完する戦略的概念として、リスク概念の再構築を試みる。具体的には、危害の発生確

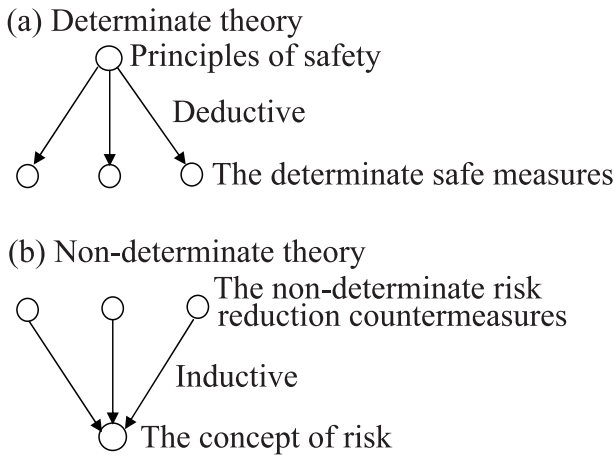


Fig. 1 The conventional accident prevention strategy. 従来の災害防止戦略

率と危害のひどさだけでなく、発生確率の推定値に含まれる不確定性、及び「安全」か「危険」かを判定する閾値に含まれる不確定性も考慮する。

以上のうち、(2)は既に文献2)で詳述した。このため、本論文では、(1)及び(3)について各々第4節と第3節で述べる。なお、演繹的災害防止対策は上記①～③のすべてに関連するが、ここでは①を中心に述べる。

3. 残留リスクの評価とリスク管理区分

3.1 リスクの定義と不確定性

機械を対象とした災害防止対策では、第2節で述べた「安全の原理」が重要である。本論文では、この原理を応用してリスク概念の再構築を試みる。この概念は、ISO12100-1の第3.11節で「危害の発生確率と危害のひどさの組合せ」⁸⁾と定義される。この関係は、リスクを R 、危害の発生確率を P 、危害のひどさを S 、組合せを意味する関数を f とすると、次のように表現できる。

$$R = f(P, S) \dots\dots\dots (1)$$

実際には、危害の発生確率 P には前述したように不確定性が含まれる。そこで、安全の原理にしたがって不確定を危険と見なして発生確率 P の最悪値評価を行うのであるが、不確定性があまり大きいか予見不可能だと、最悪値評価によって得られた発生確率の推定値は工学的に意味を持たない。

そこで、発生確率 P と、その不確定性 U を独立した指標とする二次元評価によって、リスク概念の再構

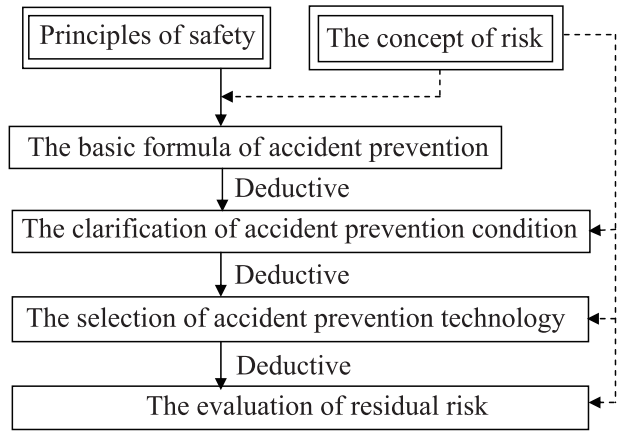


Fig. 2 The new strategy proposed in this research. 本論文で提案する災害防止戦略

築を試みた。ここで、 f' を P, U, S の組合せを意味する関数とすると、(1)式は次のように変更できる。

$$R = f'(P, U, S) \dots\dots\dots (2)$$

3.2 リスク管理区分の提案

Fig.3に、(2)式に基づくリスク評価の概略図を示す。この判定結果は、一般には「適切なリスク低減を達成した」、または「適切なリスク低減を達成していない」の二者択一と考えられている。しかし、安全の原理にしたがえば、この判定結果には「明らかに達成できる」(Fig.3の安全領域I)と「明らかに達成できない」(Fig.3の危険領域III)以外に、「達成できたか否か判定が分かれる」(Fig.3の不確定領域II)

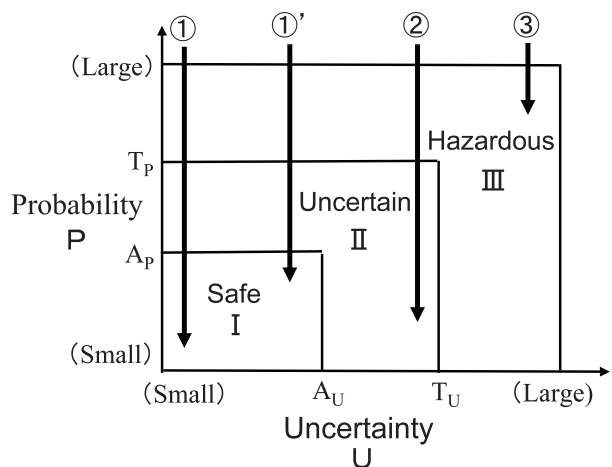


Fig. 3 The concept scheme of risk evaluation. リスク評価の概念図

場合も考えられる。

そこで、リスク評価の判定結果を次のように分類した。以後、これをリスク管理区分と呼ぶ。また、領域ⅠとⅡの境界に相当する閾値を下限許容リスクレベル (Fig.3の A_P 及び A_U)、領域ⅡとⅢの境界に相当する閾値を上限許容リスクレベル (Fig.3の T_P 及び T_U)と呼ぶ。このうち、 A_P には、明らかに受け入れ可能なリスク (Acceptable risk) レベルなどが該当すると考えられる。これに対し、 T_P は、合理的に可能な限りリスクを低減したために (ALARP⁹⁾ という。As low as reasonably practicable の略)、リスクと便益の関係からやむを得ず受容せざるを得ない許容可能なリスク (Tolerable risk) レベルなどが該当すると考えられる。ただし、実際の閾値は前述した不確定要因の影響を受けて変動するため、各事例に応じた検討が必要である (補足1参照)。

以下、各リスク管理区分を説明する。

(1) リスク管理区分Ⅰ

これは、設備安全方策だけで残留リスクを領域Ⅰまで低減できる場合である。この具体例に、安全確認形インタロックなどの確定的安全方策の採用がある。

この対策では、故障時に必ず安全側 (機械停止側) となる非対称誤り特性²⁾ の実現によって危害の発生確率 P と不確定性 U の両方を無視できるほど小さくできる (Fig.3の矢印①が該当)。

また、プログラマブルな電子制御装置²⁾ に異種冗長化²⁾ や自動監視 (セルフチェック)²⁾ 技術を適用し、安全確認システム²⁾ の非対称誤り率 η (発生するすべての誤りに対する危険側となる誤りの比)²⁾ を改善する機能安全性²⁾ の向上策がある。

この対策では、発生確率 P を $P \leq A_P$ 、不確定性 U を $U \leq A_U$ 内に抑制できれば、リスク管理区分Ⅰを達成できる (Fig.3の矢印①' が該当)。ただし、この場合の不確定性 U の評価は、安全の原理にしたがって $\eta = 1$ のときの最悪値 U_w を使用する。この詳細は文献2) を参照されたい。

(2) リスク管理区分Ⅱ

これは、設備安全方策だけでは残留リスクを領域Ⅱまでしか低減できない場合である。このときの残留リスクに対しては、使用上の情報の提供、作業規定の作成、警告・表示の徹底、教育・訓練の実施、保護具の使用、管理組織の整備などを併用することで、リスク管理区分Ⅰの達成を目指す。以後、これらを人的リスク低減方策¹⁰⁾ と呼ぶ。

しかし、人的リスク低減方策に含まれる不確定性はきわめて大きい。したがって、仮に発生確率 P に

対して $P \leq A_P$ が達成できたと言っても、不確定性 $U (> A_U)$ の存在のために、リスク管理区分はⅡに留まる場合がある (Fig.3の矢印②が該当)。

(3) リスク管理区分Ⅲ

これは、設備安全方策だけでは残留リスクが領域Ⅲに留まるか、または設備安全方策が実施できないために、残留リスクが領域Ⅲに留まる場合である (Fig.3の矢印③が該当)。この場合は、明らかに危険性が高いため、作業を禁止する。

以上のうち、危険点近接作業は一般にはリスク管理区分Ⅲに留まると考えられる。この作業は、明らかに危険性が高いと判定されるため、本来は禁止すべきである。しかし、現実には、やむを得ず実行しなければならない作業も多い。このため、現状では、作業者に対する教育・訓練などによって、出来るだけリスクを低減する対策が実施されている。しかし、この対策は人の注意力に依存する不確定性を伴うため、災害を防止できる確証が得られない。そこで、危険点近接作業を対象に、人の注意力に依存することの少ない新たな災害防止戦略を検討する。

4. 災害防止条件の解明と災害防止区分

4.1 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¹¹⁾。通常、接触時に機械から人体に伝達されるエネルギーは、そのときに機械がなす仕事率 (単位時間あたりの仕事) に比例すると考えられる。一方、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場合は、機械から人体へのエネルギー伝達はあり得ない。したがって、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、あるいは、接触した場合に機械の可動部から人体に対して伝達される仕事率が所定の値以下になるように機械を動作させることが災害防止のため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 (Table1参照)、機械の可動部の動作領域を M_s (Table1参照) で表し、接触があった場合に機械の可動部から伝達される仕事率の最大値を P_w 、人体に傷害を及ぼさないことが確認できている仕事率の最大値を ϵ_H とすると、次式で表すことができる。

$$H_s \cap M_s = \phi \quad \text{or} \quad P_w \leq \epsilon_H \quad \dots \dots \dots (3)$$

以後、(3) 式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記号である。

(3)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 ($Hs \cap Ms = \phi$)、または、機械の可動部から伝達される仕事率が人体に傷害を及ぼさないほど小さいとき ($P_w \leq \epsilon_H$)に、災害が防止できることを意味している。このときの仕事率 P_w は、可動部が発生する力を F 、そのときの可動部の速度を V とすると、近似的には次式となる。ただし、ここでは人体に仕事作用する間は F 及び V は一定と仮定した。

$$P_w = F \cdot V \leq \epsilon_H \dots\dots\dots (4)$$

Fig.4に、(4)式を満足できる領域を示す。しかし、 $F = \infty$ や $V = \infty$ などの領域では、仮に $V \neq 0$ や $F \neq 0$ であっても、本当に災害が防止できるかの確証が得られない。そこで、このような領域は除外し、Fig.4の斜線に示す範囲を災害防止が確証できる範囲と考えた。これより、(3)及び(4)式は次のように変更できる。

$$Hs \cap Ms = \phi \text{ or } (F \leq f_H \text{ and } V \leq v_H) \dots\dots\dots (5)$$

ただし、 f_H は人体に傷害を及ぼさないことが確認できている力の最大値であり、 v_H は人体に傷害を及ぼさないことが確認できている速度の最大値である。これらの値には、本報告書の第2章、第3章及び文献12)で検討した値を採用する¹²⁾。

4.2 安定状態への固定による災害防止

(5)式の実現する方法に、領域 Hs 、 Ms または力 F 及び速度 V を人体に傷害を及ぼさない大きさに固定する方法がある。これを本論文では、便宜上、安定状態への固定と呼ぶ。

この方法には次の2種類がある。

(1) 力及び速度の固定

可動部が発生する力及び速度の最大値を人体に傷

Table 1 Accident prevention countermeasures of man-machine system.
人間機械システムの災害防止対策

| The accident prevention division | | | | The space/energy relation | | |
|----------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|-----------------------|---|--|--|
| Space condition | 1 | Fixation of human and machine space | _____ | $Hs \cap Ms = \phi$ | | |
| | 2 | Machine stop | a | Interception of power | $Hs \cap Ms \neq \phi$ and $hs(t) \cap Ds(t) = \phi$ | |
| | | | b | Hold stop | $hs(t) \cap Ds(t) = \phi$ | |
| 3 | Hazardous point nearby operation | a | Limited operation | $Hs \cap Ms \neq \phi$ and $hs(t) \cap Ds(t) \neq \phi$ | | |
| | | b | Normal operation | $hs(t) \cap ms(t) = \phi$ | | |
| Energy condition | 0 | Fixation of speed and force | _____ | $F_w \leq f_H$ and $V_w \leq v_H$ | | |
| | 2 | Machine stop | a | Interception of power | $f(t) \leq f_{LH}$ and $v(t) \leq v_{LH}$ | |
| | | | b | Hold stop | $v(t) \leq v_{LH}$ | |
| 3 | Hazardous point nearby operation | a | Interception of power | $f(t) \leq F'_{LH}$ and $v(t) \leq V'_{LH}$ | | |
| | | b | Normal operation | $f(t) > F'_{LH}$ and $v(t) > V'_{LH}$ | | |

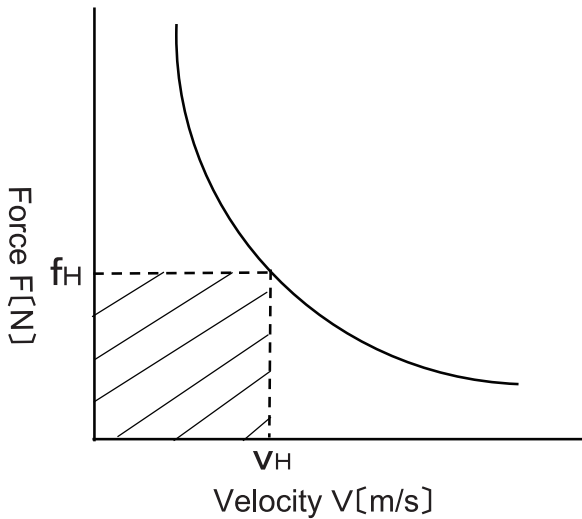


Fig. 4 The accident prevention condition on velocity and force.
速度と力に関する災害防止の条件

害を及ぼさない大きさに固定する ($F_w \leq f_H$ and $V_w \leq v_H$)。具体的には、力及び速度を一定値以下に制限できる本質安全アクチュエータ^{13), 14)}の使用などがある。

(2) 領域の固定

作業者の作業領域と機械の可動部の動作領域を空間的に分離した上で固定する ($H_s \cap M_s = \phi$)。具体的には、可動部の動作領域の周囲に固定ガードを設けて、作業者の進入を阻止する方法などがある。

4.3 準安定状態の維持による災害防止

実際には、作業者と可動部が存在している場所や可動部の発生する力や速度は時間とともに変動する。そこで、Table1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 $h_s(t)$ 、可動部が現に存在している領域を $m_s(t)$ で表し、可動部が発生している力を $f(t)$ 、可動部の速度を $v(t)$ とすると、(5)式は次のように変更できる。

$$\forall t: h_s(t) \cap m_s(t) = \phi$$

$$\text{or } [f(t) \leq f_H \text{ and } v(t) \leq v_H] \dots\dots\dots (6)$$

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

(6) 式を満足させるには、領域 $h_s(t)$ 、 $m_s(t)$ または力 $f(t)$ 及び速度 $v(t)$ を災害防止条件の範囲内に維持する制御が必要である。これを本論文では、便宜上、準安定状態の維持と呼ぶ。

これには次の2種類の方法がある。

(1) 領域の接触防止制御

作業者と可動部が同一時刻において同一位置に存在しないように制御を行う ($h_s(t) \cap m_s(t) = \phi$)。具体的には、作業者とロボットのマニピュレータの接触を防止する制御などがある。

(2) 力及び速度の制限制御

可動部が発生する力 $f(t)$ と速度 $v(t)$ を一定値以下に制限する制御を行う ($f(t) \leq f_H$ and $v(t) \leq v_H$)。具体的には、ロボットのマニピュレータの速度を低速に維持して衝突時の力を抑える制御などがある。

4.4 維持制御が失敗したときの災害防止

上記(1)では、維持制御の失敗によって作業者と可動部が同一時刻において同一領域に存在し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、作業者に傷害が及ばないようにする必要がある。

この関係は、時刻 t での可動部の運転実行を $W(t)=1$ 、運転禁止を $W(t)=0$ とすると、次式で表すことができる。

$$h_s(t) \cap m_s(t) = \phi \text{ のとき } W(t) = 1 \dots\dots\dots (7)$$

$$h_s(t) \cap m_s(t) \neq \phi \text{ のとき } W(t) = 0 \dots\dots\dots (8)$$

(8) 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、停止に要する時間 Δt_B の間に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 $m_s(t)$ の和を領域 $D_s(t)$ とすると、(7)式と(8)式は次のように書き改めることができる。なお、実際には時間 Δt_B の間に人間も移動する可能性があるが、この点は同様の議論で対応できるので省略した。

$$h_s(t) \cap D_s(t) = \phi \text{ のとき } W(t) = 1 \dots\dots\dots (9)$$

$$h_s(t) \cap D_s(t) \neq \phi \text{ のとき } W(t + \Delta t_B) = 0 \dots\dots (10)$$

同様に、上記(2)でも、力と速度の制限制御が失敗することがある。このときも、直ちに可動部を停止させて、作業者に傷害が及ばないようにする必要がある。

この場合、力 f と速度 v は Δt_B の間に増大する可能性がある。そこで、この点を考慮し、Table1に示すように、機械に停止命令を与える直前の力を f_{LH} 、速度を v_{LH} とすると、以上の関係は次のように書き改めることができる。

$$f(t) \leq f_{LH} \text{ and } v(t) \leq v_{LH} \text{ のとき } W(t) = 1 \dots\dots (11)$$

$$f(t) > f_{LH} \text{ or } v(t) > v_{LH} \text{ のとき } W(t + \Delta t_B) = 0 \dots\dots (12)$$

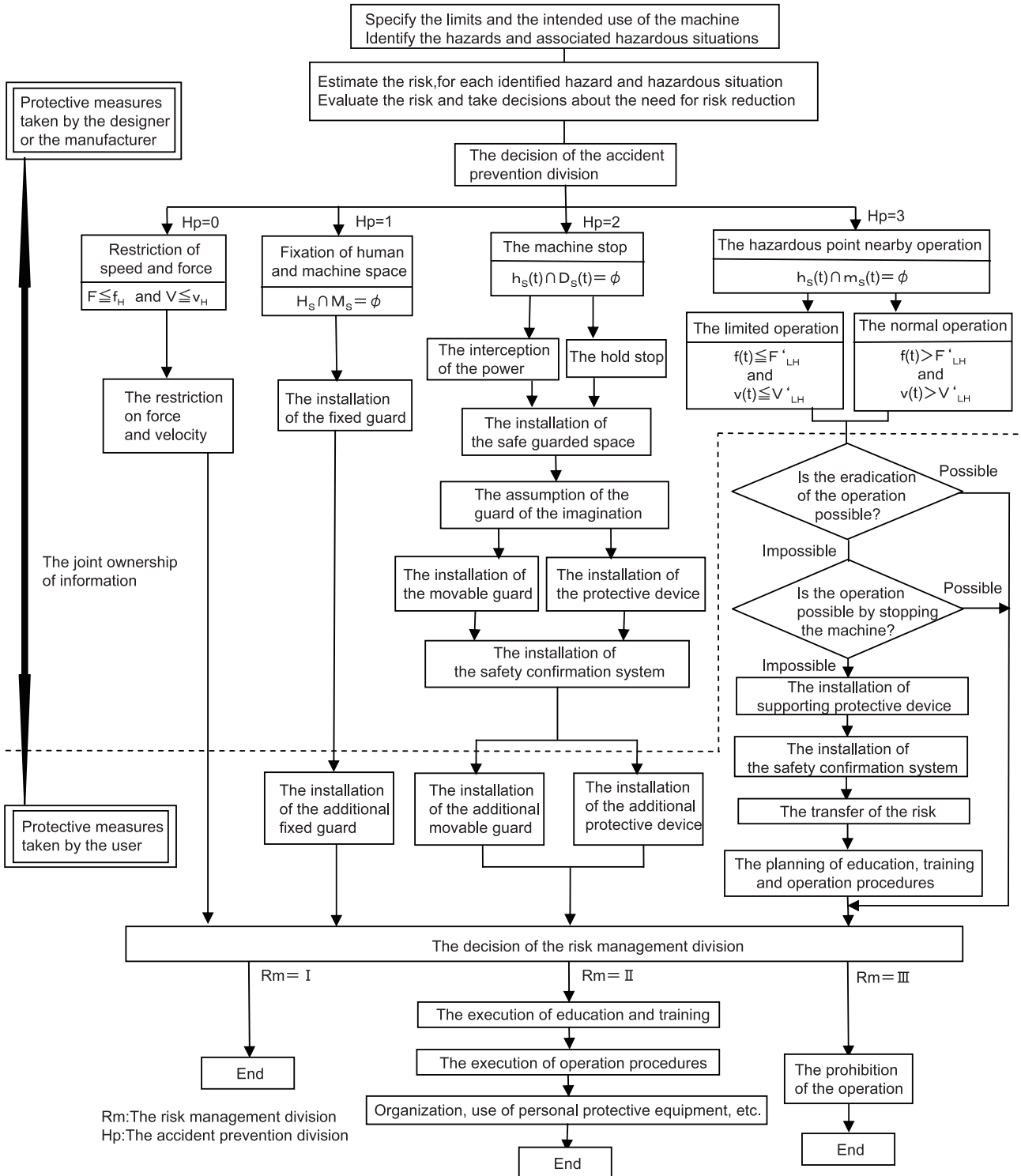


Fig. 5 The outline of the accident prevention strategy.
災害防止戦略の概要

4.5 危害のひどさの軽減

以上は、主に危害の発生確率 P の減少を目的とした対策であった。一方、災害防止対策には危害のひどさ S の軽減を目的とした対策もある（たとえば、あまり推奨できないがクレーンの走行速度を一定値以下に制限することで、荷が人体に激突したときの被害を軽減する対策など）。そこで、次にこれについて検討した。

この対策では、 F_H と V_H の値を「災害を確実に防止できないが、被害の軽減という観点からやむを得ず許容する力または速度の最大値」と定義する。この場合にも、力 f と速度 v は $\angle t_B$ の間に増大する可能性がある。そこで、同様に、機械に停止命令を与える直前の力を F_{LH} 、速度を V_{LH} とすると、以上の関係は次式で表すことができる。

$$f(t) \leq F_{LH} \text{ and } v(t) \leq V_{LH} \text{ のとき } W(t) = 1 \quad (13)$$

$$f(t) > F_{LH} \text{ or } v(t) > V_{LH} \text{ のとき } W(t + \angle t_B) = 0 \quad (14)$$

4.6 災害防止区分の類型化

Table1は、以上の結果に基づいて災害防止対策を分類した結果である。以後、これを災害防止区分と呼ぶ。以下、各区分を説明する。

(1) 災害防止区分0（力及び速度の固定）

この区分では、可動部が発生する力と、そのときの可動部の速度を人体に傷害を及ぼさない大きさに固定することで（ $F \leq f_H$, $V \leq v_H$ ）、災害を防止する。

(2) 災害防止区分1（領域の固定）

この区分では、作業者の作業領域と機械の可動部の動作領域を空間的に分離した上で固定することによって（ $H_s \cap M_s = \phi$ ）、災害を防止する。具体的には、機械の可動部の動作領域の周囲に固定ガードを設けて作業者の進入を阻止するなどの方法がある。

(3) 災害防止区分2（可動部の停止）

この区分では、維持制御が失敗していないことを機械側で自動的に確認する安全確認システム²⁾を構築し、安全（この場合は、維持制御が失敗していないこと）が確認できないときは可動部の運転を開始させないか、または直ちに可動部を停止させることで災害を防止する。具体的には、次のものがある。

① 区分2a（完全停止）

機械の可動部を完全停止状態（可動部へのエネルギー供給を完全に停止した状態）に遷移させて災害を防止する。

② 区分2b（ホールド停止）

機械の可動部をホールド停止状態（機械の可動部

へのエネルギー供給を停止することなく、CPUからの命令などによって可動部が一時停止している状態）に遷移させて災害を防止する。

(4) 災害防止区分3（危険点近接）

この区分は、停止によっては災害を防止できない危険点近接作業を対象とする。具体的には、次のものがある。

① 区分3a（制限された運転）

力及び速度を F_{LH} 以下及び V_{LH} 以下に制限する制御）ことによって危害のひどさを軽減する。

② 区分3b（通常運転）

機械を通常の運転状態として、危険点近接作業を行う。原則として禁止作業であるが、やむを得ず実行する場合は人体と可動部が接触しないように作業者自らが接触防止制御を行って、災害発生確率の減少を目指す。作業者の注意力の欠如によって、直ちに災害が発生する。

5. 支援保護装置の提案

災害防止区分2及び3の対策では、領域の接触防止制御や力及び速度の制限制御が失敗していないことを監視する装置を必要とする。これをISO12100-1では保護装置⁸⁾と呼んでいる。この具体例に、光線式安全装置やマットスイッチなどの人体検出装置、回転センサーを用いた速度監視装置などがある。

保護装置の目的は、一般にリスク管理区分Iの達成と考えられる。しかし、作業によっては、保護装置の使用だけではリスク管理区分Iが達成できないものもある。このため、本論文では、保護装置の使用だけでリスク管理区分Iは達成できないが、第3.2節(2)で述べた人的リスク低減方策を併用することで、可能な限りリスクの低減を図る支援的な保護装置を提案した。以後、これを支援保護装置と呼ぶ。

この装置は、人的リスク低減方策の形態によって次のように分類できる。

(1) タイプAの支援保護装置

これは、人による定期的な点検を必要とする支援保護装置である。具体的には、現在の技術レベル及び費用対効果に基づいて可能な限り故障対策を実施したが、依然として危険側故障²⁾が残留するために、作業者や保全作業者などによる定期的な点検を必要とする装置が該当する。

定期的な電池交換が必要な警報装置や、広大領域内を監視する一般的な画像処理装置などがある。

(2) タイプBの支援保護装置

これは、人に対する定期的な訓練を必要とする支援保護装置である。具体的には、運転時には必ず所

定の目印を付けた（この目印を画像処理装置などで監視する）手袋を装着したり、所定のICタグを付けたヘルメットを装着したり、検知対象の形状に応じた検知範囲を設定したり、安全防護領域への進入時には必ず所定のキーを抜くなど、作業員に対して特定の意識的行為を必要とする装置が該当する。また、大部分の加工物に対しては適切なリスク低減を達成できるが、特殊な形状の加工物に対しては保護効果がないために、作業員に対して特殊な加工物の加工に関する訓練を必要とする保護装置などが該当する。

著者らが開発したブランキング機能を備えたアルミサッシ加工用の光線式安全装置¹⁵⁾、フローティング機能を備えたロール機用の光線式安全装置¹⁶⁾などが該当する。

6. 災害防止戦略の提案

Fig.5に、本論文で提案する災害防止戦略の概略図を示す。この戦略では、リスク管理区分、災害防止区分及び支援保護装置という概念を創出することで、新たな災害防止戦略を考案した。具体的には、以下の順序で災害防止対策を実施する。

(1) 機械の制限及び意図する使用を明確にする(ISO 12100-1の第5.1.3節参照)。

(2) 危険源及び関連する危険状態を同定する(同上)。

(3) 各危険源や危険状態毎に災害防止区分を決定する。

(4) 各災害防止区分毎に以下の対策を実施する。なお、対策を実施した結果、不相当であることが判明した場合は、災害防止区分の見直しを行う。

(a) 災害防止区分0では、機械の可動部が発生する力や速度を人体に傷害を及ぼさない大きさに固定する。

(b) 災害防止区分1では、作業員の作業領域と可動部の動作領域を空間的に固定し分離する。

(c) 災害防止区分2では、安全確認システムを構築し、安全が確認できないときは可動部の運転を開始させないか、または直ちに可動部を停止させる。具体的には次の対策を実施する。

① 機械の可動部の動作領域（可動部本体だけでなく、加工物、工具、治具（ハンドなどの動作領域を含む）を最大動作領域 M_s とする（Fig.6参照）。

② 作業員が可動部の運転中に最大動作領域 M_s に進入して作業を行う可能性があるときは、進入可能性のある人体の部位に応じて所定の最小隙間 S を最大動作領域 M_s の外側に設ける（ISO13854参照）。

③ ISO13855などを参考に、最大動作領域 M_s の外側に安全距離 D を設ける。

④ 最小隙間 S と安全距離 D の大きい方の値を最大動作領域 M_s に加算して拡張した領域を、安全防護領域 X_s とする（Fig.6参照）。

⑤ 安全防護領域 X_s の周囲を仮想囲いで囲む。

⑥ 仮想囲いのうち、作業の必要上、作業員の身体が進入せざるを得ない最小部分だけを開口部とし、その他の部分には固定ガードを設ける。

⑦ 前述の開口部には、可動ガード（ロック付き、ロックなしなど）または保護装置（光線式安全装置、マットスイッチなど）の中から、最適なものを選択して適用する。

⑧ 安全確認システムで発生する危険側故障は、ISO13849に記載された対策を実施するなどして、適切なリスク低減を図る。

⑨ 作業員の身体全部が前述の開口部を通して安全防護領域内に進入可能なときは、必要に応じて進入を監視できる保護装置や支援保護装置（エリアセンサなど）を設ける。具体的な装置は本報告書の第8章で検討する。

⑩ 可動部をホールド停止とするときは、ホールド停止監視装置を設ける。

(d) 災害防止区分3は、停止によっては災害を防止できない危険点近接作業を対象とする。具体的には次の対策を実施する。

① 可動部が動作する領域の外側から作業を行えるように、作業方法を改善する。これにより、災害防止区分は1に遷移する。

② 可動部を停止して作業を行えるように、作業方法を改善する。これにより災害防止区分は2に遷移する。

③ 上記①及び②の対策が困難な場合でも、支援保護装置の適用や制限された運転の実現によって、可能な限りリスクの低減に努める。

④ 支援保護装置や制限された運転に関連する制御システムの安全関連部分は、ISO13849に準じた対策などで可能な限りリスクの低減に努める。

⑤ 支援保護装置の使用時に機械の使用者が実施すべき事項の明確化を図り、支援保護装置の製造者と使用者の間で合意する。また、作業員を始めとする関係者に必要な情報提供を行う。これにより、支援保護装置の製造者から使用者にリスクの移転を図る。

同様に、制限された運転を実現するときも、機械の製造者と使用者の間で同様のリスク移転を行う。

⑥ 支援保護装置を使用する際の作業標準の作成や教育・訓練計画の作成を行う。

(5) 各危険源毎にリスク管理区分を決定する。これは、区分Ⅰ（安全）、区分Ⅱ（不確定）、または区分

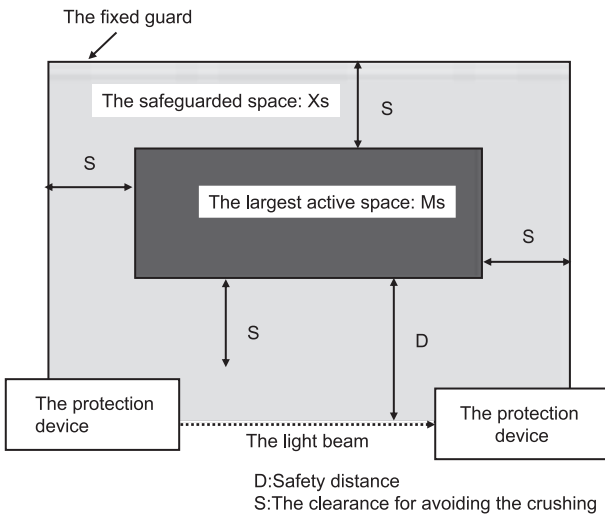


Fig. 6 The relation between the largest active space and the safeguarded space.
最大動作領域と安全防護領域の関係

Ⅲ (危険) のいずれかとなる。以下に決定法を示す。
(a) 災害防止区分が0または1のときは、確定的安全方策が採用されているために、リスク管理区分はⅠと判定する。

(b) 災害防止区分が2のときも、原則としてリスク管理区分をⅠと判定する。ただし、安全確認システムの構成要素に支援保護装置が採用されているときなどは、リスク管理区分をⅡと判定することがある。また、作業者の身体全部が安全防護領域内に進入可能なときは、リスク管理区分をⅡまたはⅢと判定することがある。

(c) 災害防止区分が3のときは、リスク管理区分をⅢと判定する。ただし、機械の可動部が動作する領域の外側から作業を実施できたり、可動部を停止して作業を実施できる場合は、リスク管理区分をⅠまたはⅡと判定することがある。

また、支援保護装置や制限された運転を併用した場合も、リスク管理区分をⅡと判定することがある。

6) リスク管理区分に応じた災害防止対策を決定する。具体的には、以下による。

- (a) リスク管理区分がⅠのときは、対策を終了する。
- (b) リスク管理区分がⅡのときは、第3.2節(2)で述べた人的リスク低減方策を併用した上で作業を行う。
- (c) リスク管理区分がⅢのときは、作業を禁止する。

7. 考察

現在、産業機械の災害防止対策はISO12100-1に記載されたリスク低減プロセス (Fig.7参照) に従うの

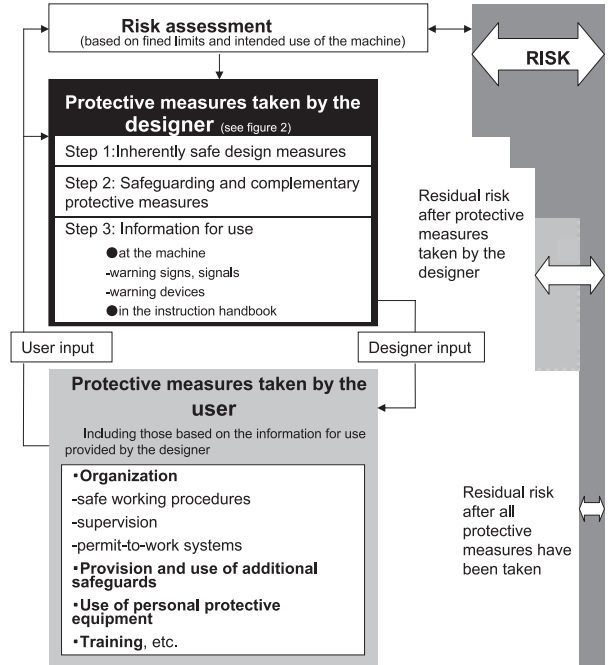


Fig. 7 The risk reduction process described in ISO12100.
ISO12100に記載されたリスク低減プロセス⁸⁾

が国際的な常識となっている。このプロセスでは「本質的安全設計方策」(Fig.7のステップ1)や「安全防護」(ガードまたは保護装置の適用。Fig.7のステップ2)などの確定性の高い設備安全方策が中心であり、不確定性の大きい非確定的なリスク低減策はあくまでも補助的なものとして位置づけられている。

しかし、危険点近接作業の災害防止対策では、不確定性の大きい非確定的なリスク低減策の併用が必要であるために、リスクに含まれる不確定性を考慮した新たな災害防止戦略を必要とする。このため、本論文では、リスクを「危害の発生確率と、発生確率の推定値に含まれる不確定性、及び危害のひどさの組合せ」と再定義するとともに、リスク管理区分という新たな概念を導入することで、不確定性の大きいリスク低減策を利用するときのリスク低減プロセスの明確化を図った。

また、ISO12100-1では、「本質的安全設計方策」(ステップ1)と「安全防護及び付加保護方策」(ステップ2)がリスク低減プロセスの中心である。しかし、実際にはこれらの対策が困難な危険点近接作業があり、この作業で災害が多発している。このため、本論文では、リスク管理区分、災害防止区分、及び支援保護装置という新たな概念を創出すること

で、危険点近接作業を含めたリスク低減プロセスの明確化を図った。

以上の戦略は、ISO12100を補完する戦略としても活用できると考えられる。

8. おわりに

産業機械の安全方策は、ISO12100-1に記載されたリスク低減プロセスに従うのが基本である。このプロセスでは、本質的安全設計方策（ステップ1）や安全防護物の適用（ステップ2）などの設備安全方策によって、適切なリスク低減を図ることを基本としている。しかし、現実には、危険点近接作業のように、ステップ1や2の方策だけでは適切なリスク低減が達成できないものもある。

このため、本論文では、危険点近接作業も含めた災害防止戦略として、Fig.5に示すリスク低減プロセスを提案した。この戦略では、リスク管理区分、災害防止区分、及び支援保護装置という新たな概念を創出することで、危険点近接作業も含めた災害防止戦略の明確化を図った。また、以上の検討過程で、不確定性を考慮したリスク概念の再構築や、機械作業を対象とした演繹的災害防止対策も併せて提案した。特に、危険点近接作業に対しては以下の災害防止対策を提案した。

- 1) 安全防護領域の外側から作業したり、可動部を停止して作業できるようにするなどの作業方法の改善によって、ステップ1や2に相当する方策を実施する（リスク管理区分Ⅰの達成）。
- 2) ステップ1や2の対策が困難でも、支援保護装置の適用や制限された運転（低速運転）の実現などの設備安全方策によって、合理的に可能な限りリスクを低減させる（ALARP原則、リスク管理区分Ⅱの達成）。この場合、機械や支援保護装置の製造者から使用者に対して所定のルールに従ってリスク移転の合意を図る必要がある。
- 3) リスク管理区分がⅡである作業に対しては、作業や管理監督者などによる人的リスク低減方策を併用し、適切なリスク低減を目指す（リスク管理区分Ⅰに相当する水準の追求）。

以上の戦略は、ISO12100を補完する戦略としても活用できると考えられる。今後は、以上の戦略を具体的な産業機械に展開するとともに、実用的な支援保護装置を開発して行くのが課題である。

文 献

- 1) 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），pp.200-207
- 2) 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），pp.659-674
- 3) 杉本旭・蓬原弘一，安全の原理，日本機械学会論文集，Vol.56-No.530，C編（1990），pp.2601-2609
- 4) 杉本旭・糸川壯一・深谷潔・清水尚憲・梅崎重夫・池田博康・芳司俊郎・蓬原弘一，安全確認形安全の基本構造，日本機械学会論文集，Vol.54-No.505，C編（1988），pp.2284-2292
- 5) 蓬原弘一・杉本旭，安全確認形作業システムの論理的考察，日本機械学会論文集，Vol.56-No.529，C編（1990），pp.60-67
- 6) 杉本旭・蓬原弘一，安全制御系における安全情報のエネルギー伝達，日本機械学会論文集，Vol.56-No.530，C編（1990），pp.132-139
- 7) ISO/IEC GUIDE51，Safety aspects—Guidelines for their inclusion in standards，日本規格協会（1999）
- 8) ISO12100-1，Safety of machinery—Basic concepts, general principles for design—Part 1: Basic terminology, methodology，日本規格協会（2003）
- 9) Robens，Safety and Health at work，Report of the Robens Committee，（1972），Health and Safety Executive
- 10) 清水尚憲・梅崎重夫，機械安全分野における安全教育手法の基礎的研究—危険点近接作業を対象とした総合的安全方策—，日本機械学会山梨講演会（2004）pp.111-112
- 11) ハイブリッド，産業災害防止論，海文堂（1982），pp.21-27，
- 12) 池田博康・杉本旭，人間特性を考慮したロボット設計のための人体痛覚耐性値の評価，産業安全研究所研究報告 NIIS-RR-97，（1998），pp.9-16
- 13) 斉藤剛，ER流体を用いたアクチュエータに関する研究，東京工科大学博士学位論文（2001）
- 14) 糸川壯一・杉本旭・深谷潔・清水尚憲，安全制御における計測技術（非対称アクチュエータ），産業安全研究所特別研究報告RIIS-SRR-86，No.1（1986）pp.58-64
- 15) 梅崎重夫・清水尚憲・小林茂信・井土信彦・中村英夫・三平律雄・山下昌弘・川戸真二・田上憲一・石坂文二・松井龍二・鈴木常夫，フェールセーフな教示機能を備えたブランキングシステムの開発，日本機械学会論文集，68-670，C

- 1) 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

編 (2002), pp.1755-1783

- 16) 梅崎重夫・清水尚憲・小林茂信・井土信彦・中村英夫・三平律雄・山下昌弘・鷺崎一郎, フローティング機能を備えたロール機用安全システムの開発, 日本機械学会論文集, 68-672, C編(2002), pp.2316-2323

ISO/IECガイド51⁵⁾では「合目的性, 費用効果, 及び関係する社会の因習などとのバランスによって決定される」相対的なものであることを規定している。このため, 本論文では A_P , A_U , T_P 及び T_U の具体的な値について言及しなかったが, 今後はこの問題も含めた検討が必要である。

(平成17年10月14日受理)

[補足1] Fig.3の A_P , A_U , T_P 及び T_U について,