

厚生労働科学研究費補助金  
労働安全衛生総合研究事業

プレス作業を対象とした安全技術の高度化に関する研究

総合研究報告書  
(平成17～19年度)

主任研究者 梅崎重夫

平成20(2008)年3月

## 目 次

### I. 総合研究報告

#### プレス作業を対象とした安全技術の高度化に関する研究

- 1. はじめに ..... (1)
- 2. プレス機械の労働災害分析と対策 ..... (2)
- 3. 災害防止対策に関する考察 ..... (6)
- 4. おわりに ..... (7)
- 5. 結論 ..... (7)

### II. 詳細資料 サーボプレスの安全要件の解明 ..... (9)

厚生労働科学研究費補助金(労働安全衛生総合研究事業)  
総括・分担研究報告書

プレス作業を対象とした安全技術の高度化に関する研究(平成17～19年度)

主任研究者	梅崎重夫	独立行政法人労働安全衛生総合研究所	上席研究員
分担研究者	清水尚憲	同	上席研究員
研究協力者	斉藤 剛	同	研究員

研究要旨

本研究では、動力プレス機械構造規格の改正作業等に活用するために、①プレス機械の労働災害分析、②二次加工用プレスブレーキと大型プレス機械の安全システムの高度化、及び③サーボプレスの安全要件の解明を重点に研究を実施した。

このうち、プレス機械の労働災害分析は、平成15年から17年の間に全国で発生したプレス機械を起因物とする休業4日以上 の災害を対象に実施した。その結果、災害の大幅な減少を図るには、(1)機械安全規格であるISO12100や欧州安全規格であるEN692、EN693などに記載された保護方策を日本でも取り入れること、(2)現在問題となっているサーボプレス、プレスブレーキ、及び大型プレス機械を対象とした新たな安全システムの開発を進めること、(3)安全囲いの標準化や安全囲いを取り外したときは機械が動かない可動式ガードの採用、(4)安全装置を不使用とできるキースイッチや切り替えスイッチの撤去、(5)両手保持が必要な作業にも利用できる安全装置の採用、(6)寸動時でも安全装置を有効とするか寸動は両手操作でなければ行なえない方式の採用、(7)安全装置の防護高さの確保や側面・下方ガード(光線用)の設置、(8)手払い・手引き・手工具を使用しない作業形態の検討などが必要であることが判明した。

また、二次加工用プレスブレーキと大型プレス機械の安全システムの高度化を図った。このうち、二次加工用プレスブレーキでは安全要件の解明を図るとともに、曲げられた加工物とスライド・金型側面の間に手指が挟まれる災害が4分の1近く発生していることを考慮し、レーザー式安全装置と軟接触式バンパーを併用した新たな安全システムを構築した。また、大型プレス機械では、供連れや領域間移動を考慮した安全要件の明確化を図るとともに、これらを考慮した安全システムの高度化を図った。さらに、サーボプレスの安全要件の解明では、ドイツのダルムシュタット工科大学に齋藤研究員を半年間留学させ、当該大学との連携の下に、最近の機能安全技術も考慮したサーボプレスの安全要件の解明を試みた。

以上の成果は動力プレス機械構造規格等の改正作業やサーボプレスのJIS規格の制定作業に直ちに活用できただけでなく、第11次労働災害防止計画でも重要な課題であるプレス災害防止対策に活用できると考えられる。

## 1 はじめに

プレス機械による労働災害（製造業、休業4日以上）は、労働安全衛生法が施行された直後の昭和49年に5,450件であったものが平成16年には1,227件と大幅に減少した。しかし、災害の減少の多くは、表1に示すように、旧式のポジティブクラッチ式プレスの廃棄などによるものと考えられ、フリクションクラッチ式の機械プレス、液圧プレス、プレスブレーキなどによる災害は過去20年間近く横ばい状況にある<sup>1)</sup>。また、最近では、サーボプレスの急速な普及、大型プレス機械での死亡災害の多発、対策の困難な二次加工用プレスブレーキの存在など、新たな安全技術が必要な問題も認められる。

さらに、著者らが首都圏の製造業で発生したプレス機械による挟まれ災害（死亡または休業4日以上）1,395件を分析したところ、傷害部位（手指など）が切断または座滅に至ったと判定できるプレス災害の割合は、図1に示すように、平成11年には46.8%、平成13年には44.5%であったものが、平成15年は55.9%、平成16年は59.0%に達しており、災害の重篤化が推察される。

以上のように、プレス機械の労働災害は比較的新しいタイプの機械で災害発生件数が横ばいとなる一方で、災害の重篤化も推察され、サーボプレスを中心に新たな安全技術を必要とする問題も認められるなど、災害防止対策の抜本的見直しが必要と考えられる。このため、本報では、最近のプレス機械による労働災害を著者らが提案する典型的災害事例を用いて分析し、今後望まれるプレス災害防止対策を考察した。また、現在特に緊急性を要する課題として二次加工用プレスブレーキと大型プレス機械の安全システムの高度化、及びサーボプレスの安全要件の解明について検討したので報告する。

なお、本報では機械安全国際規格 ISO12100-1（機械類の安全性—設計のための基本概念、一般原則—第1部：基本用語、方法論）<sup>2)</sup>で定義している「保護装置」を労働安全衛生規則第131条にしたがって「安全装置」と呼ぶ。ただし、この場合の安全装置は「プレス機械又はシャワーの安全装置構造規格」にしたがってガード式、両手操作式、光線式、手引き式、手払い式に限る。同様に、ISO12100-1で定義している「固定式ガード」を労働安全衛生規則第131条にしたがって「安全囲い」と呼ぶことがある。さらに、大型プレス機械とは本報では圧力能力が500トン以上の機械とする。

## 2 プレス作業の労働災害分析と対策

### 2.1 分析対象

本来、一度経験した災害は再び繰り返すことのないように抜本的な再発防止対策を講じるべきである。しかし、プレス機械では過去に発生した災害と同一または類似の災害が繰り返し発生しているのが現状である。著者らは、この繰り返し災害の発生状況をプレス機械の種類ごとに調査するために、平成15年から17年の間に全国の製造業で発生したプレス機械を起因物とする労働災害（休業4日以上）の詳細分析を実施した。

内訳は、フリクションクラッチ式プレスが460件、ポジティブクラッチ式プレスが201件、プレスブレーキが177件、液圧プレスが74件である。ただし、対象業種は製造業に限定し、事故の型は「挟まれ・巻き込まれ」に限定した。また、すべての県を対象としていないなどの理由から、この3年間に日本国内で発生した全事例が対象となっているわけではない。

併せて、大型プレスでは、平成5年から平成14年までに発生した大型プレス機械（圧力能力500トン以上）による死亡災害事例4件を対象とした。ただし、対象業種は製造業に限定し、事故の型は「挟まれ・巻き込まれ」に限定した。

### 2.2 分析結果と対策の検討

表2は、この分析によって得られたプレス機械の典型的災害事例である。ここでは、フリクションクラッチ式プレスでの分析結果を例示した。この分析で特に注目すべき結果は次のとおりであった。

#### (1) フリクションクラッチ式プレス

このプレスでは、安全装置の不使用が194件（42.2%）と多かった。この中には、安全装置が使用できるにもかかわらず生産性が阻害されるのを嫌って使用しないのが109件（23.7%）、材料を両手で保持するために安全装置が使用できないのが35件（7.6%）、金型交換や試打ちのために安全装置を無効としたのが9件（2.0%）、安全装置を無効にした後に復旧を忘れたのが25件（5.4%）などの事例が認められた。また、安全装置の防護範囲不足が81件（17.6%）と多かった。この中では、光線式安全装置の下方から手が金型内に進入する事例が48件（10.4%）、光線式安全装置の側面から手が金型内に進入

表1 プレス機械による労働災害の発生件数の推移（休業4日以上）

（単位：件）

機械の種類	昭和 58 年	昭和 61 年	平成 元 年	平成 4 年	平成 7 年	平成 10 年	平成 13 年	平成 16 年
ポジティブクラッチ式プレス	2,540 (56.8%)	2,061 (55.7%)	1,965 (54.5%)	738 (31.6%)	363 (21.2%)	422 (26.3%)	321 (27.7%)	248 (20.2%)
フリクションクラッチ式プレス	299 (6.7%)	432 (11.7%)	476 (13.2%)	321 (13.7%)	417 (24.3%)	271 (16.9%)	301 (26.0%)	355 (28.9%)
液圧プレス	360 (8.0%)	325 (8.8%)	202 (5.6%)	304 (13.0%)	220 (12.8%)	204 (12.7%)	120 (10.4%)	198 (16.1%)
プレスブレーキ、ベンダー	191 (4.3%)	271 (7.3%)	316 (8.8%)	196 (8.4%)	167 (9.7%)	265 (16.5%)	187 (16.1%)	185 (15.1%)
その他のプレス	1,085 (24.2%)	609 (16.5%)	646 (17.9%)	776 (33.3%)	546 (32.0%)	445 (27.6%)	229 (19.8%)	241 (19.9%)
合 計	4,475 (100.0%)	3,698 (100.0%)	3,605 (100.0%)	2,335 (100.0%)	1,713 (100.0%)	1,607 (100.0%)	1,158 (100.0%)	1,227 (100.0%)

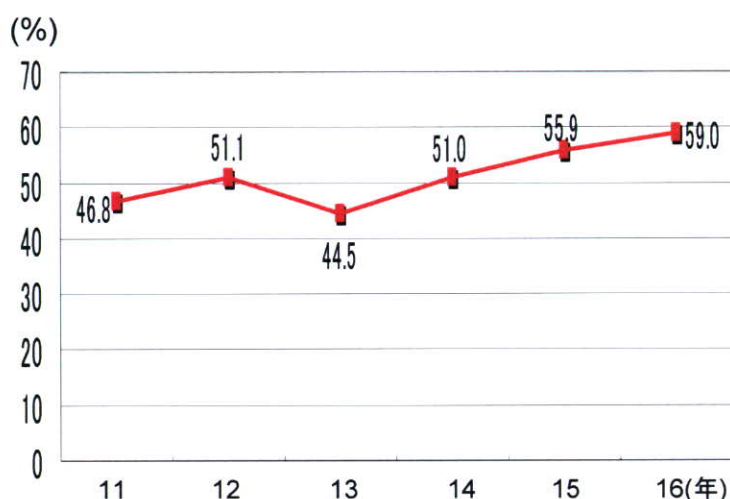


図1 傷害部位が切断や座滅に至ったプレス災害の割合



写真1 全周囲防護の例

する事例が20件（4.3%）あった。

以上のうち、安全装置の不使用は、①安全装置を不使用とするキースイッチや切り替えスイッチの撤去（これが困難な場合は作業主任者による管理の徹底）、②材料の両手保持が必要な作業にも利用できる安全装置の適用（当研究所の特許第 3603084 号のブランキングシステム<sup>3)</sup>や特許第 3540294 号のフローティングシステム<sup>4)</sup>など）、③寸動時でも安全装置を有効とするか、寸動は両手操作でなければ行なえないようにする方式の採用などが考えられる。

また、安全装置の範囲不足は、④安全装置の防護高さの確保、⑤側面ガードや下方ガード（光線式安全装置の下方からの手指の進入防止用）の設置などの方策が考えられる。実際、日本では光線式で正面だけを保護しているプレスが大部分であるが、欧州ではプレス機械の正面の手指を入れる部分以外は、側面、背面、上下面を含めた保護が常識となっている。以後、著者らはこれを便宜上「全周囲防護」<sup>5)</sup>と呼んでいる。写真1にドイツで実施されている全周囲防護の例を示す。このような全周囲防護の設置が、安全装置の防護範囲不足に対して有効と考えられる。

## (2) ポジティブクラッチ式プレス

このプレスでは、安全措置なしが54件（26.9%）、安全装置の不使用が34件（16.9%）、安全囲いの不備が22件（10.9%）と多かった。

このうち、安全装置が使用できるのに使わない事例28件（13.9%）の中では、他のプレスに見られない特徴として、手引き式や手払い式の不使用が16件と不使用全体の57.1%を占めていた。また、安全

表2 プレス機械の典型的災害事例の分析結果（フリクションクラッチ式プレス）

(単位:件)

事故の型	災害の原因	発生件数及び比率	
挟まれ 431 (93.7%)	安全措置なし	自動・専用プレス以外	15 (3.3%)
		自動・専用プレス	12 (2.6%)
	安全型の不備(隙間が大きい等)		0
	安全囲いの不備	取り外し	2 (0.4%)
		隙間から手を入れる	1 (0.2%)
		側面から手を入れる	0
		背面から手を入れる	0
		上方から手を入れる	0
		その他・不明	2 (0.4%)
	安全装置関係の不備	安全装置が使用できるのに使わない	109 (23.7%)
		材料両手保持のため安全装置が使えない	35 (7.6%)
		金型交換等のため安全装置を無効とする	13 (2.8%)
		試打ちのために安全装置を無効とする	9 (2.0%)
		無効化の後に安全装置の復旧を忘れる	25 (5.4%)
		その他・不明	3 (0.7%)
		下方	48 (10.4%)
		上方	1 (0.2%)
		側面	20 (4.3%)
		背面	3 (0.7%)
		前方の補助光軸	2 (0.4%)
		全体(手払い式の防護範囲不足に限る)	0
		不明	7 (1.5%)
		改造による無効化	10 (2.2%)
		安全距離の不足	15 (3.3%)
		安全装置の故障	5 (1.1%)
		不適切な安全装置の選択	0
		調整不十分	0
		手引き式	0
		手払い式	1 (0.2%)
		その他・不明	0
	不適当な行程の選択	連続	15 (3.3%)
		一行程	7 (1.5%)
		寸動	4 (0.9%)
		その他・不明	0
	故障(安全装置以外)または誤動作によるスライドの二度落ちなど	クラッチ/ブレーキの故障や誤動作	5 (1.1%)
		電磁弁の故障や誤動作	2 (0.4%)
		制御回路の故障や誤動作	2 (0.4%)
		配線の断線、短絡	1 (0.2%)
		その他	1 (0.2%)
		原因不明	9 (2.0%)
	周辺装置からの信号によって突然機械が起動		4 (0.9%)
	他の作業者が誤って機械を起動		8 (1.7%)
	電源を落とさずに金型交換する(ポジティブクラッチ式に限る)		0
	手工具の不使用		4 (0.9%)
	その他・不明		43 (9.3%)
飛来・落下 28 (6.1%)	金型の破片が飛来		4 (0.9%)
	材料・加工物の飛来		2 (0.4%)
	金型が落下		20 (4.3%)
	その他・不明		2 (0.4%)
その他・不明 1(0.2%)			1 (0.2%)
合計			460(100.0%)

注)原因が重複しているものがあるため、発生件数を加算した件数と合計の件数は一致しない。

表3 プレスブレーキによる挟まれ・巻き込まれ災害の形態

(単位:件)

挟まれ・巻き込まれ災害の形態	発生件数及び比率
上金型と下金型の間に	84 (49.4%)
曲げられた加工物(金属板)とスライド側面等の間に	42 (24.7%)
上記以外(下型とバックゲージ、バックゲージと加工物の間など)	9 (5.3%)
不明	35 (20.6%)
合計	170(100.0%)

囲いの不備では、安全囲いを取り外した事例が 9 件 (4.5%)、安全囲いの隙間から手を入れた事例が 4 件 (2.0%) あった。

さらに、他のプレス機械にない特徴として、電源を落とさずに金型交換を行なって被災した事例が 21 件 (10.4%)、手払い式安全装置が付いているにもかかわらず防護範囲の不足から被災した事例が 17 件 (8.4%) あった。また、クラッチピンの破損、その他クラッチ/ブレーキの異常が 10 件 (5.0%) と他のプレス機械と比較して多かった。

以上のうち、安全措置がないプレスには、原則として安全囲いを設置する必要がある。しかし、安全囲いを後から設置すると費用がかさむ。また、安全囲いは作業の都合上取り外されることもある。したがって、①安全囲いを構成する部材や隙間を標準化して製作コストを削減する、②安全囲いを取り外したときは機械が動かない可動式ガードにするなどの方策を進める必要がある。

さらに、手引き式や手払い式の安全装置は簡単に不使用とできる、防護範囲が不足する（手払い式）などの理由から、安全装置としては適当でないと考えられる（現実には、欧州では手引き式や手払い式は安全装置として認められていない）。このため、手引き式や手払い式の安全装置に両手起動式の操作装置が併用されることもある。しかし、両手起動式の操作装置を毎分ストローク数の小さい機械に適用したときは安全距離が不足することもある。したがって、ポジティブクラッチ式プレスでハンド・インダ이의作業を行なう際は、欧州で使われているガードロック付きインタロックガード<sup>5)</sup>の使用も推奨すべきである。この装置では、クラッチピンの破損などが生じたときもスライドを停止できるため、クラッチ系の異常に対しても保護効果が高いと考えられる。

### (3) 液圧プレス

このプレスでは、安全措置なしが 14 件 (18.9%)、安全装置の不使用が 8 件 (10.8%)、安全囲いの不備が 7 件 (9.4%) と多かった。また、事故の型が飛来・落下である事例が 15 件 (20.3%) と他のプレス機械と比較して多かった。この中には、金型が落下した事例が 8 件 (10.8%)、金型の破片が飛来した事例が 2 件 (2.7%) あった。

これらは、金型の適切な強度設計（金型、ボルトなど）や事前の作業方法の検討などを行えば防止できた事例が大半と推察される。したがって、これらの対策を確実に実施する必要がある。

### (4) プレスブレーキ

このプレスでは、安全装置が設置されていないために発生した災害が 152 件と、全挟まれ災害の 89.4%を占めていた。これは、プレスブレーキでは作業者が加工物（金属板など）を両手で持ちながら金型から数 cm の位置まで手指を近接させて作業（著者らは危険点近接作業と呼んでいる）を行う必要があるために、安全装置の使用が困難なためと考えられる。

また、挟まれ災害の中では、他のプレス機械にない特徴として、①上金型と下金型の間に手指が挟まれる災害（84 件、全挟まれ災害の 49.4%）だけでなく、②曲げられた加工物（金属板など）とスライド（または金型）側面の間に手指が挟まれる災害（42 件、全挟まれ災害の 24.7%）も認められる（表 3 参照）。

このうち、①に対しては、上金型の直下をレーザービームで監視するレーザー式安全装置の適用などが考えられる。しかし、この装置は②の災害に対しては効果的でない。また、最近ではプレス加工の高付加価値化を目的として、サーボ機構を備えたプレスブレーキが普及しつつある。しかし、サーボ機構を備えたプレスではサーボ制御系の故障や電磁ノイズの影響などによってスライドが予想もしない異常な動作をする可能性がある。

このため、著者らは以上の問題に対応できる二次加工用プレスブレーキの災害防止対策として、次の特徴を備えた安全システムの開発が必要と考える<sup>6), 7)</sup>。

- (a) 作業者の手指が上金型の直下に進入していないかをレーザービームを利用して常時監視し、手指の進入時は直ちにスライドを停止させる（図 2 参照）。
- (b) スライドの運動が正常であるかをロータリーエンコーダによって常時監視し、異常のときは直ちにスライドを停止させる（特にプレスブレーキでは加工を 10mm/sec 程度の低閉じ速度で行なうことが多いが、加工時にこの速度を維持しているかの確認が重要である）。
- (c) プレスブレーキのスライドの側面に軟接触式の検知装置（バンパー）を設置し、板が作業者の手指を挟んだときはバンパーが検知して直ちにスライドを停止させる。

写真 2 に、当研究所で開発しているプレスブレーキ用安全システムの例を示す。



## (5) 大型プレス機械

大型プレスでは、作業者が金型内に入っているときに、他の作業者が誤って起動ボタンを押してスライドを起動させたために死亡災害が発生している事例が認められる。また、光線式安全装置が設置されていたにもかかわらず、作業者が光軸とボルスタの間に入り込んだために検知できなかった事例、複数の作業者が一緒になって広大な危険区域に進入したときに一部の作業者が取り残される事例、作業者が前後の工程間に移動して作業を行なったために災害に至った事例も認められる。

これらの災害に対しては、レーザースキャン式の装置によって金型内を直接監視する方法が効果的である。しかし、直接監視は金型や機械の形状によっては適用が困難である。このため、実際のラインでは、作業者がライン内へ進入する場所にキーやプラグを設置し、作業者の進入を間接的に監視する方式を採用している。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可動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。

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（これを「工程間移動」と呼んでいる）。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、重大な災害が発生させかねない。図3に、大型プレス機械で発生する供連れや工程間移動の例を示す。著者らは、以上の問題を考慮した新たな間接監視システムの構築が必要と考える<sup>8)</sup>。

## 3 災害防止対策に関する考察

### 3.1 典型的災害事例に対する重点事項の抽出

現在、プレス機械では、ISO12100や欧州安全規格であるEN692（機械プレスー安全）、EN693（液圧プレスー安全）にしたがって保護方策を行なうのが常識となりつつある。この方策の中心となるのが、ISO12100に定める本質的安全設計方策（ステップ1）と安全防護物の適用（ステップ2）である（図4参照）。

このうち、ステップ1では、遮蔽式工具（日本では「安全金型」と呼んでいる）の適用や自動化によるノーハンド・イン・ダイなどの方策が該当する。これに対し、ステップ2では、前述した全周囲防護が基本となる。これは、危険区域の全周囲を想定ガードで囲み、この中で手指の進入が必要な最小部分だけを開口部として光線式安全装置などを適用するとともに、危険区域の側面・背面・上下面にはすべてガードを設けて作業者以外の第三者を含む手指の進入を防止する方策である。

実際の固定式ガードは、日本では安全囲いと呼ばれている。しかし、日本の安全囲いは容易に取り外しができるものや隙間から簡単に手指を入れられるものも多く、これがプレス災害の原因になっている。また、一般に安全囲いを後付けで設置すると費用がかさむ。したがって、①安全囲いを構成する部材を標準化して製作の容易化を図りコストを削減するとともに、②安全囲いを取り外したときは機械が動かない可動式ガードとする、③手指が隙間から容易に進入できない寸法とするなどの標準化を進める必要がある。

また、日本のプレス機械では全周囲防護の発想がないために、光線式安全装置の下側やプレス機械の側面などから危険区域に容易に手指が入り得る。この問題に対しては、④安全装置の防護高さを十分なものとすること、⑤側面ガードや下方ガード（光線式安全装置の下方からの手指の進入を防止するガード）を設置することなどの対策が考えられる。

さらに、日本ではプレス機械用の安全装置として、ガード式、光線式、両手操作式、手引き式、手払い式などが認められている。しかし、日本のプレス機械では、安全装置を無効とできるキースイッチや切り替えスイッチを備えているものも多い。このため、作業者の安易な無効化操作によって次のようなときに安全装置を不使用とすることがあり、これがプレス災害の原因になっている。

- (a) 安全装置の使用によって生産性が低下するときや作業性が阻害されるとき
- (b) 長尺物や板状の材料を両手で保持して作業を行なうために安全装置が使えないとき
- (c) 金型の交換作業や試打ちの作業のために安全装置を無効化する必要があるとき

これらの問題に対しては、⑥安全装置を不使用とできるキースイッチや切り替えスイッチの撤去（これが困難な場合は作業主任者による管理の徹底）、⑦材料の両手保持が必要な作業にも利用できる安全



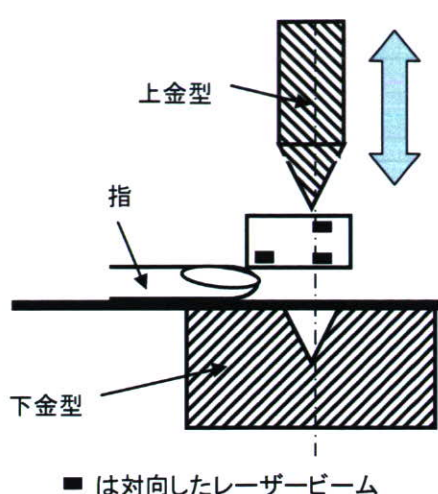


図2 レーザービームの配置

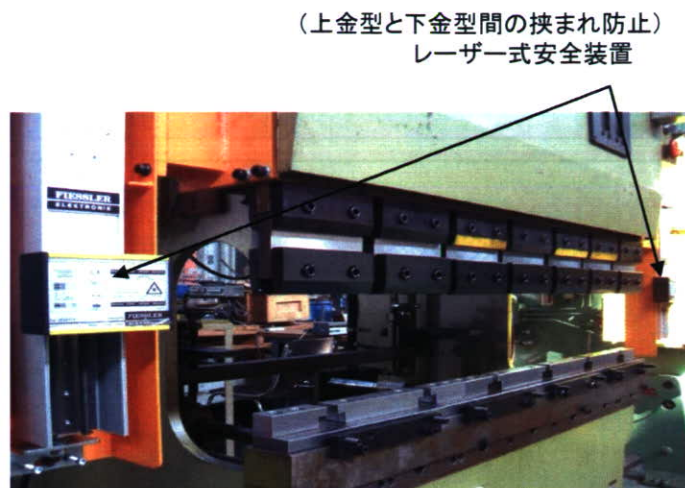


写真2 プレスブレーキのレーザー式安全装置

装置の適用（文献 3）、4 参照）、⑧寸動時でも安全装置を有効とするか、寸動は両手操作でなければ行なえないなどの対策が考えられる。なお、手引き・手払い・手工具は確実性に劣るため出来るだけ使用しない作業方法の検討が必要である。

また、実際のプレス機械では、制御システムの安全関連部（安全装置や安全制御回路が該当する）の故障によってスライドが異常動作（二度落ちなど）を起こすことがある。このため、ISO13849-1<sup>9)</sup>では故障発生時にスライドを停止できるフェールセーフ特性を実現するために、カテゴリ 4 の要件を規定している。

ここで、カテゴリとは制御システムの安全関連部における故障対策の区分を意味する指標であり、ISO13849-1 では B, 1, 2, 3, 4 の 5 区分としている。このうち、カテゴリ 4 は故障対策が最も厳しい区分である。しかし、日本ではカテゴリに関する規定がないために、制御システムの安全関連部で危険側故障（故障時にスライドが止まらなくなるか、停止中のスライドが突然起動するなどの現象を引き起こす故障）の発生のおそれがある。したがって、⑨カテゴリ 4 の要件を満足できる制御システムの安全関連部の構築が必要である。

### 3.2 サーボプレスの安全要件の解明

今後、日本の製造現場ではサーボプレスの急速な普及が見込まれる。このプレスでは、制御システムの安全関連部の危険側故障が直ちにスライドの異常動作を発生させて災害に至るおそれがある。したがって、この点を考慮したサーボプレスの安全要件の解明が必要である。

この要件は、基本的に、①手指が危険限界内に進入していないか又はスライドが下降していないことの常時監視、②サーボ停止以外の制動機構の停止性能確認及び③サーボ制御系の安全性能評価に集約できる。

ここで、①は、端的には、スライドが降下しているときに手指が進入して光線式安全装置を遮光し、急停止する機能の実現である。ただし、サーボプレスでは従来の機械プレスと異なり、フライホイールを有しない構造であるために、下死点を過ぎてから上死点へ必ずスライドが移動（上昇）するとは限らない。このため、広く用いられている上昇無効はサーボプレスに対しては容易に採用できず、スライドが下降していないことを常時監視するか、又は、サーボ制御系に電源が投入されている限りスライドが危険な作動をしていると見なすことになる。このうち、後者はサーボプレスの実用性を著しく損ねる。これに対し、前者は、技術的にその実現が困難な機能ではないが、その安全性能は後述する機能安全に基づく確率論的評価によって検証されなければならない。

また、②は、スライドの通常時停止を主にサーボ制御系の停止機能で実行するサーボプレスに特有な要件である。すなわち、サーボプレスでは、サーボ停止以外の制動機構（典型的には機械式ブレーキ）は非常時を除きほとんど使用されないため、制動機構を実際に使用する特別な停止モードを設け、これを定期的に作動させるなど、制動機構の性能を適切な頻度で確認する方策が必要になる。



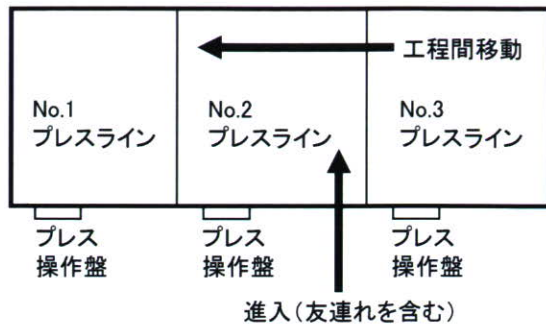


図3 供連れと工程間移動

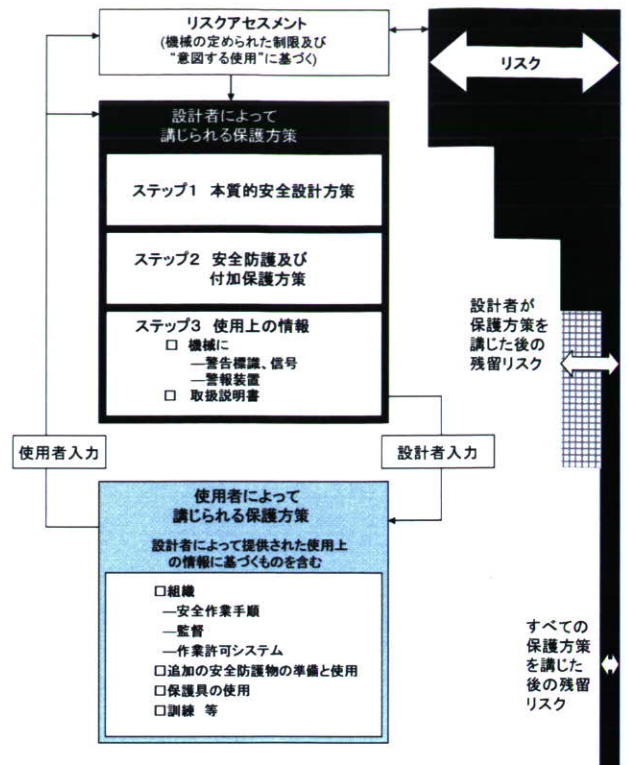


図4 ISO12100 に定められたリスク低減戦略

さらに、③は、サーボ制御系のような複雑な電子機器に対しては、その安全性能が従来の使用コンポーネントとそれらの構成に依拠した確定論的評価では判断できず、機能安全に基づく確率論的評価が必要になることである。具体的には、サーボプレスの主要構成要素であるサーボドライバを対象に、ISO13849-1 に記載された安全制御カテゴリー (Cat.) と IEC61508<sup>10)</sup> に記載された安全度水準 (SIL) の両指標を両立できる安全性能評価指標の検討が必要である。このとき、これらの規格に記載された危険側故障の平均時間間隔 (MTTF<sub>d</sub>)<sup>9)</sup>、診断有効度 (DC)<sup>9)</sup>、共通原因故障率 (CCF)<sup>9)</sup> 及び系統的原因故障を考慮しなければならない。

さらに、サーボプレスには次のような種類がある。

- (a) サーボモータでダイレクトに駆動される構造のメカニカルサーボプレス
- (b) サーボモータを駆動源とし、ボールスクリュウ及びリンク機構等を組み合わせた構造のメカニカルサーボプレス
- (c) サーボバルブを使用した液圧サーボプレス
- (d) 液圧ポンプの駆動をサーボモータで直接行なう方式の液圧サーボプレス

これらのプレスの安全要件も基本的には以上の要件を考慮すればよい。ただし、各機種によって安全要件が部分的に異なることも考えられるので、この点を考慮した検討も必要である。

#### 4 おわりに

プレス災害の多くは、過去に発生した災害と同一・類似の繰り返し災害である。本来、一度経験した災害は再び繰り返すことのないように抜本的な再発防止対策を講じるべきである。このため、著者らはこの問題に対して次の方策を提案する。

- 1) 機械安全国際規格である ISO12100 や欧州安全規格である EN692, EN693 などに記載された保護方針を日本でも取り入れること。
- 2) 現在問題となっているプレスブレーキ、大型プレス機械及びサーボプレスを対象とした新たな安全システムの開発を進めること。
- 3) 過去に発生した災害と同一・類似の繰り返し災害に対して、次の方策を講じること。
  - (a) 安全囲いの標準化や安全囲いを取り外したときは機械が動かない可動式ガードの採用
  - (b) 安全装置を不使用とできるキースイッチや切り替えスイッチの撤去（これが困難な場合は作業主任者による管理の徹底）

- (c) 材料の両手保持が必要な作業にも利用できる安全装置の採用
- (d) 寸動時でも安全装置を有効とするか、寸動は両手操作でなければ行なえない方式の採用
- (e) 安全装置の防護高さの確保や側面・下方ガード（光線用）の設置
- (f) 手払い・手引き・手工具を使用しない作業形態の検討

以上の方策によって、現在下げ止まりとなっているプレス機械による労働災害の大幅な減少が図れると考える。なお、プレスブレーキ、大型プレス機械及びサーボプレスを対象とした新たな安全システムの開発は別途報告する予定である。

## 謝 辞

本研究は、厚生労働省科学研究費補助金（労働安全衛生総合研究事業 課題番号平成 17-労働一般 013、主任研究者 梅崎重夫）の一環として実施したものである。紙上を借りてこの研究に協力を頂いた当研究所の池田博康氏、中央労働災害防止協会の桑川壮一氏を始め、関係諸氏に深謝する。

## 文 献

- 1) 昭和 50 年版から平成 17 年版までの安全衛生年鑑，中央労働災害防止協会（1975）～（2005）
- 2) ISO12100-1, Safety of machinery－Basic concepts, general principles for design－Part 1: Basic terminology, methodology, 日本規格協会（2003）
- 3) 梅崎重夫・清水尚憲・小林茂信・井土伸彦・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(2002)，1755-1783
- 4) 梅崎重夫・清水尚憲・小林茂信・井土伸彦・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(2003)，2316-2323
- 5) 梅崎重夫・桑川壮一，機械プレスの安全に関する欧州規格と我国関係法令との比較，産業安全研究所安全資料，NIIS-SD-No.14（1996）41-63
- 6) S.SHIMIZU and S.UMEZAKI, Development of safety system for press brake, 5th International Conference Safety of Industrial Automated Systems (SIAS 2007)（2007）340-345
- 7) 清水尚憲・梅崎重夫，プレスブレーキ用安全システムの開発—サーボ機構を備えた二次加工用プレスブレーキの安全要件の解明—，日本機械学会関東支部第 13 期大会（2006）185-186
- 8) 梅崎重夫・清水尚憲，大型プレス機械用安全システムの開発—RFID とカウンターゲートの階層構成による間接監視方式の提案—，日本機械学会関東支部第 13 期大会（2006）187-188
- 9) ISO13849-1, Safety of machinery－Safety-related parts of control systems－Part 1: General principles for design, 日本規格協会（1999）及び（2006）
- 10) IEC61508, Functional safety of electrical /electronic /programmable electronic safety-related systems, 日本規格協会（2006）

### 1. 研究活動の概要

#### 1.1 研究目的

サーボプレスは、従来の機械プレスにおいて安全確保のために重要な役割を果たしてきたクラッチ機構やフライホイールを用いず、主駆動源である AC サーボモータを制御する駆動制御回路（サーボドライバ）によってスライドの動作が完全に支配されている点に構造上の特徴がある。このため、安全要件の解明では、サーボドライバにより実現される安全関連機能の性能を解析し、故障や障害を生じても、安全側に停止するフェールセーフ性を検証することが最も重要となる。そこで、本研究では、ドイツ第三者認証機関において現在行われている汎用サーボドライバの認証作業の実態、ならびに、安全関連機能が実装されたサーボシステムの技術動向を調査し、その結果に基づいて、サーボプレスへの適用を前提としたサーボドライバの安全性能評価手法を提案する。さらに、実際のサーボプレスの構造を模擬した実験モデルを試作し、サーボプレスの安全ドライブシステムの構築例を示すとともに、提案する評価手法と動作検証実験の結果から、実現された安全関連機能の安全性能を検証する。

#### 1.2 サーボプレスの開発と認証の動向

ドイツにおいて機械プレス・液圧プレスの型式検定を行っているドイツ職業保険組合のプレス部門（MMBG）、ならびに、金属加工部門（BGMS）をヒアリング調査した結果、現在、日本と同様、ドイツの多くのプレス機械メーカーがサーボプレスの開発に着手している状況にあり、このため、サーボプレスの安全性能評価試験方法について検討中であるとの報告を受けた。

従来の機械プレスの構造とサーボプレスの構造を、いわゆるプレス災害防止の観点から比較すると、以下の相違点が指摘できる。

1. クラッチ機構が使用されていない：クラッチ機構は、スライドの起動が阻止されるべき状況で確実な動力エネルギー伝達の遮断を実行するばかりでなく、その故障モードが、伝達可能な動力の量の減少、もしくは、動力伝達そのものが不可能になる安全側故障であるという特徴をもつ。
2. プレス用安全弁が使用されていない：上記に関連し、通常、クラッチ機構の操作を行うために使用されるプレス用安全弁（モニタ付き複式電磁弁）が使用されていない。プレス用安全弁では、スプールの不具合により両バルブの開閉動作に不一致が起これば、クラッチへの空気圧の印加が自動的に遮断される安全機能が構造的に実現されている。
3. フライホイールが利用されていない：フライホイールの慣性モーメントは、スライド又はクランクシャフトの動作方向が、瞬時には反転しないことを物理的に保障するものである。
4. ブレーキ機構の制動能力が高頻度にチェックされていない：機械プレスでは、オーバランモニタリングにより、ブレーキ機構の性能劣化が毎回のサイクル終了時に監視される。これに対し、サーボプレスでは、サイクル終了時のスライドの停止はサーボ制御により実現され、ブレーキ機構が真に使用されるのは非常停止操作等の異常時のみである。
5. カムスイッチが利用できない：カムスイッチは TDC（上死点）、BDC（下死点）及びスライドの上昇／下降動作を機械的に記憶／判別するコンポーネントである。しかし、サーボプレスでは、TDC、BDC はプログラムにより容易に書き換えでき、また、スライド動作の検出はエンコーダの信号情報に依存している。

従来の機械プレスでは、上記の危険性が、電気・機械的手段を用いて合理的に解決されてきた。しかし、サーボプレスでは、サーボドライブ及びこれを含むプレス制御システム全体に実装された安全関連機能で、これらに対処しなければならない。そのための安全関連機能の実現には、マイクロプロセッサ等の電子制御装置が利用される。機械プレスの制御にプログラマブルな電子制御装置（Safety PLC）が利用されるようになって久しく、また、MMBG 及び BGMS の報告によれば、ここ 15 年間で電子制御装置の故障や暴走が原因でプレス災害が生じたことは 1 件もないとのことではあるが、上述したリスク低減方策の実現原理の違い、すなわち、電子制御システムへの依存度の違いを考慮すれば、現行の機械プレスの EU 内適合規格である EN 692 で述べられている確定論的安全性能評価をサーボプレス

に適用することには明らかに限界がある。この問題は EU 各国間及び米国 ANSI でも認識されており、現実には、先ごろ開始された EN 692 の改訂会議において、サーボプレスを今後どう扱うかが本会議期間中の主要議題の 1 つに挙げられているとの報告を受けた。

### 1.3 サーボドライバの開発と認証の動向

ドイツにおいて、サーボドライブの製品認証を行っているドイツ職業保険組合中央研究所 (BGIA) をヒアリング調査した結果、既に 20 年程前から、BGIA にて認証された汎用サーボドライバが市場に登場しており、現在では、汎用サーボドライブを生産しているドイツ国内（一部、近隣 EU 諸国を含む）のほとんどのメーカーが、安全関連機能を実装した製品をラインナップしている状況にあるとの報告を受けた。現在の認証状況を表 1 に示す。これより、現在入手可能な安全関連機能を実装した汎用サーボドライバの傾向として以下の 2 点が指摘できる。

1. ほとんどの製品の安全制御カテゴリ（以下、Cat.と記す）は Cat.3 であり、最高ランクの Cat.4 を達成している製品は、現時点では 1 社に留まっている。
2. 実装されている安全関連機能は、ほとんどの製品で、非常停止操作等に対してモータの確実な停止を実行する安全停止のみであり、安全サーボドライバの特徴ともいえる機能的な安全制御機能（回転角度や回転速度が規定の範囲にあることの監視機能など）を実現している製品は極僅かである。

これらの傾向のうち、傾向 1 の理由として、従来まで安全関連機能を実装した汎用サーボドライバの用途が、主に、マシニングセンタや小型 NC 旋盤等の工作機械、据付型研削盤、産業用ロボットであったことが挙げられる。すなわち、これらの機械は、通常、インターロックガードが設置されることが前提で、このため、表 2 に示すように、駆動モータ制御系の安全関連部に要求される安全制御カテゴリは最高でも Cat.3 までであり、Cat.4 を求める需要が少なかったためと考えられる。このことは、別途訪問したサーボドライブメーカ数社からも示唆された。

次いで、傾向 2 は、従来の用途では、他の外部制御機器との関連も含めて、モータ各軸のモーションは制御コントローラにより集中制御されるのが一般的で、さらに、安全関連情報は中央の安全 PLC によって制御されるため、個々のモータ軸を駆動するサーボドライバ自体に複雑な安全関連機能を実装する必要がなかったためと推察される。

しかし、サーボプレスでは、従来の機械プレスと同等の安全性能として、そのサーボドライバにも Cat.4（もしくは、それと同等の安全性能。要求される安全性能については次節で詳述する）が要求され、さらに、安全停止だけでなく、より複雑な安全制御を実現する必要がある。この意味で、現在市販されているサーボドライバ単体では、サーボプレスの安全制御システムを構築することは大変困難であると考えられる。

市販のコンポーネントを用いてサーボプレスの制御システムを構成する例として、Cat. B の標準のサーボドライブ（コントローラとインバータ）を安全リレーユニットで制御するシステムの構成例を Fig. 1 に示す。図中、Cat. 4 の枠は、両手操作ボタン、光線式安全装置、安全リレーユニットが Cat.4 の安全要求事項を満足していることを示し、Cat. B の枠は枠内のコンポーネントが特に安全要求事項を考慮していない標準のコンポーネントであることを示している。現在、一部の光線式安全装置（ESPE/AOPD）には、例えばミュート機能等の機能的な安全関連機能が実装されている。しかし、Fig. 1 のシステムでは、基本的には「工具区域内に手が挿入される恐れのあるとき（光線式安全装置等で手の挿入が検知されたときや、両手操作ボタンから手が離れたとき）にモータの電源を遮断する」という機能以外は実現できない。なぜなら、スライドの動作が制御システムの安全関連部にフィードバックされていないからであり、例えば、一行程一停止（シングルストローク）機能やブレーキの制動性能確認に重要なオーバーラン監視は実現できない。最も重要な問題は、「モータの電源遮断」は単に「モータが回転トルクを発生しない」ことを意味するのであって、必ずしも「スライドの停止」が約束されていないことである。

他方、Safety PLC と Cat.3 の安全停止機能を有するインバータを用いて制御システムを構成する例を Fig. 2 に示す。Cat.3 の安全停止機能だけでは必ずしも十分でないため、この例では、メインコンタクタの遮断パスを追加方策として設け、モータ動力遮断手段の異種多重化を図っている。ただし、現在の Safety PLC は比較的高機能であるが、ユーザがプログラムしたスライドの動作シーケンス（特に、

上死点や下死点の位置情報)を安全関連パラメータとして Safety PLC で処理するためには、後で詳しく述べるようにシステム構成上の特別の工夫が必要となり、その実現は困難である。

以上のように、市販のコンポーネントを用いて実現できる安全関連機能には限界があり、前節で述べたサーボプレスの危険性をカバーすることは、現状では大変困難である。

#### 1.4 サーボプレスへの適用を前提としたサーボドライバの安全性能評価指標

現在、制御系の安全関連部分の安全性能の指標には、電気・空圧・油圧システムなど比較的構造が単純な安全関連部を対象とした規格 ISO13849-1 で述べられている安全制御カテゴリ (Cat.) と、プログラマブルな電子制御システムを対象とした IEC 61508 (この従属規格の一つに、機械分野に特化した規格として IEC 62061 もある) で述べられている安全完全性レベル (SIL) の 2 つがある。しかし、多くの機械制御システムは、実際には、上述した 2 種類の実現原理に基づく制御システムが機械構造部品によって組み合わされて実現されるのであって、Cat. と SIL の 2 つの指標のうち、どちらを適用するべきか一概には判別できず、各機械の構成と個別規格に左右される。これら評価指標の混在は EU 内でも混乱を生じており、現実にも、前節で述べたように既存の認証されたサーボドライブシステムは、多くが Cat. による評価であるが、BGIA とのヒアリングによれば、現在検討中のサーボドライブの安全関連機能に関する規格 (CD/IEC 61800-5-2) では SIL に基づく性能評価を前提に作成作業が進行しているとの報告を受けた。

Cat. と SIL は、互いに要求事項 (評価項目) が異なるために、一概に両指標を対応させることはできない。ただし、実現された安全関連システムに内包された危険側故障を徹底的に掘り下げて検証することには変わりはなく、また、その要求事項には多くの共通点を見出せる。このため、サーボプレスのリスクに相当する適切な Cat. 及び SIL を選択して、両者を両立させることは必ずしも不可能ではない。そこで、本研究では、両指標の両立という方針に基づき、サーボプレスへの適用を前提としたサーボドライバの安全性能評価指標を検討した。

ハンドインダイ方式で用いられる機械プレスでは、種々の安全関連機能 (安全関連装置) が ISO13849-1 で最高ランクの安全性能とされる Cat.4 の要求事項を満足しなければならない。よって、サーボプレスにも (それがハンドインダイ方式で用いられるならば) 同等の Cat.4 レベルの安全性能が要求されると考えられる。Cat.4 の要求事項を簡単にまとめると以下ようになる。

1. システムの構造は吟味された安全原則に則ること、
2. 障害許容度 : 1 以上、
3. 危険側故障の平均時間間隔 (MTTF<sub>d</sub>) : 30 年以上、
4. 診断有効度 (DC) : 99% 以上、
5. 二重故障、多重故障を考慮すること、
6. 共通原因故障 (CCF) 及び系統的故障を考慮すること、
7. 使用する技術やシステム設計上の理論的根拠、FTA/FMEA による故障解析結果など、主張するカテゴリの妥当性確認に必要な情報を文書化すること (ISO13849-2)。

一方、今日、多くの安全制御用 PLC が SIL 3 を達成している現状を考慮すれば (IEC 62061 において機械分野で合理的に達成可能な SIL は SIL 3 が最高とされている)、State of the art の観点から、サーボプレスの安全関連制御システムにも SIL 3 の達成が要求されると考えられる。所要の SIL を達成するためには、開発・製造・運用・廃棄に至る製品のライフサイクルの全てのフェーズで、仕様書及び設計コンセプトの作成、目的の実現、検証テストの実施に関し、品質管理やそれらを実行する人員のコンピテンシーまで含んだ、非常に多岐にわたる要求事項を満足する必要があるが、ハードウェアアーキテクチャに関する制約を中心に SIL 3 の要求項目を非常に簡単にまとめると以下ようになる。

1. ミッションタイム内 (設定寿命内) における平均危険側故障発生率 (PFH<sub>d</sub>) が  $10^{-7}$  以下であること、
2. 非対称故障率 (SFF) が 90% 以上であること (ただし、障害許容度が 1 以上の場合)
3. CCF (β ファクター) を定量的に評価すること、

4. 人的要因，外部環境要因に起因する系統的故障を回避する方策を導入すること，
5. 独立した組織によって機能安全性アセスメントを実施すること，
6. ソフトウェア安全性ライフサイクル要求事項を達成すること，
7. 安全要求仕様，ハードウェア・ソフトウェア要求仕様，機能性検査テスト計画とその結果など，安全関連機能に関わるすべての情報を文書化すること。

SIL における PFH<sub>d</sub> の要求は，システムを構成するコンポーネントの MTTF<sub>d</sub> のみならず，DC や自己診断テストのインターバルをパラメータとした関数値の評価となるため，単に MTTF<sub>d</sub> を評価する Cat. の要求とは単純には比較できない。しかし，コンポーネントの故障率が一般的な範囲にあり，かつ，他の要求項目を満足していることを前提とすれば，両者はほぼ同じ信頼性目標であると言える。

一方，SIL における SFF と Cat. における DC との間には次式の関係がある。

$$SFF = \frac{\sum \lambda_S + DC \sum \lambda_D}{\sum \lambda_S + \sum \lambda_D} \quad \dots(1)$$

ここで， $\lambda_S$  は安全関連部の安全側故障率， $\lambda_D$  は危険側故障率である。DC > 99%，障害許容度 1 という Cat. 4 の厳しい要求を満足すれば，仮に  $\lambda_S = 0$  であっても，SFF > 90% の要求は達成される。

以上のように，Cat. 4 と SIL 3 の要求事項は，少なくともハードウェアアーキテクチャの観点からは類似点が多く，より厳しい側の指標を達成することでそれらの両立が可能である。サーボプレスの危険性からすれば，安全方策の根幹に位置づけられるサーボドライブシステムには両要求事項の両立を課す必要があると考えられる。なお，現状では，ソフトウェア（このうち，特に，OS や機能モジュールなどのプロセッサに組み込まれるソフトウェア）に関する安全要求事項を扱っている規格は IEC 61508-3 のみであるため，ソフトウェアに関しては SIL 3 の要求事項がそのまま適用できる。

### 1.5 サーボドライブの安全性能評価手法の提案

複雑な電子制御システム（一般には，1000 ゲート以上もしくは 24 ピン以上の IC が使用されているプログラマブルな装置・システムを指す）の安全性能評価では，単に実現された安全関連機能の性能（例えば，急停止性能など）を外面的に評価しても，必ずしも安全性は証明できず，設計開発段階で盛り込まれた種々の安全方策の妥当性，さらに，それらが設計計画どおりに実現されることを検証することが必要である。このようなシステムの安全性能評価手法は，一般に，以下の 4 つのフェーズに大別できる。

1. 設計コンセプトの検証：システムに実現される安全関連機能が，機械のリスクを許容可能なレベルにまで低減するのに必要十分であるか，その選択の妥当性を検証する。これには，当該機械に対して実施されたリスクアセスメントの検証も含まれる。なお，HSE の報告によれば，災害発生原因となった制御システムの障害の約 65% がシステムが実際に使用される以前に“組み込まれた”ものであり，その多くが設計コンセプトや仕様設定の誤り，ならびに，危険状態の想定の不十分さによるものであるとされている。
2. 実現手法の検証：要求される安全関連機能を実現する手段・方法の妥当性を検証する。それらにマイクロプロセッサが利用される場合には，ハードウェアのみならず，組み込まれるソフトウェアの内容についても精査する必要がある。
3. 実現・構築手順の検証：要求される安全関連機能が実装・構築される際に混入する可能性のある系統的エラーを防止するために，実装・構築の方法論，ならびに，そこに盛り込まれた種々の方策について選択の妥当性及びその効果を検証する。
4. 検査テスト計画とテスト結果の検証：開発過程の様々な段階で実施される種々の検査テストに関し，その結果のみならず，テストの計画と方法の妥当性についても検証する必要がある。特に，一旦開発が終了した後のシステムの変更・改造に対し，安全関連機能の性能の低下を防止する上で，これらの検査計画が非常に重要となる。

サーボプレスに実装されるサーボドライブは，マイクロプロセッサの使用を前提にした複雑な電子制



御システムであり、その検証手法は、上記の一般論に則したものとならざるを得ない。ただし、本研究の期間内では上記のすべてを検討することには明らかに限界があるため、ここでは、特に上記 1) 及び 2) のフェーズに着目し、サーボドライバの安全性能評価手法を検討することとした。本章では、まず、サーボプレス及びサーボドライバのモデルを想定し、次いで、これに対して必要な検証を実施していく形で、本研究で提案する安全性能評価手法（以下、本手法）を具体的に説明する。

#### 1.5.1 システムの想定モデル

現在国内で生産されているサーボプレス及び実装されているコントロールシステムを参照し、実際のサーボプレスシステムのモデルとして、ここでは Fig. 3 に示すシステムを想定する。サーボプレスの駆動方式には種々あるが、このシステムでは、比較的容易に高精度が得られるとして普及しているボールスクリュウを利用した駆動方式を対象とした。この場合、スライドの上下動はサーボモータの頻繁な正逆転動作の繰返しによって実現される。本システムに対し、以下の仮定を設ける。

1. 想定するサーボプレスはハンドインダイ方式で用いられる比較的小型のものとする。すなわち、工具区域内に作業者が立ち入るような大型のシステムは対象にしない。
2. 煩雑になるのを避けるために Fig.3 には示していないが、側面及び背面はサーボプレス自体の構造フレーム又は固定ガードにより覆われているとし、前面開口部からのみ接近可能であるとする。
3. 作業者は1名とするが、第三者が近傍にいる場合も考慮する。
4. 開口部の防護方策として、両手操作ボタンと光線式安全装置（以下、AOPD）が併用されるものとする。
5. サーボモータには、ロータと同軸に保持用電磁摩擦ブレーキが内蔵されているとする。さらに、このブレーキはノーマルクローズ型であるとし、モータがトルクを発生できない状態（例えば、電源遮断時）には自動的に作動するものとする。
6. サーボモータの動作及びスライドの位置は、モータのロータ軸上に設置されたエンコーダとボールスクリュウに設置されたエンコーダを用いて検知されるものとする。これらの検知信号は、サーボモータの動作制御だけでなく、後述する安全関連機能の実現にも使用されるものとする。なお、Fig. 3 のサーボプレスでは、ロータリーエンコーダの他に、スライドの位置を直接的に検出するリニアエンコーダが設置されているが、その理由については後に詳述する。
7. 上死点及び下死点（以下、TDC 及び BDC）の位置は、各々、1 サイクル中の最高位置及び最低位置とする。また、上死点を参照位置（以下、RP）とし、各サイクル終了時には必ず RP に復帰するものとする。ただし、1 サイクル中にスライドが BDC に達する回数には制限を設けない。

#### 1.5.2 リスク解析

本手法では、まず、対象とするサーボプレスに対し、ISO 14121 で示されている種々の危険源・危険状態を予測し、その結果として人体に及ぼす傷害の酷さ及びその発生頻度や回避の可能性を推定して、サーボプレスのリスクを解析する。検討すべき危険源・危険状態については、機械／液圧プレスの C 規格である EN 692/693 にも述べられているが、すべての危険源が網羅された ISO 14121 を参照すべきである。また、前記仮定の中では、すでにいくつかの防護方策について述べているが、本来のリスクアセスメントは、防護方策が一切無い状態から解析が開始されなければならない点に注意が必要である。

予備的検討として、想定したサーボプレスに対してリスクアセスメントを実施した。その詳細については割愛するが、明らかになったリスクのうち、1) サーボドライブの危険な誤動作を主な検討対象としていること、2) 想定される傷害の酷さと頻度が共に高いことの2つの理由から、本研究では、「工具区域内に作業者の手が入られているにも係わらず、スライドが下降した結果として発生する挟圧の危険源」を対象に検討を進めることとした。サーボプレスの運用目的より、この挟圧の危険源は、本質的安全設計方策や防護ガードの設置では解消されない。さらに、そのリスクの高さより、この低減に関わる安全関連機能には、Cat. 4 もしくは SIL 3 の安全性能が必要となる。

なお、リスク解析より得られた知見の1つとして、想定したサーボプレスのタイミングベルト伝動機構に問題があり、以下の2つの仮定を新たに導入する必要があることを指摘しておく。

8. タイミングベルトの破断が起こると、サーボモータに内蔵された保持用ブレーキのみでは、スライドの降下を防止できない。破断に至る過程でタイミングベルトの劣化や損傷を監視するオートモニタリングの実装は、現実のサーボプレスへの適用を考慮すると、非現実的であると言え、この問題は本質的安全設計方策の採用によって解決されるのが妥当である。すなわち、タイミングベルトが破断した場合にもスライドを停止・保持できるように、ブレーキの制動力がポジティブにスライドへ伝達される（バネやゴムなどの弾性体を介さず機械的に伝達される）構造でなければならない。このため、Fig. 3 のサーボプレスでは、ボールスクリュウの回転を直接停止できる位置にノーマルクローズ型摩擦ブレーキを設置することとする。なお、左右のボールスクリュウにブレーキが 2 重化されて設置されているが、その理由については次節で詳述する。
9. 同様に、タイミングベルトが劣化や損傷のために破断すると、伝達機構の一次側の動作検知センサの信号（Fig.3 では、サーボモータ側のエンコーダによる角度検出信号）は、スライドの動作との関連がなくなり、安全関連情報としての意味をなさなくなる。このため、Fig.3 のサーボプレスでは、ボールスクリュウ軸上のエンコーダのほか、スライド位置の検出が可能なリニアエンコーダを設置することとする。なお、スライド位置検出のためのエンコーダを冗長化する理由については次節で詳述する。

### 1.5.3 安全関連機能の同定

リスク解析結果に基づき、サーボプレスのリスク低減に必要な安全関連機能が同定する。ただし、ISO 12100 で述べられているように、リスク低減は、まず、本質的安全設計方策によって、次いで、固定ガード等の防護ガードの設置によって達成されなければならない。制御システムで実現される安全関連機能にリスク低減を委ねるのは、これらの方策の適用が困難と判断された場合のみである。

前述したように、サーボプレスの運用目的より、「工具区域に作業者の手が入れているにも係わらず、スライドが下降した結果として発生する挟圧の危険源」については、Cat. 4 もしくは SIL 3 の要求事項を満足した安全関連機能の適用が必要となる。ただし、これは単一の安全関連機能ではない。なぜなら、このような挟圧はサーボプレスの種々の運用モードで発生する可能性があるからであり、また、6.2 節で述べた従来の機械プレスとの構造上の差異を考慮すれば、当該リスク低減に直接関わる安全関連機能のみならず、それらに付随した複数の安全関連機能も要求されるためである。リスク解析に基づいて、同定された安全機能を表 3 にまとめて示す。ここで、入力要素とは当該機能で使用するセンサ及び当該機能のトリガとなるコンポーネントを指し、出力要素とは当該機能で操作の対象となるコンポーネントを指す。このうち、特に重要な機能について以下に説明を加える。

**Inverter switch off monitoring** : モータの安全停止は、インバータ回路内に設けられた IGBT 回路のベース電流遮断用パス（以下、Safe pulse blocking と呼ぶ）によって実現される。その詳細な構成については後述するが、Inverter switch off monitoring は、冗長化された Safe pulse blocking の不一致を検知する機能である。さらに、Cat. 4 の要求事項では Safe pulse blocking の遮断機能は、周期的にテストされなければならない。Inverter switch off monitoring は、このためのテスト周期管理機能を含んでおり、一定時間以上 Safe pulse blocking が使用されない場合には自動的にテストを実施する。

**Encoder arrangement monitoring** : 冗長化されたエンコーダの情報を比較し、不一致がある場合には、サーボプレスの運転を停止させる。インクリメンタルエンコーダの場合、通常、電源ライン以外に 4 つ（A, B 相及びそれらの反転信号）の信号ラインが、また、アブソリュートエンコーダの場合はそれ以上の数の信号ラインがコントローラに接続される。このため、エンコーダを 1 つ設置し、それらのラインから送信される信号を比較すれば、信号ラインの断線や内部短絡、内部演算回路の機能障害は検出可能である。しかし、単一のエンコーダではエンコーダ接続部の可動部からの脱落（ロータリーエンコーダにおいては回転軸の回転円盤からの脱落も問題となる）が検出できない。よって、エンコーダ自体の冗長化が必要である。なお、冗長化されたエンコーダの角度情報の比較は、両エンコーダが動作しているときのみ（すなわち、信号が変化しているときのみ）、エンコーダの正常性確認手段として有効である。このため、非常に長時間、電源が投入された状態で停止し続けた場合（例えば、1 週間）には自動的にサーボプレスの運転を停止させるなど

の方策も検討する必要がある（このような状況では落下防止ブロックの使用を義務付ける等）。

**Braking performance check**：従来の機械プレスと異なり、ノーマルクローズ型摩擦ブレーキの制動力は頻繁に確認されない。このため、サーボプレスでは、各サイクル開始時に制動力をテストする機能が必要である。これには、ブレーキを作動させた状態で、モータの最大トルクを印加し（最大トルクの印加は、**Safe motor torque check** 機能で確認する）、停止状態が維持されていることを確認する手法が適用できる。ただし、この方法で確認できるのはブレーキの静摩擦力が確認されるのみで、真に必要な動摩擦力はテストされない。一般に、ブレーキ面間の動摩擦力は静摩擦力の約 75～50%程度になる。そこで、モータの最大トルクを停止できる制動トルクを有するブレーキを 2 つ装備し、これらの静摩擦力を上記の方法で交互にテストする手法を提案する。本手法によれば、非常時に十分な動的制動力が得られることが確認できる。この目的のために、Fig.3 ではノーマルクローズ型摩擦ブレーキを両ボールスクリュウに装備することを想定した。なお、本手法ではブレーキの動作時間はチェックされないため、制動時間については、別途実測に基づいて最大時間（最悪値）を決定し、安全距離の設計に反映させなければならない。

なお、表 3 の安全関連機能は、あくまでも本研究で想定したサーボプレスに対し、特にサーボドライバに関連すると考えられる機能に着目してまとめたものであり、個々のサーボプレスのすべてのリスクをカバーするものではないことを明記しておく。

#### 1.5.4 安全性能評価

次いで、要求される各安全関連機能に対し、これらが割り当てられた安全性能を満足していることを、6.4 節で述べた定性的・定量的要求事項に照らし合わせて評価する。プロセッサを含む電子制御システムで実現される安全関連機能の検証は、ハードウェアに関する評価、ソフトウェアに関する評価、系統的故障に関する評価の 3 つに大別される。

ここで、ソフトウェアと系統的故障に関する評価は、システムの設計・実現・運用の各段階でこれらの障害に起因して安全関連機能を喪失しないためにシステムに組み込まれた種々の技法や方策の妥当性を検証するとともに、組み込まれた方策が有効に機能していることを種々のテストにより確認する作業である。ソフトウェアの安全性能評価では、一般に V モデルのフローに則り、各実現段階において導入・実施された技法や方策の有効度を各段階ごとに検証し、さらに、最終的にシステム実装された状態で意図した障害回避特性が実現されていることを確認する。各段階で採用すべき方策は、安全関連機能に要求される安全性能に応じて異なり、その妥当性については IEC 61508-3 の付属書 A,B,C を参照して判断する。他方、系統的故障とは、電磁ノイズや温度変化といった環境要因に起因する機能障害、ならびに、安全関連機能の設計実現段階での人的ミスに起因する機能障害のことであり、これらは、設計や実現手法、管理手順を変更しない限り除去することができないことに特徴がある。系統的故障に対する方策は大きく 3 つに分けられる。

- 1) 系統的故障の抑制：オンラインテストの定期的な実施、適切な診断機能の実装など、
- 2) 系統的故障の回避：吟味された安全原則の使用、実績のあるコンポーネントの使用など、
- 3) 系統的故障の混入防止：機能テスト、Black Box テスト、White Box テストなど。

系統的故障に関する評価は、これらの方策が適切にシステムに導入・実施されていることを確認するもので、その妥当性の判断には IEC61508-2 の付属書 B や IEC62061 第 8.3 節を参照して判断する。

以上の 2 つの評価が定性的な妥当性の判断と実現されたシステムを用いた機能テストに依存しているのに対し、ハードウェアに関する評価では、ハードウェア構成に着目した定性的評価（ハードウェア制約）のみならず、使用されているコンポーネントの信頼性データに基づいた定量的評価を組み合わせる必要がある。以下では、**Inverter switch off monitoring** を例に、その評価手順を説明する。

##### 1.5.4.1 Inverter switch off monitoring 機能の定性的・定量的評価

**Inverter switch off monitoring** に関連するシステムの構成は、冗長系を基本とし、Cat. 4 の要求事項にある障害許容度 1 を満足するものとする。その構成を Fig.4 に示す。また、メインコンタクタの遮断は IEC 60204 の非常停止機能の要求事項に対するもので、本機能では特に必要なく、インバータ回路の安全停止は、冗長化された **Safe pulse blocking** によるパルス発生を抑止と冗長化されたプロセッ

サのリセット操作によって実現されるとする。

サーボモータが回転を行うためには、回転磁界の生成が必要である。これには、1) インバータ回路に必要な電力が供給されること、2) 回転を制御するプロセッサが設定されたフォトカプラの ON/OFF パターンを適切に生成すること、3) フォトカプラ及び IGBT 素子が入力されたパターンに従って同期して ON/OFF 動作すること、の 3 つの条件が成立する必要がある。Fig. 4 の構成では、条件 2) と 3) を抑止することで回転磁界の生成を阻止する。モータ回転中にメインコンタクタの遮断操作を実行するとインバータを破損する恐れがあり、安全関連部としてコンタクタ遮断を利用することは合理的でない。メインコンタクタが閉じ、インバータ回路に電力が供給されている状態において、仮に IGBT 素子に短絡故障が生じたとしても、容易に理解できるように、単一の素子の短絡では回転磁界は発生しない。ただし、利用されているモータが永久磁石同期モータである場合、極めて稀に複数の素子に同時多重短絡故障が生じて特定の位相の磁界が発生すると、1 極分ロータが回転する可能性はある。例えば、8 極の同期モータがサーボプレスに使用されている場合は  $2\pi/8 = 0.785[\text{rad}] (=45[\text{deg}])$  回転することになる。このため、このような異常回転に起因したスライド動作でリスクが増大する場合には別途対策が講じられる必要がある（ただし、一般的には、このために生じる下降動作は微小である。例えば、想定したサーボプレスにおいて、タイミングベルトの減速比を 1:5、ボールスクリュウのリードを 2 mm と各々仮定すると、0.785[rad] の回転で起こりえる下降動作は高々 0.05mm である）。

Inverter switch off monitoring 機能は以下の手順で実行されるとする。

1. 毎サイクルにおいて、両手操作ボタンが開放されたことをトリガにして、2 つのプロセッサが各々対応する **Safe pulse blocking** の半導体スイッチをターンオフする。ただし、ここでは、ミューティングは実装されておらず、通常の使用方法として、毎サイクル終了時まで両手操作ボタンは保持され続けるとする。
2. 1 つの半導体スイッチの動作は両プロセッサにフィードバックされる。両プロセッサは規定時間以内にターンオフが行われたことを検査するとともに、互いにデータを交換し、不一致がないことを検査する。
3. 異常な遅れやデータに不一致があった場合には、以後のサイクルの実行を禁止する。
4. このテストは、毎サイクルごとの実施であるので、少なくとも 20 秒に 1 回は実施される。
5. 両手操作ボタンの制御と監視は認証された Cat.4 のリレーモジュールによって実行されるとし、プロセッサによっては処理されないとする。

Inverter switch off monitoring 機能を実行するためのハードウェアの機能ブロック図を Fig 5(a) に示す。ここで安全性能評価のための仮定として、2 つのプロセッサは同じ型式ではあるが異なる配線パターンで使用されており、このため異なったプログラムが組込まれることから、異種多重系と見做せるとする。両プロセッサは個々にセルフテストを実施し、その結果は他方のプロセッサによって検査される。さらに、両プロセッサは独立した定電圧源により電力供給を受けるとし、特に、定電圧源 B はプロセッサ B とその周辺機器に対してのみ使用されるとする。各々の定電圧源の出力電圧は、電圧監視用 IC とプロセッサにより二重に監視される。

この機能ブロックに対し、Cat.4 及び SIL3 の要求事項が満足されているか検証するため、Fig.5(b) に示すように 4 つのサブシステムに分割する。ただし、簡単化のため、この分割では、メインコンタクタの接点モニタリング及びプロセッサの電源監視機能を（共に安全性能向上には寄与するが）無視して考えている。以下では、各サブシステムごとに考察を進める。

#### 1.5.4.2 サブシステム 1

安全関連機能を実行するシステム（ここでは、サブシステム 1）に対し、まず、FTA 及び FMEA を実施して、起こり得る故障と故障同士の関連（多重故障や共通原因故障）、ならびに、それら故障が意図した安全関連機能に与える影響を検討する。次いで、その結果から、安全側故障率、検出可能な危険側故障率、検出されない危険側故障率を同定し、これより、SFF と DC の値を決定する。ここでは、検討結果の一部として、サブシステム 1 の特に冗長化プロセッサについて実施した FTA の抜粋を Fig. 6 に示す。Cat.4 と SIL3 の要求事項を満足する値として、ここでは、サブシステム 1 の DC と SFF を

各々DC=99%, SFF=99.5%と仮定する。

ハードウェアの検証過程においては、FTA 及び FMEA による故障解析が最も重要な作業である。特に、Cat.4 の要求事項には、すべての故障・障害が安全関連機能の実行中かそれ以前に確実に検出されることが要求されており、それを満足していることは理論的な故障解析の結果からしか判定できない。

次いで、FTA/FMEA による検討結果を評価するため、故障検出のために組込まれた各診断機構や故障を回避するための手法から、IEC 61508-2 付属書 A に記載の表を参照して、DC を見積もる。例として、サブシステム A に導入される診断機構を仮定し、それらを付属書 A を参照して評価した結果を表 4 に示す。ここでの DC の評価と FTA/FMEA で得られた結果とを比較することで、FTA/FMEA の検討結果の妥当性が判断できる。また、SFF については、すべての故障を危険側と見做して、式(1)より DC 値=SFF 値と考えることも可能ではある。

他方、安全関連機能を実現するシステムに導入された共通原因故障を防ぐ方策に対し、IEC 61508-6 付属書 D を参照して、付属書 D の表 D.1 に記載された各項目を吟味し、項目分類ごとの合計スコアから表 D.4 を使って $\beta$ ファクタを推定する。例として、サブシステム 1 の $\beta$ ファクタを評価した結果を表 5 に示す。ここで、X 値と Y 値は、各々、導入された方策の診断機能への寄与率と系統的故障防止への寄与率を表している。合計スコアより、サブシステム 1 の $\beta$ ファクタを $\beta=0.02$ と仮定する。

以上のパラメータを用いて、安全関連機能を実行するシステム（ここでは、サブシステム 1）の信頼性モデルを構築し、ミッション時間内（10 年とする）の平均危険側故障率 PFH<sub>d</sub>を推定する。信頼性モデルについては IEC 61508, IEC 62061 にいくつか例示されているが、ここではマルコフ信頼性モデルを用いて、サブシステム 1 の PFH を推定する。このために、まず、サブシステム 1 を Fig. 6 に示すように A と B の 2 つのブロックに分割する。そして、ブロック A とブロック B の危険側故障率 $\lambda_{AD}$ と $\lambda_{BD}$ を各々導出する。この際の故障率データには、少なくとも信頼水準 70%以上の下限推定値が与えられるだけの総運転時間に基づいたデータを用いなければならない。例えば、危険側故障率 $\lambda_D$ を $10^{-6}$  [h]とするには、テストケースが 100 以上、個々の運転時間が 1 年以上の条件で、総運転時間が少なくとも $1.2 \times 10^6$  [h]以上の期間中に危険側故障が発生しなかったことを示すデータが必要である。ここでは、比較的否定的な値として、プロセッサ A 及び周辺素子の危険側故障平均時間 (MTTF<sub>d</sub>) を 50[y], プロセッサ B 及び周辺素子の MTTF<sub>d</sub> を 70[y], トランジスタの MTTF<sub>d</sub> を 900[y], フォトカプラの MTTF<sub>d</sub> を 1200[y]とおき、 $\lambda_{AD} = 2505$  FIT,  $\lambda_{BD} = 1852$  FIT と仮定する。

次いで、危険側故障のみを対象としつつ、マルコフ信頼性モデルを構築する。例として、ここでは、ブロック A とブロック B の相似性を利用して、Fig.7 に示すモデルを構築した。図中、 $r_{Test}$  は診断テスト頻度、 $r_{Rep}$  は修復時間の逆数であり、ここでは各々 $r_{Test} = 180$  [1/h] (20 秒に 1 回)、 $r_{Rep} = 0.125$  [1/h] (8 時間) とする。このモデルにおいて、例えば、状態 S2 はブロック A に危険側故障が生じた状態であり、これが診断テストにより検出されると S5 に、検出されなければ S6 に、診断テストの実行前にブロック B にも危険側故障が発生すると S8 に状態が推移することを表している。S8 が両ブロックに危険側故障が生じた危険状態である。なお、診断テストと修復に関連する状態推移は、一定時間区間内で指数分布に従わないため、厳密にはマルコフモデルに含めることはできないが、あくまで近似モデルとして、Fig. 7 ではこれらを含めて考えている。各状態間の推移確率を C とおき、S1 から S2 への推移確率を $C_{12} (= \lambda_{AD} - \beta \lambda_{BD})$ , S1 から S3 への推移確率を $C_{13} (= \lambda_{BD} - \beta \lambda_{BD})$ と表すと、S1~S8 の状態確率 $P_1(t) \sim P_8(t)$ は次式で与えられる。

$$\begin{pmatrix} \frac{dP_1(t)}{dt} \\ \frac{dP_2(t)}{dt} \\ \vdots \\ \frac{dP_8(t)}{dt} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\sum_{k=2}^8 C_{1k} & C_{21} & \cdots & C_{81} \\ C_{12} & -\sum_{k=1, k \neq 2}^8 C_{2k} & \cdots & C_{82} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{18} & C_{28} & \cdots & -\sum_{k=1}^7 C_{8k} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P_1(t) \\ P_2(t) \\ \vdots \\ P_8(t) \end{pmatrix} \quad \cdots (2)$$

一般に、式(2)の微分方程式を解析的に解くのは困難である。そこで、各パラメータに前述した値を各々代入し、想定ミッション時間 10 年での各時刻  $t$  での状態確率 $P_1(t) \sim P_8(t)$ の推移を数値演算によって求めるとすると、サブシステム 1 の PFH<sub>dss1</sub>は S8 に至る確率として次式で導くことができる。