順序依存形故障論理を用いた安全度水準決定の定式化*

吉 村 達^{*1}, 佐 藤 吉 信^{*1}

Formulation for Determining SIL using Sequential Failure Logic

Itaru YOSHIMURA^{*2} and Yoshinobu SATO^{*2} Graduate School of Marine Science and Technology, Tokyo University of Marine Science and Technology,
2-1-6 Etchujima, Koto-ku, Tokyo, 135-8533 Japan

Recently computer systems have been widely applied to safety-related systems for achievement of safety functions. This general trend forced IEC to compile IEC 61508 as a standard related to functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems, i.e., E/E/PE SRS (SRS). Currently JIS includes the translated standard of IEC 61508, JIS C 0508. In accordance with the standard, an SRS is specified with its safety function(s) and safety integrity level (s) (SIL) and the SILs to be allocated to the SRS are specified with four levels of safety integrity. The standard requires assessing the risk reduction achieved by SRS using appropriate probabilistic techniques for allocation of SILs to SRS. However, the relationships among SILs, operation modes and hazardous event frequencies are not always cleared up yet. This paper presents a new model using two Sequential Failure Logics in order to describe causation of hazardous events in the overall system composed of equipment under control (EUC), EUC control system (BCS) and SRS. The SRS is assumed to implement a safety function in a dynamic demand state and assumed to have no automatic self-diagnosis functions. Then, the relationship among a dangerous undetected failure of SRS, demands for actuation of SRS and hazardous events brought about in the overall system is formulated based on the model. Moreover, new demand modes of operation and estimations of Hazardous Event Frequencies are proposed for allocation of SILs to SRS.

Key Words: Functional Safety, IEC 61508, Safety Integrity Level, Hazardous Event Frequencies, Sequential Failure Logic, Dynamic Demand State

1. は じ め に

近年, 安全に関連した機能を担うためにコンピュータを用いたシステムが使用されてきており, これらの機能安全に関する国際規格 IEC 61508 及び JIS C 0508 が発効され⁽¹⁾⁽²⁾, 種々の方面で適用されつつある⁽³⁾⁽⁴⁾. 規格では, 電気・電子・プログラマブル電子安全関連系(以下, SRS)による機能安全を全安全ライフサイクルと安全度水準(以下, SIL)との二つの基本的な方法論で確保している. 特に後者は, SRSによって実行される安全機能遂行失敗確率の目標水準を定める指標であり, SILについては二種類の運用モードに対し, 各々四つのレベルが設定されている.

また, SRS への SIL の割り当て過程においては, 確率論的手法を用いてリスク軽減目標, すなわち単位時間当たりの危険事象発生回数の統計的期待値(以下,

単に危険事象頻度)の低減目標の達成を評価することが推奨されている⁽¹⁾⁽²⁾. しかし, このために必要となる SIL, 作動要求頻度および危険事象頻度の関係について, 完全には明らかにされていない.

このような問題を解決すべく, 加藤らは SRS に自己診断機能がなくブルーテストによってのみ修復され, かつ作動要求が定常状態の場合に対して, 順序依存形故障論理を用いた危険事象モデルを定量化して危険事象頻度を計算するためのアルゴリズムを提案した⁽⁵⁾⁽⁶⁾. 順序依存形故障論理とは, 出力事象の生起が入力事象の発生順序にも依存する最小カット優先 AND 構造を用いて入出力の関係をモデル化する手法であり⁽⁷⁾, 人間-ロボットシステム等に応用されている⁽⁷⁾⁽⁸⁾.

また, 川原らは SRS のフォールトに対して自己診断があり, その検出により修理が行われる場合の SRS の危険側故障, 定常作動要求状態及び危険事象の関係を, 順序依存形故障論理と状態遷移図とによってモデル化及び定式化している⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾. その結果, 両モデルか

* 原稿受付 2003 年 6 月 26 日.

^{*1} 正員, 東京海洋大学大学院海洋科学技術研究科(☎ 135-8533 東京都江東区越中島 2-1-6).

E-mail: yoshi@e.kaiyodai.ac.jp

ら得られる危険事象頻度推定式は一致することが示されている⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。

本研究では、自己診断がないSRSについて、非正常作動要求状態における危険事象過程を加藤らと同様に順序依存形故障論理を用いてモデル化・定式化し、平均危険事象頻度推定式を導出する。用語法は原則としてJIS C 0508, JIS Z 8115⁽¹¹⁾に従うが、以下に主要なものを記す。

危険状態 人が潜在危険に曝露されている状況。

危険事象 危険状態によって危害が生じる事象。

リスク 危険事象の蓋然性と危害の過酷さの組合せ。
(本研究では危害の過酷さは一定として、危険事象の蓋然性のみを扱う)

作動要求状態 特定の安全機能の実行がSRSに要求される全体システムの状態(図1参照)。

作動要求 作動要求状態の発生。

完了 作動要求状態の終結。

フォールト ある要求された機能が遂行不可能なアイテムの状態。フォールトの形態は、例えば、遂行不能な機能の性質によって、安全側のフォールト、危険側のフォールトのように分類することができる。

危険側フォールト SRSの安全機能が喪失している状態。全フォールトの部分集合。

DUフォールト 自己診断のない危険側フォールト。ブルーテストまたは危険事象によってのみ発見される。

故障 ある機能ユニットの要求される機能遂行能力の終結(事象)。SRSは故障の後、フォールトとなる。

危険側故障 危険側フォールトをもたらす故障(以下、単に故障という)

ブルーテスト SRSのフォールトを見つけるために実施される定期テストと保全。必要に応じて、システムを“新品”又は實際上これに近い状態に修復するために、これを行う。(以下、PTという)

PT間隔 PT終了から次のPT開始までの時間間隔。

SRS EUCを安全な状態に移行させるため、又はEUCの安全な状態を維持するために必要な安全機能を行い、かつ、要求される安全機能に対して必要な安全度水準を達成するシステム。

以下に記号を定義する：

$Q_d(t)$ 全体システムが時刻 t で作動要求状態にある確率

Fig. 1 Overall system and safety-related systems

$\lambda_d[1/h]$ 時刻 t において作動要求状態でない条件下で、時刻 t における単位時間当たりの作動要求の発生確率(作動要求率)

$\mu_d[1/h]$ 時刻 t において作動要求状態の条件下で、時刻 t における単位時間当たりの作動要求の完了確率(完了率)

$\lambda_s[1/h]$ SRSの危険側故障率(以下、単に故障率という。)

$T[h]$ 定められたPT間隔時間

$\omega_i(t)[1/h]$ 時刻 t での論理(i)(ただし、 $i=1,2$)による危険事象頻度(次章参照)

$\omega(t)[1/h]$ 時刻 t での論理(1)及び(2)による危険事象頻度の合計

$\omega^*[1/h]$ $\omega(t)$ をPT間隔時間 T にわたって平均したPT間隔平均危険事象頻度

$t, u, T[h]$ 時間のパラメータ

2. 全体システムの構成と順序依存形危険事象論理

規格では、図1に示すように、全体システムの構成はEUC、EUC制御系(以下、BCS)、SRS、他技術安全関連系及び外的リスク軽減施設(以下、ERRF)でモデル化されている。BCSは危険事象またはその他の望ましくない事象が発生しないようにEUCを制御し、SRS、他技術安全関連系及びERRFはBCSが制御に失敗した時などに生じる危害を防止する冗長サブシステムである。これらのサブシステムが機能できない状態で作動要求が発生すると、事故など危険事象が発生

Fig. 2 Sequential failure logics

する⁽⁴⁾⁽¹²⁾。加藤らや川原らが想定した全体システムは、このようなシステムを簡略化した、一基の EUC, BCS および SRS で構成され、このうち SRS は単一の安全機能を遂行するものであった⁽⁵⁾⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。また、PT や SRS の保全時にも EUC を停止せず、従って作動要求は定常状態と仮定している。本研究では、同様の構成の全体システムを対象としてモデル化及び定式化するが、PT 時には EUC を停止させるので、作動要求が非定常状態となる点が従来の研究と本質的に異なる⁽⁵⁾⁽⁶⁾⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。

このように簡易化した全体システムにおける危険事象論理は、優先 AND ゲートを用いて図 2 のように表現される⁽⁵⁾⁽⁹⁾。本図から以下の二つの危険事象論理が成り立つ。すなわち、

1. 「DU フォールト・作動要求」論理：SRS の DU フォールト時に、作動要求が生じて危険事象が生起する。(以下、この危険事象論理を論理 (1) という。)
2. 「作動要求状態・故障」論理：作動要求状態時に、SRS に故障が生じて危険事象が生起する。(以下、この危険事象論理を論理 (2) という。)

3. 危険事象頻度の定量化

本章では、前述した論理 (1) 及び (2) を用いて危険事象頻度推定式を導出する。まず前提条件は以下の通りである。

1. 作動要求と故障は、相互に統計的に独立である。
2. 作動要求の発生と完了は、作動要求率 λ_d 及び完了率 μ_d を持つ指数分布でモデル化できる。
3. SRS の故障は故障率 λ_s をもつ指数分布でモデル化され、当該危険側フォールトは PT または危険事象により検知・修復されるまで継続する。すなわち、故障は DU フォールトのみをもたらす。また、 $0 < \lambda_s T \ll 1$ が常に成り立つ。
4. 危険事象が生起した場合、全体システムは速やか

Fig. 3 Hazardous event through logic (1)

に回復する。作動要求状態にあっても危険事象が生起しない場合、SRS は機能していることが証明される。

5. PT 間隔平均危険事象頻度 ω^* は $\omega^* \ll 1 [1/h]$ を満たす。
6. PT により、いかなる DU フォールトも検知され、SRS は新品同様に回復する。
7. PT 時に EUC を停止して保全する。すなわち、PT 時に作動要求は生じず、従って、危険事象も生起しない。また、全体システムが新品同様の状態になった時点 PT 終了時とし、このとき全体システムの運用を開始する。

前提条件 (3) の λ_s の条件は、SRS に対する規格要求 $\lambda_s < 10^{-5} [1/h]$ を根拠としている⁽¹⁾⁽²⁾。また、前提条件 (7) が従来の研究⁽⁵⁾⁽⁶⁾⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾と異なる。

3.1 論理 (1) における危険事象頻度推定式 SRS の故障、作動要求 (Demand) 及び危険事象 (H.E.) の時間推移を図 3 に示す。本研究では、図 3 に示すように、ある PT が完了した時刻すなわち全体システムが稼働し始めた時刻 t_0 から次回 PT 開始までの時刻 $t_0 + T$ までの PT 間隔におけるリスク、すなわち危険事象頻度の推定を行う。

図 3 中、時刻 t_n は、ある PT 間隔 $(t_0, t_0 + T]$ を十分に大きい数 N で等分した時の、ある時刻を表しており $t_n = t_0 + n\Delta t$ ($n = 1, 2, 3, \dots, N$)、 $\Delta t = T/N$ である。また、 $t_0 < t_k < t_j < t_i < t_0 + T$ が常に成り立つ。

図 3 より、まず微小時間 $(t_j - \Delta t, t_j]$ で SRS の故障が

発生して DU フォールトとなり、次に同じく微小時間 $(t_i - \Delta t, t_i]$ で作動要求が発生して、危険事象が全体システムに生起する。その後、前提条件 (4) により全体システムは速やかに回復する。また、前提条件 (2) 及び (3) より SRS の故障及び作動要求は指数分布を仮定しているので、微小時間 $(t_i - \Delta t, t_i]$ でそれらが 2 回以上発生する確率は $o(\Delta t)$ である⁽¹³⁾。従って、危険事象も当該微小時間で 2 回以上発生する確率は $o(\Delta t)$ となる。即ち、

$$Pr\{(t_i - \Delta t, t_i] \text{ で危険事象が発生}\} = \omega_1(t_i)\Delta t + o(\Delta t) \quad (1)$$

と書けるので、

$$\begin{aligned} \omega_1(t_i)\Delta t &= \sum_{j=1}^i Pr\{(t_j - \Delta t, t_j] \text{ で発生した SRS の} \\ &\text{故障が } t_i \text{ までは修復されておらず、かつ} \\ &[t_j - \Delta t, t_i - \Delta t] \text{ で作動要求状態でない条件下で} \\ &(t_i - \Delta t, t_i] \text{ において作動要求が発生する}\}. \end{aligned} \quad (2)$$

ここで上記の記述を以下のような記号に置き換える。すなわち

$U_0: t_j - \Delta t$ で SRS が DU フォールトでない、
 $U_1: (t_j - \Delta t, t_j]$ で SRS に故障が発生する、
 $U_2: \text{SRS の DU フォールトが } t_i \text{ まで修復されない、}$
 $U_3: [t_j - \Delta t, t_i - \Delta t]$ で作動要求状態でない、
 $U_4: \text{時刻 } t_j - \Delta t \text{ 以降の最初の作動要求が } (t_i - \Delta t, t_i]$
 で生ずる。

すると、前提条件 (1) より、 U_0 と U_3 、 U_0 と U_4 、 U_1 と U_3 、 U_1 と U_4 、 U_2 と U_3 及び U_2 と U_4 とはそれぞれ相互に独立、さらに前提条件 (3) より $Pr\{U_2|U_0 \cap U_1 \cap U_3 \cap U_4\} = 1$ であるから、

$$\begin{aligned} \omega_1(t_i)\Delta t &= \sum_{j=1}^i Pr\{U_0 \cap U_1 \cap U_2 \cap U_3 \cap U_4\} \\ &= \sum_{j=1}^i Pr\{U_0\}Pr\{U_1|U_0\}Pr\{U_3\}Pr\{U_4|U_3\}. \end{aligned} \quad (3)$$

$Pr\{U_0\}$ は時刻 $t_j - \Delta t$ 以前に発生した最後の作動要求が時刻 t_k で完了し、SRS が時刻 t_k から時刻 $t_j - \Delta t$ まで故障しない確率であるから、前提条件 (3) より

$$Pr\{U_0\} = e^{-\lambda_s(t_j - \Delta t - t_k)} = e^{-\lambda_s(j-k-1)\Delta t} \simeq 1. \quad (4)$$

ここで、

$$Pr\{U_1|U_0\} = \lambda_s \Delta t. \quad (5)$$

次に U_3 を以下のように置き換える。すなわち、

$$Pr\{U_3\} \equiv Pr\{U'_3 \cap U''_3\} = Pr\{U'_3\}Pr\{U''_3|U'_3\}.$$

ただし、

$U'_3: t_j - \Delta t$ で作動要求状態でない、

$U''_3: t_i - \Delta t$ まで作動要求が生じない。

ここで記号の定義より $Pr\{U'_3\} = 1 - Q_d(t_j - \Delta t)$ 、 $Pr\{U''_3|U'_3\}$ は時刻 t_k から時刻 $t_j - \Delta t$ まで作動要求が発生しなかった条件下で、引き続き時刻 $t_i - \Delta t$ まで作動要求が発生しない確率であるから

$$\begin{aligned} Pr\{U_3\} &= Pr\{U'_3\}Pr\{U''_3|U'_3\} \\ &= (1 - Q_d(t_j - \Delta t)) \frac{e^{-\lambda_d(t_i - \Delta t - t_k)}}{e^{-\lambda_d(t_j - \Delta t - t_k)}} \\ &= (1 - Q_d(t_j - \Delta t))e^{-\lambda_d(t_i - t_j)}. \end{aligned} \quad (6)$$

また、

$$Pr\{U_4|U_3\} = \lambda_d \Delta t. \quad (7)$$

式 (3) から (7) より、

$$\omega_1(t_i)\Delta t = \sum_{j=1}^i \lambda_s \Delta t (1 - Q_d(t_j - \Delta t)) e^{-\lambda_d(t_i - t_j)} \lambda_d \Delta t. \quad (8)$$

$t_i = t$ 、 $t_j = u$ とおき、さらに $N \rightarrow \infty$ とすると

$$\omega_1(t) = \int_{t_0}^t \lambda_s \lambda_d (1 - Q_d(u)) e^{-\lambda_d(t-u)} du. \quad (9)$$

3.2 論理 (2) における危険事象頻度推定式 SRS の故障、作動要求 (Demand) 及び危険事象 (H.E.) の時間推移を図 4 に示す。図 3 と同様に $t_n = t_0 + n\Delta t$ ($n = 1, 2, 3, \dots, N$)、 $\Delta t = T/N$ である。また、 $t_0 < t_j < t_i < t_0 + T$ が常に成り立つ。

図 4 より、まず微小時間 $(t_j - \Delta t, t_j]$ で作動要求が発生して作動要求状態となり、次に同じく微小時間 $(t_i - \Delta t, t_i]$ で SRS が故障して危険事象が全体システムに生起する。その後、前提条件 (4) により全体システムは速やかに回復する。前節と同様に、

$$Pr\{(t_i - \Delta t, t_i] \text{ で危険事象が発生}\} = \omega_2(t_i)\Delta t + o(\Delta t). \quad (10)$$

さらに、

$$\begin{aligned} \omega_2(t_i)\Delta t &= \sum_{j=1}^i Pr\{(t_j - \Delta t, t_j] \text{ で発生した作動要求が} \\ &t_i \text{ まで完了せず } [t_j - \Delta t, t_i - \Delta t] \text{ で SRS が DU} \\ &\text{フォールトでない条件下で } (t_i - \Delta t, t_i] \text{ で SRS が} \\ &\text{故障する}\}. \end{aligned} \quad (11)$$

Fig. 4 Hazardous event through logic (2)

記号を,

E_0 : 時刻 $t_j - \Delta t$ で作動要求状態でない,

E_1 : $(t_j - \Delta t, t_j]$ で作動要求が発生,

E_2 : 当該作動要求が t_i までは完了しない,

E_3 : $[t_j - \Delta t, t_i - \Delta t]$ で SRS は DU フォールトでない,

E_4 : $(t_i - \Delta t, t_i]$ で SRS が故障する,

と定義すれば, 前提条件 (1) より, E_0 と E_3 , E_0 と E_4 , E_1 と E_3 , E_1 と E_4 , E_2 と E_3 及び E_2 と E_4 とはそれぞれ相互に独立なので, 式 (11) は,

$$\begin{aligned} \omega_2(t_i)\Delta t &= \sum_{j=1}^i \Pr\{E_0 \cap E_1 \cap E_2 \cap E_3 \cap E_4\} \\ &= \sum_{j=1}^i \Pr\{E_0\} \Pr\{E_1|E_0\} \Pr\{E_2|E_0 \cap E_1\} \\ &\quad \times \Pr\{E_3\} \Pr\{E_4|E_3\}. \end{aligned} \quad (12)$$

ここで,

$$\Pr\{E_0\} = 1 - Q_d(t_j - \Delta t), \quad (13)$$

$$\Pr\{E_1|E_0\} = \lambda_d \Delta t, \quad (14)$$

$$\Pr\{E_2|E_0 \cap E_1\} = e^{-\mu_d(t_i - t_j)}. \quad (15)$$

次に E_3 である確率をもとめる。まず E_3 を以下のよう置き換える。すなわち,

$$\Pr\{E_3\} \equiv \Pr\{E'_3|E''_3\} = \Pr\{E'_3\} \Pr\{E''_3|E'_3\}.$$

ただし,

E'_3 : $(t_j - \Delta t, t_j]$ で SRS が DU フォールトでない,

E''_3 : 時刻 $t_i - \Delta t$ まで故障しない,

もし時刻 $t_j - \Delta t$ で SRS が DU フォールトの場合, この時点で危険事象が生起してしまい, これは論理 (1) に該当する。また, 故障と作動要求が微小時間内に両方発生する確率は $o(\Delta t)$ となるのでこれを無視し, 本論理においては当該時刻において SRS が DU フォールトでない場合のみを考慮する。すると, $\Pr\{E'_3\} = 1$, さらに前提条件 (4) より作動要求が発生した $(t_j - \Delta t, t_j]$ において危険事象が生起しなかったことで SRS の正常状態が確認できるので $\Pr\{E''_3|E'_3\} = e^{-\lambda_s(t_i - \Delta t - (t_j - \Delta t))}$ 。従って, 前提条件 (3) より,

$$\begin{aligned} \Pr\{E_3\} &= \Pr\{E'_3\} \Pr\{E''_3|E'_3\} = e^{-\lambda_s(t_i - t_j)} \\ &= e^{-\lambda_s(t_i - j)\Delta t} \simeq 1. \end{aligned} \quad (16)$$

また,

$$\Pr\{E_4|E_3\} = \lambda_s \Delta t. \quad (17)$$

式 (12) から (17) より

$$\omega_2(t_i)\Delta t = \sum_{j=1}^i (1 - Q_d(t_j - \Delta t)) \lambda_d \Delta t e^{-\mu_d(t_i - t_j)} \lambda_s \Delta t. \quad (18)$$

$t_i = t$, $t_j = u$ とおき, さらに $N \rightarrow \infty$ とすると

$$\omega_2(t) = \int_{t_0}^t \lambda_s \lambda_d (1 - Q_d(u)) e^{-\mu_d(t-u)} du. \quad (19)$$

3.3 PT 間隔平均危険事象頻度 論理 (1) と (2) は相互に排反であるから, 式 (9) 及び (19) から $\omega(t)$ は,

$$\begin{aligned} \omega(t) &= \omega_1(t) + \omega_2(t) \\ &= \int_{t_0}^t \lambda_s \lambda_d (1 - Q_d(u)) (e^{-\lambda_d(t-u)} + e^{-\mu_d(t-u)}) du. \end{aligned} \quad (20)$$

任意の PT 間隔 $(t_0, t_0 + T]$ における ω^* は,

$$\begin{aligned} \omega^* &= \frac{\int_{t_0}^{t_0+T} \omega(t) dt}{T} = \frac{\lambda_s \lambda_d}{T} \\ &\quad \times \int_{t_0}^{t_0+T} \int_{t_0}^t (1 - Q_d(u)) (e^{-\lambda_d(t-u)} + e^{-\mu_d(t-u)}) du dt. \end{aligned} \quad (21)$$

前提条件 (6) より, 各 PT 間隔における危険事象発生過程は同様になるので $t_0 = 0$ としても一般性を失わない。時刻 u において作動要求状態にある確率 $Q_d(u)$ は⁽¹⁴⁾,

$$Q_d(u) = \frac{\lambda_d}{\lambda_d + \mu_d} (1 - e^{-(\lambda_d + \mu_d)u}). \quad (22)$$

式 (21) 及び (22) より,

$$\begin{aligned} \omega^* &= \frac{\lambda_s \lambda_d}{T} \int_0^T \int_0^t (1 - Q_d(u)) (e^{-\lambda_d(t-u)} + e^{-\mu_d(t-u)}) du dt \\ &= \lambda_s \left(1 - \frac{\mu_d}{\lambda_d(\lambda_d + \mu_d)T} - \frac{\lambda_d - \mu_d}{\lambda_d \mu_d T} e^{-\lambda_d T} \right. \\ &\quad \left. + \frac{\lambda_d}{\mu_d(\lambda_d + \mu_d)T} e^{-(\lambda_d + \mu_d)T} \right). \end{aligned} \quad (23)$$

Table 1 New modes of operation for allocation of SILs for dynamic demand-state SRSs without self-diagnosis

作動要求モード	PT 間隔平均 危険事象頻度 [1/h]
低頻度-短継続 ($\lambda_d \ll 1/T$ and $\mu_d \gg 1/T$)	$0.5\lambda_s\lambda_d T$
低頻度-中継続 ($\lambda_d \ll 1/T$ and $\mu_d \approx 1/T$)	$0.87\lambda_s\lambda_d T$
低頻度-長継続 ($\lambda_d \ll 1/T$ and $\mu_d \ll 1/T$)	$\lambda_s\lambda_d T$
中頻度-短継続 ($\lambda_d \approx 1/T$ and $\mu_d \gg 1/T$)	$0.37\lambda_s$
中頻度-中継続 ($\lambda_d \approx \mu_d \approx 1/T$)	$0.57\lambda_s$
中頻度-長継続 ($\lambda_d \approx 1/T$ and $\mu_d \ll 1/T$)	λ_s
高頻度-短継続 ($\lambda_d \gg 1/T$ and $\mu_d \gg 1/T$)	
高頻度-中継続 ($\lambda_d \gg 1/T$ and $\mu_d \approx 1/T$)	
高頻度-長継続 ($\lambda_d \gg 1/T$ and $\mu_d \ll 1/T$)	

4. 作動要求モードと ω^* の推定式

λ_d , μ_d などの各パラメータ値が既知の場合、式 (23) により ω^* を計算することができるが、各パラメータの大小関係、すなわち T と λ_d 及び μ_d の関係が明確な場合には、より簡易的に ω^* を推定することができる。この方法を表 1 に示す。この表では、 ω^* の推定式は 6 種類に分けられ 9 種類の作動要求モードが提案されている。このうち、「低頻度-短継続」、「高頻度-短継続」、「中頻度-長継続」、「高頻度-長継続」の各モードにおける推定式は加藤らによる定常状態作動要求の場合の同様の各モードにおける推定式に一致する⁽⁶⁾。任意のリスク軽減目標に対して、以下の方法により SIL を SRS に簡便に割り当てることができる。すなわち、

1. SRS を装備しない場合の全体システムの危険事象頻度（または、危険事象発生率）を求める。（この危険事象頻度は、作動要求率 λ_d と等価となる。）
2. 許容できるリスクのレベル及び本レベル内で収めるべき危険事象頻度 ω^* を決定する。
3. 1. で求めた危険事象頻度が 2. で決定した ω^* よりも高い場合、表 1 から、作動要求モードなどを勘案しながら、 ω^* を許容できるリスクの頻度以下にする SRS の故障率 λ_s を算出する。
4. 3. で算出した λ_s を用いて SIL を決定し、全体システムに当該 SIL をもつ SRS を設置する。こうして、全体システムの ω^* は、許容リスクのそれを下回ることになる。

5. お わ り に

IEC 61508 (JIS C 0508) を実施するには、SRS の作動要求モードと危険事象頻度との関係を明らかにする必要がある。そこで、本報では、まず SRS に自己診断がない全体システムを想定し、PT 時に EUC を停止する場合、すなわち非定常作動要求状態における PT 間隔の危険事象過程を順序依存形危険事象論理を用いてモデル化した。次に、これに基づき SRS の故障率、PT 間隔時間、作動要求率、完了率及び PT 間隔平均危険事象頻度 ω^* との関係を実定式化した。ここで導出された ω^* の推定式は、前提条件 (3) の $0 < \lambda_s T \ll 1$ の条件下で導かれたものであるが、規格の λ_s の要件 $0 < \lambda_s < 10^{-5} [1/h]$ 及び一般的な PT 間隔時間が約 $10^4 [h]$ (約一年) 程度であることを考慮すると、規格への適用は十分であると考えられる。さらに λ_d , μ_d 及び T の関係を用いた簡易的な ω^* の算出方法を示した。

本研究では順序依存形危険事象論理を用いてモデル化を行なったが、この他の危険事象過程のモデル化としてマルコフ過程を用いるものが挙げられる。マルコフ過程を用いて本報で得られた危険事象頻度推定式の妥当性を検証することも興味深い研究課題となろう。

文 献

- (1) IEC 61508, (1998), IEC, Geneva.
- (2) JIS C 0508, (1999), 日本規格協会.
- (3) T.Kawahara, T.Kushibiki, K.Tsui, Y.Sato, *Safety-Integrity of Safety-Related System with Human Beings*, Procs. the 5th International Conference on PSAM 2000, vol.4 (2000), 2411-2417.
- (4) M.Yamashita, Y.Tanabe, K.Ohrui, Y.Sato, *Safety Integrity of SRSs with Common Components*, Procs. the 5th International Conference on PSAM 2000, vol.1 (2000), 473-479.
- (5) 加藤栄一・佐藤吉信・堀籠教夫, 機能安全規格案における安全度水準モデルについて, 信学論 (A), vol.J82-A no.2 (1999), 247-255.
- (6) 加藤栄一・佐藤吉信・堀籠教夫, 機能安全規格案における安全度水準モデルについて-前情におけるアルゴリズムの若干の修正, 信学技法, R99-18 (1999), 247-255.
- (7) 佐藤吉信・井上紘一・熊本博光, 人間-ロボット系の安全性評価 (第 3 報, 順序依存形故障論理の定量化について), 機論, 52-475, C (1986), 1110-1117.
- (8) 龍偉・佐藤吉信, 共通の故障率と修復率をもつ順序依存形故障論理の定量化 (解析解の導出と FTA への適用について), 機論, 66-649, C (2000), 297-302.
- (9) 川原卓也・市塚昭弘・佐藤吉信, 自己診断を有する安全関連系の安全度水準モデル, REAJ 誌 2002, vol.24 No.8 (2002), 731-740.
- (10) 川原卓也・市塚昭弘・佐藤吉信, 自己診断を有する安全関連系の状態遷移モデルと機能安全評価, 信学論 (A), vol.J86-A, no.3 (2003), 241-249.

- (11) JIS Z 8115, (2000), 日本規格協会.
 - (12) 関口隆・佐藤吉信, 機械安全機能安全実用マニュアル, 日刊工業新聞社, (2001).
 - (13) Mann, N.R., *Method for Statistical Analysis of Reliability and Life Data*, (1974), 121, John Willey & Sons, New York.
 - (14) Henley, E.J. and Kumamoto, H., *Probabilistic Risk Assessment and Management for Engineers and Scientists*, 2nd ed., (1996), 303, IEEE Press.
-