

200501018A

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

平成17年度 総括・分担研究報告書

主任研究者 梅崎重夫

平成18（2006）年3月

目 次

I. 総括・分担研究報告

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. 研究目的	(1)
2. 労働災害の分析結果	(4)
3. リスクアセスメント手法と災害防止対策の提案	(8)
4. サーボプレスの安全要件の解明	(12)
5. 二次加工用プレスブレーキの実験装置の製作	(16)
6. 大型プレス機械の安全システムの検討と実験機器整備	(17)
7. 結論	(19)
付録 サーボプレスの駆動制御回路の安全性評価手法の検討	(21)
II. 研究成果の刊行に関する一覧表	(46)
III. 研究成果の刊行物・別刷	(47)

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

主任研究者 梅崎重夫 独立行政法人産業安全研究所 主任研究官
分担研究者 清水尚憲 同 主任研究官
研究協力者 斉藤剛 同 研究官

研究要旨

本研究では、当初、平成19年度に予定していたサーボプレスの安全要件の解明を先行して実施した。これは、交付決定書の付帯事項として「サーボプレスの安全要件の解明は平成17年度に行うことが望ましい」との指示が厚生労働省からあったためである。また、平成18年度から労働安全衛生法にリスクアセスメントに関する条項が追加されることを考慮し、プレス機械を対象としたリスクアセスメント手法の検討も併せて実施した。

労働災害の分析結果では、平成11年から16年までに首都圏で発生したプレス機械による労働災害1,395件などの分析を行った。その結果、平成11年には46.8%、平成13年には44.5%であった障害部位での切断・挫滅の件数が平成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た。

リスクアセスメント手法の開発では、最新の国際安全規格や安全技術の動向に配慮すると同時に、中小零細企業で簡単に実施できる効果的な手法の開発が要望されていた。そこで、プレス機械の種類ごとに最近の安全技術の高度化に配慮したリスク低減戦略の構築を試みた。また、労働災害の分析結果に基づく典型的災害事例を抽出し、プレス災害の多発している中小零細企業を対象に、当該事例を活用した簡単で効果的なリスクアセスメント手法の開発を進めている。

サーボプレスの安全要件は、きわめて単純であることが判明した。具体的には、①手指が危険限界内に進入していないか、またはスライドが下降していないことの常時監視、②サーボ制御系のフェールセーフ性の保証、③機械式ブレーキの停止性能の保証だけに集約できる。ただし、「スライドが下降していないこと」の常時監視がないと、安全要件は複雑になる。また、②と③では、機能安全に基づく確率的なリスク低減策が必要である。そこで、②の課題の先端的な研究機関であるドイツのダルムシュタット工科大学に産業安全研究所の研究官を派遣し、最新の機能安全的知見も踏まえた確率的な安全性評価手法の解明を試みた。さらに、③では機械式ブレーキのチェック間隔の確率的な安全性評価が課題である。

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開発では、産業安全研究所が実施した大型プレス機械による死亡労働災害の調査などを活用して、安全システムの仕様検討を進めた。また、試験機を製作して問題点の解明を進めている。

1. 研究目的

我が国のプレス機械による労働災害は、図 1-1 に示すように、労働安全衛生法施行後の昭和 49 年に 5,450 件であったものが平成 13 年には 1,158 件(同)と大幅に減少した。しかし、平成 13 年以降は、図 1-2 に示すように、平成 14 年の 1,039 件を最小値として平成 15 年で 1,116 件、平成 16 年で 1,121 件と微増の傾向にある。

また、独立行政法人産業安全研究所が首都圏で最近発生したプレス災害 1,395 件の中で傷害部位が切断や挫滅に至った件数を調べたところ、図 1-3 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。

次に、統計方法が変わった昭和 58 年以降のプレス機械の種類ごとの災害発生件数を調査した。その結果、災害の減少の多くは、図 1-4 に示すように、①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、②フリクション・クラッチ式の機械プレス、③液圧プレス、④プレスブレーキなどによる災害は、過去 20 年間横ばい状況にあった。また、最近では、⑤サーボプレスの急速な普及や、⑥大型プレス機械で頻発している死亡災害など、新たな安全技術を必要とする問題も認められた。

このため、本研究では、上記②～⑥のプレス機械を対象に、最近の技術進歩を考慮した安全技術の高度化に関する研究を行っている。具体的には、プレス作業を対象としたリスクアセスメント手法

と災害防止対策の提案、サーボプレスの安全要件の解明、大型プレス機械や二次加工用プレスブレーキの安全システムの高度化などを重点に研究を実施している。

このうち、リスクアセスメント手法の提案では、最新の国際安全規格や安全技術の動向に配慮すると同時に、中小零細企業で簡単に実施できる効果的な手法の開発を試みる。

また、サーボプレスの安全化では、スライドが下降していないことの常時監視や、複雑なサーボ制御系のフェールセーフ性の保証などに重点を置いた安全要件の解明を試みる。この過程では、IEC61508などの機能安全規格の動向にも配慮する。

さらに、大型プレス機械や二次加工用プレスブレーキの安全化では、レーザー計測を利用した環境認識などの最新の光電子技術、RFIDを利用した作業者識別技術、非対称誤り特性を備えた安全フィールドバスなどの最新のIT関連技術を活用した新たな安全システムの構築を試みる。

これにより、大型プレスの金型内のように広大な領域内の安全確認や、二次加工用プレスブレーキのように人体と立体的形状を持つ製品が近接して混在する状況下での安全確認手法を実現する。なお、これらの検討では、安全性だけでなく作業性やコストも考慮した実用的な安全技術の実現にも配慮する。

以上によって、プレス作業を対象とした安全技術の高度化を図り、第 10 次労働災害防止計画の目標達成に資する。

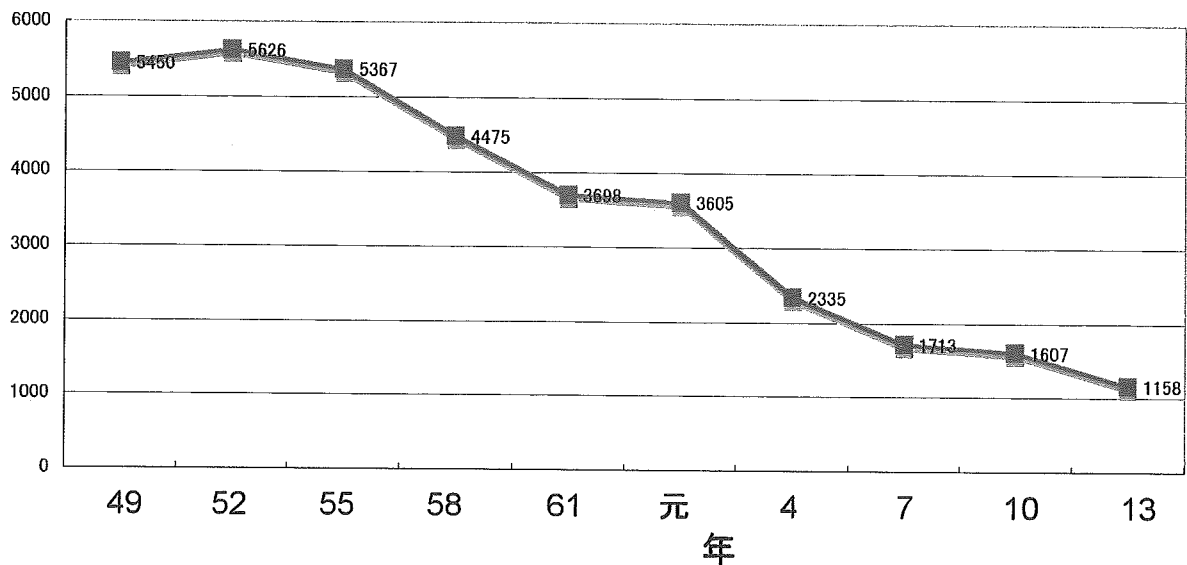


図1-1 プレス機械による労働災害の発生件数(文献1を使用)

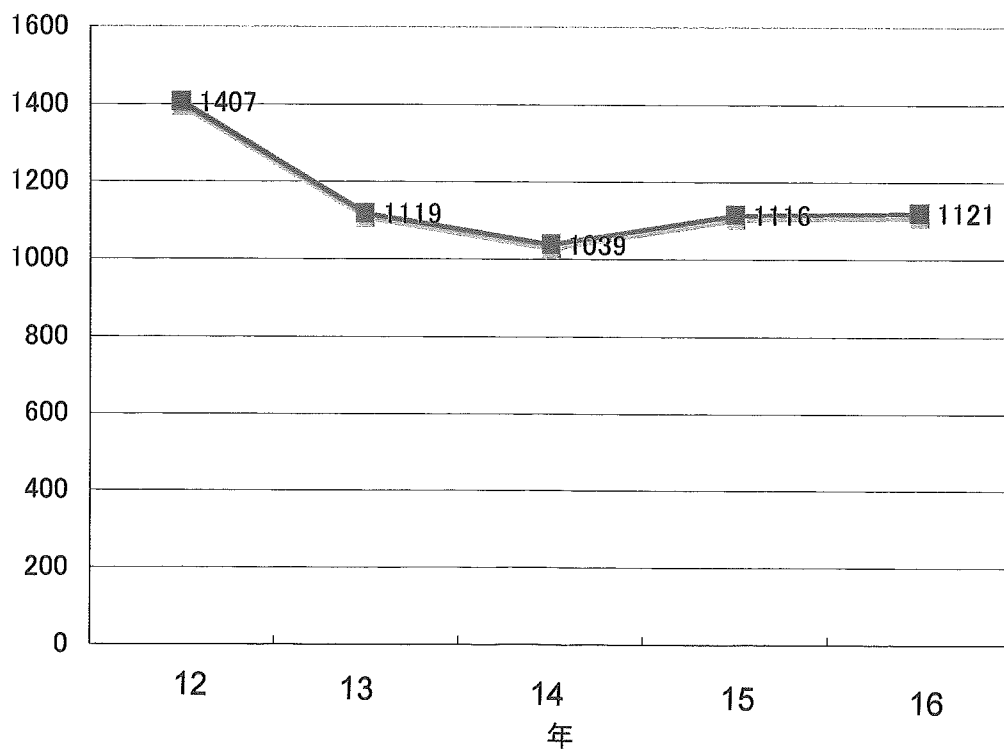


図1-2 プレス機械による労働災害の発生件数(文献2を使用)

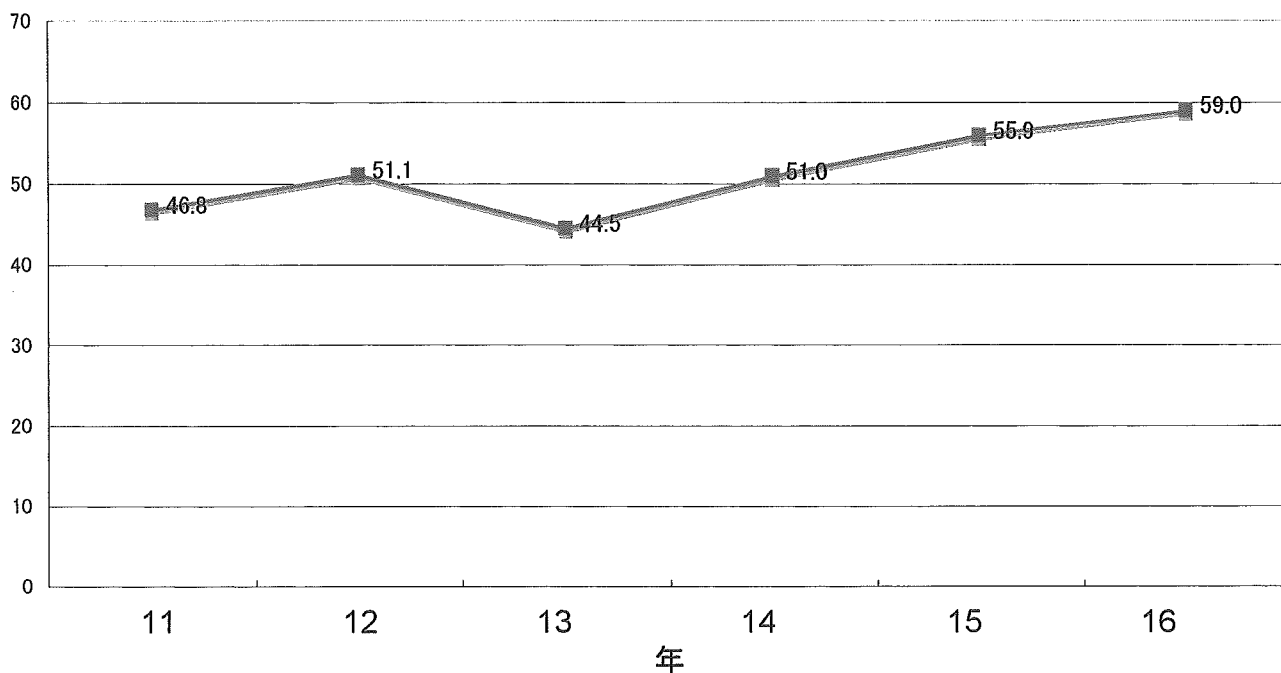


図1-3 障害部位が切断や挫滅に至ったプレス災害の割合

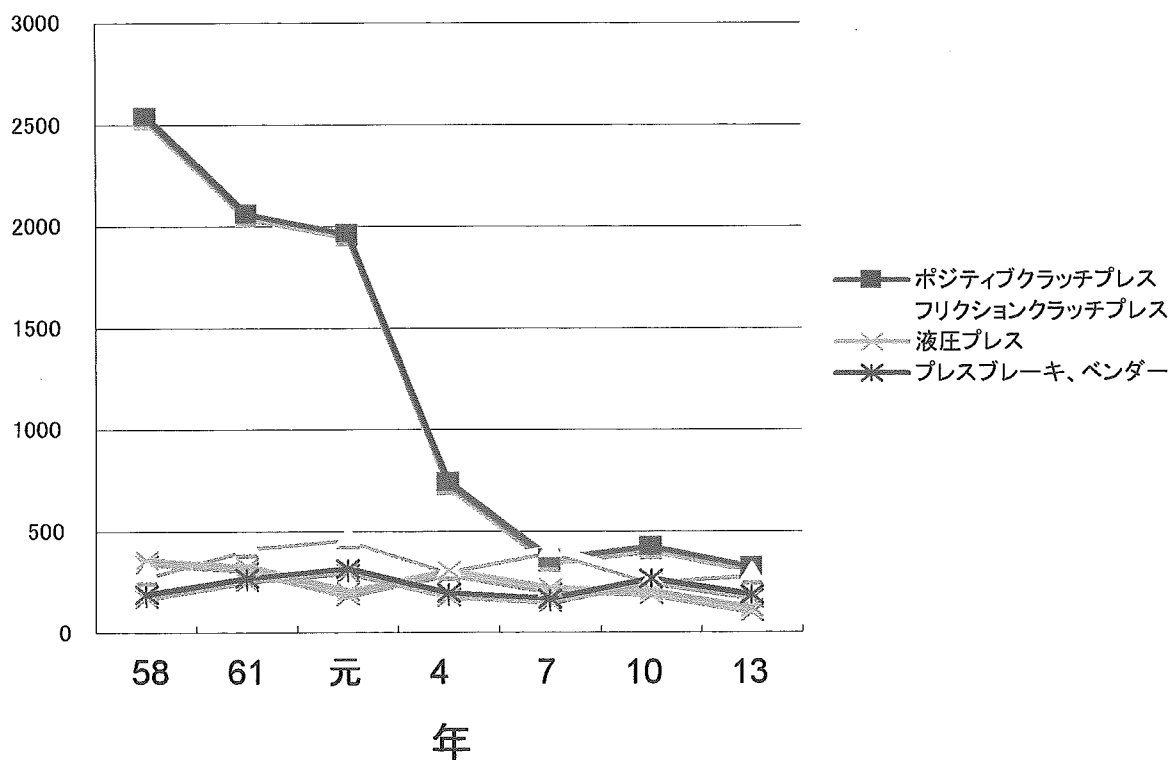


図1-4 プレス機械の種類ごとの労働災害の発生件数(文献1を使用)

2. 労働災害の分析結果

2.1 分析対象

本研究では、次の資料を使ってプレス機械による労働災害の分析を実施した。

1) 資料1

平成 11 年から平成 16 年までに首都圏で発生したプレス機械による労働災害(死亡または休業4日以上)1,395 件。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。なお、資料収集時期の関係上、平成 16 年は一部の災害が欠落している。

2) 資料2

平成 2 年から平成 3 年まで発生したプレス機械による労働災害(死亡または休業4日以上)216 件。災害の発生したプレス機械の種類、安全装置の種類、作業の種類、作業者の属性などが明確な資料である。

3) 資料3

最近発生した大型プレス機械による死亡災害事例。平成 14 年度に産業安全研究所が実施した大型プレス機械で発生した挟まれ災害の調査も含まれる。

4) 資料4

中央労働災害防止協会が発行した安全衛生年鑑¹⁾(昭和 30 年代から現在まで)。3 年ごとにプレス機械の種類ごとの災害統計を公表している。

5) 資料5

平成 12 年から平成 16 年までの間に、労働基準監督署に報告されたプレス機械に係る死傷病報告の件数²⁾。

2.2 分析結果

1) 災害発生件数の動向

図 1-1 に、労働安全衛生法施行後の昭和 49 年から平成 13 年までのプレス機械による災害発生件数(死亡および休業4日以上。製造業に限る。資料4参照)を示す。図からも明らかなように、災害発生件数は昭和 49 年の 5,450 件から平成 13 年の 1,158 件と大幅に減少した。

これに対し、平成 13 年以降(資料5参照)は、図 1-2 に示すように平成 14 年の 1,039 件を最小値として平成 15 年で 1,116 件、平成 16 年で 1,121 件と微増の傾向にある。

2) 災害重篤度の動向

図 1-3 に、首都圏で最近発生したプレス機械による労働災害 1,395 件(資料1参照)の中で、傷害部位が切断または挫滅に至ったと判定できる件数を産業安全研究所で集計した結果を示す。

図からも明らかなように、平成 11 年には 46.8%、平成 13 年には 44.5%であった切断・挫滅の件数は、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。

3) 機械の種類ごとの災害発生動向

図 1-4 に、統計方法が変わった昭和 58 年以降のプレス機械の種類ごとの災害発生件数を示す(資料4参照)。

図からも明らかなように、災害の減少の多くは、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るもので、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 年間横ばい状況にある。

ただし、零細企業などを中心にポジティブ・クラッチ式プレスが依然として使用

されており、平成 10 年では 422 件(全災害の 26.2%)、平成 13 年では 321 件(同 27.7%)と全災害の4分の1近くを占めていた。

4) 災害の直接原因

(a) フリクション・クラッチ式プレス

図 2-1 に、フリクション・クラッチ式プレス機械で発生した労働災害 81 件(資料2参照)の直接原因と典型的災害事例を示す。図からも明らかなように、災害の半数以上である 45 件(55.5%)では安全装置を切って作業していた。

この中には、作業者が安全装置を使用できるにもかかわらず、作業性が低下するなどの理由から安全装置を切って(あるいは金型の取り付け、取り外し、試し打ちなどのために安全装置が無効となる寸動モードに切り換えて)作業したために発生した災害が 28 件(34.5%)、長尺物加工などのために安全装置を使用できない作業が 16 件(19.8%)あり、この両者を加えた災害は 44 件(54.3%)を占めていた。

また、図 2-1 で示すように、安全装置の範囲不足で7件(8.6%)、不適当な行程の選択で5件(6.2%)、金型の落下で5件(6.2%)、安全距離の不足で 3 件(3.7%)、安全装置の改造による無効化で 2 件(2.5%)、安全装置等の故障で 2 件(2.5%)の災害が発生していた。

(b) プレスブレーキ

図 2-2 に、プレスブレーキで発生した労働災害 11 件(資料2参照)の直接原因と典型的災害事例を示す。図からも明らかなように、災害の半数以上である 7 件(63.6%)では安全装置が設置されてい

なかった。

(c) 大型プレス機械

分析の結果、死亡労働災害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発生している事例が多かった。

また、光線式安全装置が設置されているにもかかわらず、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もあった。

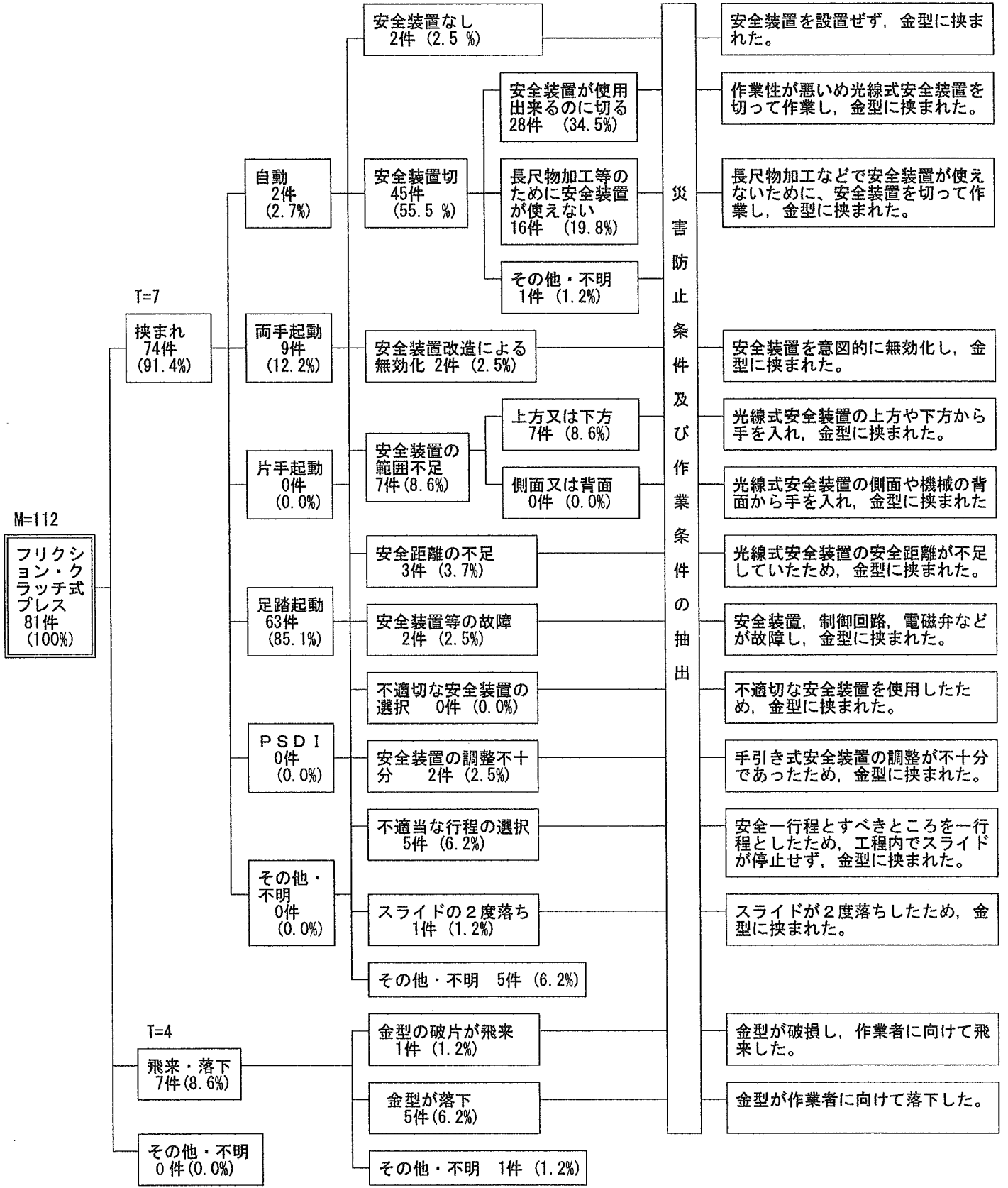
2.3 まとめ

以上のように、近年、プレス機械による労働災害は件数の微増とともに災害の重篤化が認められる。この原因は今後さらに詳しく分析する予定であるが、現段階で推定できる直接原因には次のものが考えられる。

1) プレス加工の中心となっているフリクション・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発生件数が過去 20 年間近くほとんど減少していないこと。

2) 零細企業などを中心に依然としてポジティブ・クラッチ式プレスが使用されており、全災害の4分の1近くを占めていること。

3) フリクション・クラッチ式プレスでは、安全装置を切ったために発生した災害が全災害の半数以上を占めていること。このうち、安全装置が使用できるにもかかわらず、安全装置を切って(あるいは安全装置が無効な寸動モードに切り換えて)作業したために発生した災害が全災害の3分の1近くを占めていること。また、



注) 災害防止条件①: 光線式安全装置 (1 1), 両手操作式安全装置 (1 2), ガード式安全装置 (1 3), 手引き式安全装置 (1 4), 手払い式安全装置 (1 5), その他 (1 9)
 災害防止条件②: 安全一工程 (2 1), 一工程 (2 2), 連続 (2 3), 寸動 (2 4), その他 (2 9)
 作業条件③: 長尺物 (3 1), コイル材 (3 2), 短尺材 (3 3), 小物部品 (3 4), 大物部品 (3 5), ブランク (3 6), 半製品 (3 7), その他 (3 9)
 作業条件④: 打ち抜き (4 1), 曲げ (4 2), 絞り (4 3), 穴開け (4 4), かしめ (4 5), 刻印 (4 6), その他 (4 9)

図2-1 フリクシオン・クラッチ式プレスの典型的災害事例

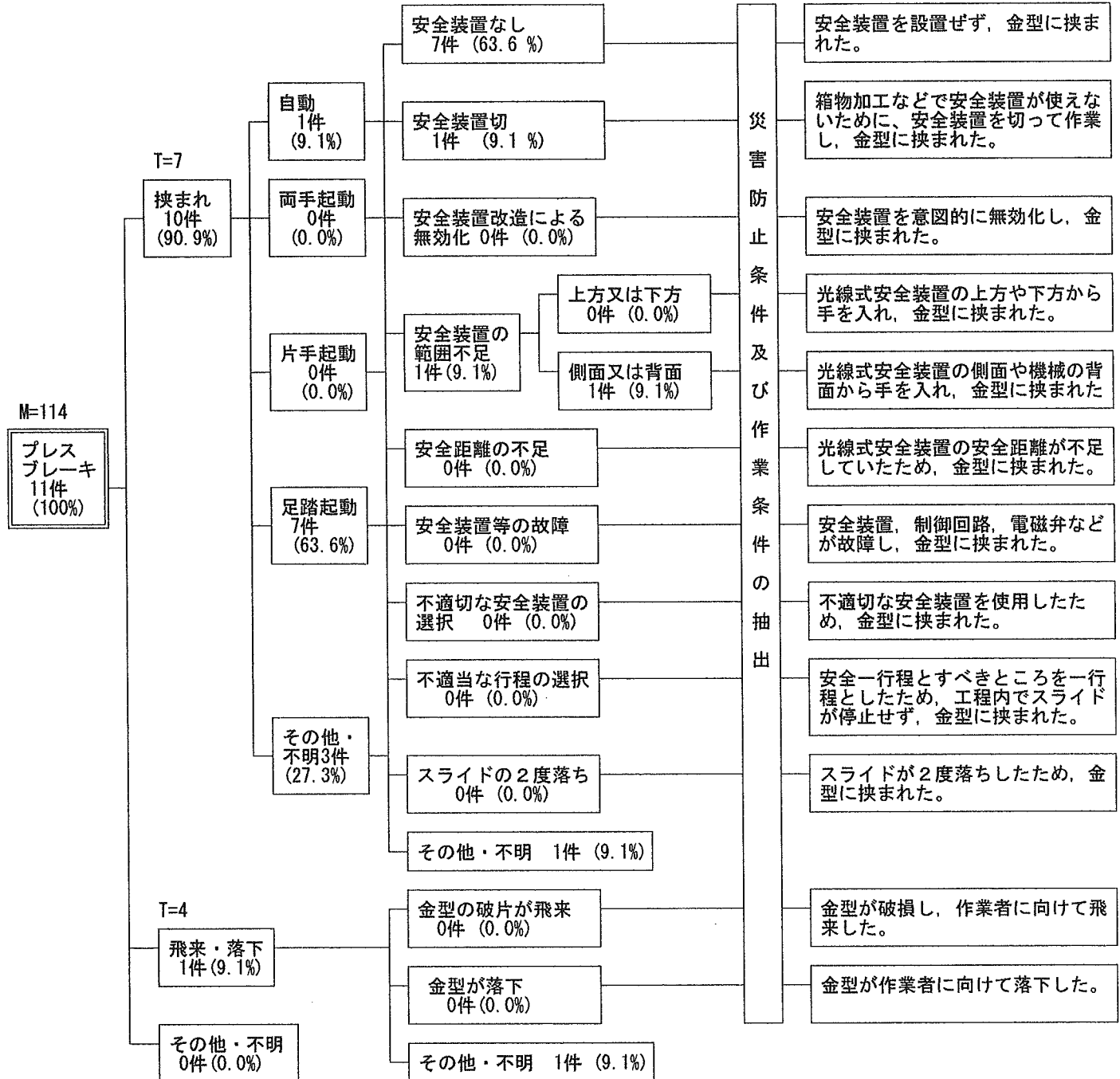
機械の名称

事故の型

直接原因

災害防止条件と作業条件

典型的災害事例



注) 災害防止条件①: 光線式安全装置 (1 1), 両手操作式安全装置 (1 2), ガード式安全装置 (1 3), その他 (1 9)
 災害防止条件②: 安全一工程 (2 1), 一工程 (2 2), 連続 (2 3), 寸動 (2 4), その他 (2 9)
 作業条件③: 板 (一次加工品) (3 A), 箱物 (二次加工品) (3 B), その他 (3 9)
 作業条件④: 曲げ (4 2), その他 (4 9)

図2-2 プレスブレーキの典型的災害事例

長尺物加工などの安全装置を使用できない作業で発生した災害が全災害の2割近くを占めていること。

4) プレスブレーキでは、安全装置が設置されていないために発生した災害が全災害の半数以上を占めていること。

5) 大型プレス機械では、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労働災害が発生している事例が多いこと。

3. リスクアセスメント手法と災害防止対策の提案

3.1 はじめに

平成 18 年度から労働安全衛生法にリスクアセスメントに関する条項が追加される。これに伴い、ISO12100 や ISO14121 に基づくリスクアセスメント手法がプレス作業にも活用されるようになってきている。しかし、中小零細企業で行われるプレス作業では、これらの規格を形式的に適用するだけでは、労力を要するわりには効果が薄いと考えられる。

このため、本研究では、最新の国際安全規格や安全技術の動向に配慮すると同時に、中小零細企業で簡単に実施できる効果的な手法の開発を試みた。

3.2 産業機械のリスク低減戦略

産業機械における災害防止対策の基本は、ISO12100 に定めた本質的安全設計や安全防護(ガード、保護装置)などの設備安全方策である。しかし、独立行政法人産業安全研究所が産業機械で

発生した死亡労働災害(挟まれ・巻き込まれ災害と激突され災害に限る)を分析した結果によれば、災害は機械停止が困難な危険点近接作業(注1参照)や、保護装置による直接監視が困難な広大領域内の作業で多発している²⁾。

労働安全衛生法では、これらの作業に対して、作業者に対する教育・訓練や管理監督者による安全管理など、人間の注意力に依存した災害防止対策を義務づけている。しかし、人間の注意力には限界があり、時として不安全行動が発生する。そこで、人間の注意力を補完するリスク低減手段として、産業安全研究所が提案する支援保護装置(注2参照)の適用や最新のITを利用した不安全行動の監視を行い、可能な限りリスクの低減に努める戦略を提案する。

図 3-1は、以上の考え方を基に提案する産業機械のリスク低減戦略である。

注1) 危険点近接作業

作業者が機械の可動部を停止させないで可動部に近接して行う段取り、トラブル処理、保全、清掃などの作業をいう。

注2) 支援保護装置

保護装置単独では適切なリスク低減は達成できないが、人によるリスク低減策や装置の保守・点検などのリスク低減策を併用することで、適切なリスク低減の達成を目指す支援装置をいう。

3.3 プレス機械毎のリスク低減戦略

次に、プレス機械毎のリスク低減戦略の概要を示す。

1) フリクション・クラッチ式プレス

このプレスでは、①安全装置を切るためのキーや切り替えスイッチの除去、②寸動モードでも安全装置を有効とすること、③長尺物加工に使用できる安全装置の開発（産業安全研究所特許第3603084号参照）などを進めることによって労働災害の半数以上が防止できると考えられる。そこで、これらの点を考慮してリスクアセスメント手法を開発した。

2) 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半数以上を占めている。これは、箱物などの二次加工品では、従来の二光軸遮光型の安全装置の使用が困難などの理由による。このため、本研究では、新たな安全システムとして、金型挟圧点への人体進入をレーザービーム光で直接監視するシステム（第5章参照）の開発を試みる。

この場合、加工材の跳ね上がりによる災害を防止するために、産業安全研究所特許第3540294号の適用なども考慮する。

3) 大型プレス機械

このプレスでは、複数作業者が広大領域内で作業を行う場合の災害防止対策が特に問題となる。この対策としてキースイッチやプラグが使用されているが、作業員による抜き忘れの問題がある。

このため、本研究では、新たな安全システムとして、金型内をレーザー光で直接監視するシステム（第6章参照）の開発を試みる。ただし、ロボットや搬送装置などが混在しているラインでは、ライン内の全域を直接監視できないこともある。

そこで、このような場合の次善の策として、RFIDなどの最新のITを活用して作業員識別を行う間接監視方式も検討する。

3.4 リスク低減戦略の災害防止効果

図3-2は、以上の戦略を活用したときの災害防止効果を推定したものである。この分析ではフリクション・クラッチ式プレスで発生した災害81件（資料2参照）を対象とした。

図からも明らかのように、災害は①安全装置を切るためのキーや切り替えスイッチの除去と、②寸動モードでも安全装置を有効とすることが効果的と考えられるものが併せて28件（34.6%）であり、③長尺物加工で使用できる安全装置の開発が効果的と考えられるもの16件（19.8%）も含めると、①～③で44件（54.3%）と半数以上を占めていた。

以上より、フリクション・クラッチで発生した労働災害の半数以上は上記①～③の対策でリスクを低減できる可能性がある。

3.5 リスクアセスメント手法の提案

図3-3に、以上の戦略に従ったリスクアセスメント手法の具体例を示す。この手法では、図3-3を作成する過程で、典型災害事例のデータベース、根本原因究明用の推論エンジンとデータベース、及び安全方策のデータベースを使用する。これにより、プレス災害の多発している中小零細企業でも、簡単で効果的なリスクアセスメントの実施が可能になると考える。

このうち、根本原因の究明を行う推論

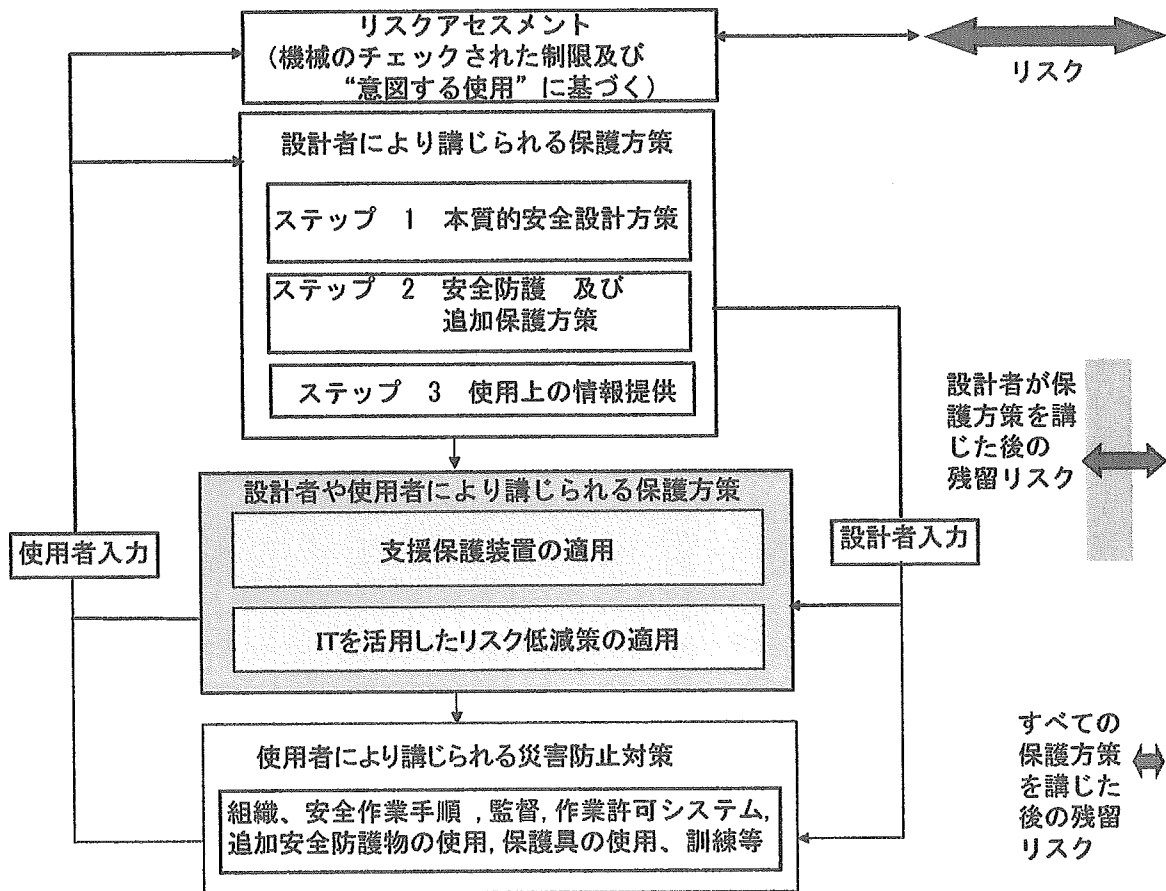


図3-1 産業機械のリスク低減戦略

本質的安全設計と安全防護	支援保護装置	安全管理
安全装置なし、無効化、 範囲不足、安全距離不 足、故障、調整不十分、 不適當な行程の選択、 二度落ち等に対する対策	・安全装置を切るためのキー やスイッチを除去する対策 ・寸動時でも安全装置を有効 とする対策	・長尺物加工用 の支援保護装置 の適用
24件(29.6%)	28件(34.5%)	13件 (16.0%)
44件(54.3%)		
52件(64.2%)		29件(35.8%)
68件(84.0%)		13件(16.0%)
81件(100.0%)		

図3-2 フリクション・クラッチ式プレスで発生した災害の防止効果

1. 事業場名、現場名など	2. プレス機械の名称	3. プレス機械の種類と能力	4. 安全装置の種類	5. リスクアセスメントの実施者	6. 実施年月日
㈱安全製作所 第2プレス加工ライン	3号機	フリクション・クラッチ式プレス (500KN)	光線式安全装置	鍛造太郎	平成17年11月25日

7. 作業内容	8. 想定災害事例	9. 初期リスク			10. 根本原因	11. 対策	12. 残留リスク (適切なリスク低減は?)	13. 備考
		可能性	ひどさ	総合				
長尺物の 穴あけ作業	長尺物加工のために光線式安全装置を切って作業し、金型に挟まれる。	大	障害	A	・安全装置が容易に切れる構造である。 ・長尺物加工に使える安全装置がない。	・安全装置を切るためのキーの除去。 ・長尺物加工に使える安全装置としてブランキングシステムの適用。	達成	⋮
⋮	⋮				⋮	⋮	未達成	⋮

典型災害事例
のデータベース

根本原因究明用の
推論エンジンと
データベース

安全方策の
データベース

図3-3 リスクアセスメントの実施事例

エンジンでは、「なぜ？」という問いを繰り返すことによって潜在的な不具合の背後にある根本原因を究明する。従来のリスクアセスメント手法は直接原因の抽出が主であるが、根本原因の究明を重点に置いたところに本手法の特徴がある。

以上の詳細は、安全資料として平成18年度に公表の予定でいる。

3.6 まとめ

リスクアセスメント手法の開発では、最新の国際安全規格や安全技術の動向に配慮すると同時に、中小零細企業で簡単に実施できる効果的手法の開発が要望されていた。そこで、次の点に留意した手法の開発を試みた。

- 1) プレス機械の種類ごとに最近の安全技術の高度化に配慮したリスク低減戦略の構築を試みた。
- 2) 労働災害の分析に基づく典型的災害事例を抽出し、プレス災害の多発している中小零細企業を対象に、当該事例を活用した簡単で効果的なリスクアセスメント手法の開発を進めている。
- 3) 「なぜ？」という問いを繰り返すことによって、潜在的な不具合の背後にある根本原因を究明できるリスクアセスメント手法を提案した。

以上は、中央労働災害防止協会が公表した「プレス事業場におけるリスクアセスメント入門マニュアル」³⁾の補完としても活用できると考えられる。

4. サーボプレスの安全要件の解明

4.1 はじめに

近年、プレス作業の現場ではサーボプレスの急速な普及が見込まれるようになってきた。このプレスは、クラッチ機構やフライホイールを利用せずに、主駆動源であるACサーボモータを制御するサーボドライバーによってスライドを制御するという特徴を持つもので、一般には次のように分類されている⁴⁾。

- ① 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
- ② サーボモータを駆動源とし、ボールスクリュー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
- ③ サーボバルブを使用した液圧サーボプレス
- ④ 液圧ポンプの駆動をサーボモータで直接行う方式の液圧サーボプレス

以上のようなサーボプレスでは高精度加工や難加工材の成型が可能となり、プレス加工の高付加価値化が図れる⁵⁾。また、デジタル制御方式への変更によってNC化された各ユニットとの連動による複合加工が可能になるほか、従来は熟練技術者に頼っていた加工条件などのデータ化も可能であり、省エネや低騒音化の点でもメリットは大きい⁵⁾。

一方で、サーボプレスは運転中の停電、サーボ制御系の故障、電磁ノイズの影響などによってスライドが不意に作動し、予想もしない災害を起こす可能性がある。そこで、本研究では、以上の特性を備えたサーボプレスを対象に安全要件の解明を試みた。

4.2 サーボプレスの安全要件

4.2.1 手指が危険限界内に進入していないか、またはスライドが下降していないことの常時監視

一般に、プレス機械による挟まれ災害は、スライドが下降中のときに作業者の手指が誤って危険限界内に進入して発生する。したがって、災害を防止するには、作業者の手指が危険限界内に進入していないか、または、スライドが下降していないかのいずれかの条件を満足させる必要がある。

いま、時刻 t において作業者がプレス機械の危険限界内に進入していないときを $H_N(t)=1$ 、進入しているときを $H_N(t)=0$ とする2値論理変数で表す。また、時刻 t において、スライドが下降していないときを $D_N(t)=1$ 、下降しているときを $D_N(t)=0$ とする2値論理変数で表すと、以上の関係は次式で与えられる。

$$H_N(t)=1 \text{ or } D_N(t)=1 \quad (1)$$

表4-1に、以上の点を考慮したプレス機械の安全条件を示す。このうち、 $H_N(t)=1$ は、光線式安全装置や両手操作式

表4-1 サーボプレスの安全要件

$H_N(t)$	$D_N(t)$	判定
1	1	安全
1	0	安全
0	1	安全
0	0	危険

安全装置を使用した常時監視によって確認が可能である。また、 $D_N(t)=1$ は、スライドが下降していないことの常時監視を必要とする。

しかし、フライホイールを備えているプレス機械の場合、フライホイールの慣性モーメントのために、スライドの運動方向が瞬時に逆転する事態は通常は考えられない。このため、通常のプレス機械では、カムスイッチなどを利用してスライドが下死点や上死点を通過したのを検知するなどの方法で、スライドの上昇と下降の判定を行っている。

これに対し、サーボプレスでは、フライホイールを備えていないために、スライドの運動方向が瞬時に逆転するおそれがある。また、この逆転は行程内のどこで起こるか分からないから、結局スライドが下降していないことの常時監視が必要となる。

4.2.2 サーボ制御系のフェールセーフ性の保証

表 4-1 では、 $H_N(t)$ と $D_N(t)$ の両方が0であるときは、直ちにスライドを停止させて作業者の安全を確保するシステムを必要とする。以後、これを安全確認システムと呼ぶ。このシステムの機能は、時刻 t において、スライドが運転中のときを $W(t)=1$ 、停止中のときを0とする2値論理変数で表すと、次のように表現できる。

$$H_N(t)=0 \text{ and } D_N(t)=0 \text{ のとき} \\ W(t+\Delta t_B)=0 \quad (2)$$

ただし、 Δt はスライドの急停止時間である。

従来のプレス機械では、(2)式の制御を

マイクロプロセッサなどを使わないハードワイヤードな回路で行うことも多かった。しかし、サーボプレスでは、スライドが下降していないことの常時監視を必要とするなどの理由から、プログラマブルな電子制御装置を利用した安全確認システムが不可欠である。

このような安全確認システムでは、従来のプレス機械を対象とした確定的な安全方策の適用は困難で、確率的なリスク低減策を適用せざるを得ない。この詳細は資料1を参照されたい。

4.2.3 機械式ブレーキの停止性能の保証

(2)式で示される安全確認システムは、厳密には次の機能を必要とする。

(a) 不意作動の防止

サーボ制御系の故障や電磁ノイズの影響などによって、停止中のスライドが突然動き出しそうになったときは直ちにスライドを急停止させる。

(b) 運転中の緊急停止

安全装置が作動したときや作業者が非常停止装置を操作したときは、直ちにスライドを急停止させる。

以上のケースで急停止をサーボロックによって行くと、サーボロックの故障によってスライドの停止が維持できなくなることがある。そこで、このような場合でも、スライドの停止を維持できる機械式ブレーキの併用が必要となる。

この場合、機械式ブレーキはいつ起こるか分からないサーボロックの異常に対応するために、常時の正常監視(作動テスト、セルフチェック)を必要とする。しか

し、現実には、機械式ブレーキを常時チェックするのは不可能である。そこで、機械式ブレーキが万一故障したときを想定して、①複数バネ使用とバネの50%故障時における機能維持、及び②適切な時間間隔でのブレーキ性能のチェックを行う。このうち、②のチェック間隔は実務上、一行程毎とすることが多いようである。ただし、厳密には、許容可能なリスクとの関係で、機械式ブレーキのチェック間隔を確率的に決定する安全性評価手法の解明が課題となる。

4.3 安全要件の考察

サーボプレスの専門家集団である社団法人日本鍛圧機械工業会は、平成17年3月に「サーボ駆動式プレス機械の規格・標準化に関する委員会」での検討結果⁴⁾を公表した。この報告書では、サーボプレスの安全上の課題として、次のような検討課題を設定している。以下、原文のまま該当部分を引用する⁴⁾。

(a) 従来よりの両手操作方式において、サーボプレスの寸動によるスライド下降行程時、両手をプレス起動ボタンより離れた時点でのプレス機械側の停止状態を設定する場合、「サーボロック」のみの停止では手が挿入された場合の危険に対する安全は保証できない。

(b) 前項同条件において、従来の「両手操作方式」という安全方策は、サーボプレスの本質安全を確保し許容される基本手法とはならない。

(c) 非常停止及び急停止時に機能するメカニカルブレーキは緊急時のみの作動であり、その作動の確実性をどのように

保証するか。またその安全機能をどのように確保するか。従来のクラッチブレーキを用いたプレス機械のように、毎回の作動に対し磨耗すればオーバーラン検出にて急停止させるシステムを、サーボプレスにてどのような形式にて持たせることができるか。

(d) 非常停止及び急停止時にメカニカルブレーキを使用する場合、そのブレーキ性能と検査要件はサーボプレスの機械構造要件として、複式バネ使用、バネの50%故障時における機能維持及び適切な時間間隔でブレーキ性能のチェックを行うモニター機能を必要とする。

(e) ミューティングシステムの信頼性について、そのシステム及び設定を誤った場合は非常に危険な状態を起こすため、制御安全方策のカテゴリは「4」以上を必要とする。従来のフライホイールを動力源とするプレス機械においては、フライホイールの持つ慣性にて瞬時の逆転は想定されず、従ってスライドの上昇行程における瞬時の下降行程への変化はないと考えられるが、サーボプレスの場合正逆の動きは信号により制御されるため、ノイズ等による誤動作が想定される。よってミューティング動作中のスライド下降に対する防護方策が必要である。

以上の内容は、概略、次のような問題点を指摘していると考えられる。

1) 両手操作式の安全装置は、特に寸動時には保護装置として使えない。

2) 緊急時に作動する機械式ブレーキの確実性を保証できない

3) ミューティング(注3参照)の使用には慎重を要する

以上のうち、1)と3)はスライドが下降していないことの常時監視によって問題解決が図れると推察される。この監視には、エンコーダやリニアスケールを使う方法などが考えられる。これに対し、2)は機械式ブレーキのチェック間隔を決定するための確率的安全性評価手法の解明が必要である。これについては今後の検討課題と考える。

なお、実際のサーボプレスの安全制御では、スライドが下降していないことの常時監視を行わない方式もある。この場合は上記1)と3)の問題が起こるため、安全要件が複雑となるだけでなく、ミュートイングを使わないことや寸動停止時における安全方策などが別途必要となる。このときの具体的方策は文献4)の第4.1節を参照されたい。

注3)ミュートイングとは、安全装置の無効化を意味する。一般的なミュートイング機能では、上昇無効(生産性を上げるために、手指が金型に挟まれるおそれのないスライドの上昇時には安全装置を無効とする機能)が代表的である。

4.4 安全要件の抽出

次に、前述した日本鍛圧機械工業会の報告書⁴⁾では、現構造規格にないサーボプレス特有の安全要件として、以下を提案している。

- 1)サーボシステムは、サーボ停止以外の停止機構を持っていないなければならないこと。
- 2)サーボシステムはサーボロック及びその他のブレーキ機構を含め、冗長性と監視

機能性を有したシステムまたは同等以上の安全化システム機能が確保されていなければならないこと。

3)スライドの停止中にサーボモータによる停止機能が維持できなくなった場合、スライドを保持できる機械式ブレーキを有するものでなければならないこと。

4)機械式ブレーキは、スライドが最大速度で作動中に減速、停止、正逆判別機能が維持できなくなった場合には、スライドを停止できる十分な機能を有するものでなければならない。なお、スライドの停止機能を電気式ブレーキ(ダイナミックブレーキ等)で補うことができる。

同様に、厚生労働省が社団法人産業安全技術協会に委託した「動力プレス機械構造規格、及びプレス機械又はシャワーの安全装置構造規格の国際整合化に関する調査研究委員会」⁶⁾(平成17年3月)でも、サーボプレス特有の安全要件として3)及び4)を提案している。

以上のうち、2)は本研究で抽出した「②サーボ制御系のフェールセーフ性の保証」に、1),3),4)は「③機械式ブレーキの停止性能の保証」に相当する。これに対し、「①手指が危険限界内に進入していないか、またはスライドが下降していないことの常時監視」に相当する要件は両報告書には記載されていない。

したがって、今後の構造規格の改訂作業では、要件①の追加の必要性を検討すべきと考える。また、②や③に関連するものとして、機能安全的手法を含めるかを検討すべきと考える。

4.4 まとめ

サーボプレスは安全要件は、きわめて単純である。具体的には、①手指が危険限界内に進入していないか、またはスライドが下降していないことの常時監視、②サーボ制御系のフェールセーフ性の保証、③機械式ブレーキの停止性能の保証だけに集約できる。ただし、「スライドが下降していないこと」の常時監視がないと、安全要件は複雑になる。

以上のうち、①は、既存の報告書等では指摘されていないと思われる。したがって、今後の構造規格の改訂作業では、要件①の追加の必要性を検討すべきと考える。

また、②や③では、機能安全に基づく確率的なリスク低減策が必要である。そこで、②の課題の先端的な研究機関であるドイツのダルムシュタット工科大学に産業安全研究所の研究官を派遣し、最新の機能安全的知見も踏まえた確率的な安全性評価手法の解明を試みた。また、③では機械式ブレーキのチェック間隔の確率的な安全性評価が課題である。

5. 二次加工用プレスブレーキの実験装置の製作

本研究では、次に示す仕様の二次加工用プレスブレーキの実験装置を製作した。写真 5-1 に、製作した実験装置の外観を示す。

- 1) プレスブレーキの加工工具は、パンチホルダに固定した上側工具(パンチ)とダイホルダを介して操作台に直結している下側工具(ダイ)から構成される。
- 2) プレスブレーキで曲げ加工を行う際は、

パンチホルダが下降するために上側工具(パンチ)と下側工具(ダイ)の間に挟圧危険部分が発生する。この部分を、レーザー光を利用した人体検出用の投光器及び受光器で監視する。

3) 投光器及び受光器は、両方とも上側工具(パンチ)に直接取り付け対向させる。このうち、投光器には2個または3個のレーザー発光素子(S1, S2及びS3)を設ける。また、受光器には3個または4個のレーザー受光素子(E1, E2, E3及びE4)を設ける。

4) 投光器が発生するレーザー光のスポット径は約 10mm とする。

5) 上側工具(パンチ)の降下中に手指等が薄板の表面を滑りながら進入したときは、E1が遮光されるために上側工具(パンチ)を停止または上昇させる。

6) 上側工具(パンチ)が薄板の上方 23mm まで接近したら、上側工具(パンチ)の下降速度を 10mm/sec 以下に切り換えた上で、E1とE2のミュートイング(無効化)を行う。

7) 6)の後、E3及びE4は少なくとも 1.4 秒間(下降速度 10mm/sec で 1.4 秒のため 14mm 下降する)はミュートイング(無効化)されてはならないこと。これにより、薄板の上方 9mm までには指の進入時に上側工具(パンチ)が停止か上昇するので、手指等の挟まれ災害を防止できること(9mm の隙間に手指等は狭すぎて進入できない)。

8) 1)に記載した上側工具(パンチ)及び下側工具(ダイ)は、実験者等が誤って工具内に手指等を進入させた場合の保護のために、工具を設置しない方式の

採用，軟接触式模擬工具の採用などの方法を検討すること。

6. 大型プレス機械の安全システムの検討と実験機器整備

本研究では、大型プレス機械の安全システムの検討と実験機器の整備を行った。以下は、検討した安全システムの仕様である。

1) 作業者が金型内やボルスタ上に侵入していないことを安全装置によって常時監視する安全確認システムを構成する。具体的には、次のような対策が望ましい。なお、安全確認システムの詳細は「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」(平成10年7月28日，基発第464号，以下「単に「フェールセーフ・ガイドライン」と呼ぶ)などを参照のこと。

2) 安全を確認すべき領域を図6-1の各領域に分割する。

I : 金型の内部

II : ボルスタ上

III : ボルスタに隣接した領域(作業者が金型内やボルスタ上に容易に侵入可能な領域)

3) 広大な領域IとIIを監視するために、遠方に到達しやすいレーザー式安全装置を使って監視を行う(図6-1参照)。この装置は、レーザー式エリアセンサとも呼ばれる。

レーザー式安全装置は特定の平面を監視するものであるため、監視面以外の箇所から作業者が侵入すると、作業者を検知できないことがある。そこで、下金型の設置高さに応じて監視面の高さを調

整する機構の設置や、複数のレーザー式安全装置を高さの異なる位置に設置するなどの対策が必要となる場合がある。

4) 3)では、スライドの上昇・下降中にレーザーが遮光される。そこで、スライドの上昇・下降中はレーザー式安全装置を無効として、スライドの停止を防止する。これをミュートイング(無効化)という。

5) 4)のミュートイング時では、領域IIIに存在する作業者が突然領域IやIIに侵入すると、災害を防止できない。そこで、領域IIIに対しては侵入防止用光線式安全装置や補助光軸などを使って常時監視を行い、金型内やボルスタ上への作業者の不意の侵入を防止する。

6) 自動運転時にロボットが金型内に製品を送給するときや金型内から製品を排出するときは、光線式安全装置の光軸を遮光してしまうことがある。この問題についても、ミュートイング技術の適用によって対応が可能である。具体的には、次のような方策が考えられる。

- ① マニピュレータの進入直前に、領域III(必要に応じて領域Iまたは領域IIも)に作業者がいないことを確認する。
- ② ①の確認後、光線式安全装置及び補助光軸をミュートイングする。
- ③ ②の後に、ロボットのマニプレータが領域IIIに進入する。
- ④ 製品の排出作業が完了した後に、直ちにミュートイングを解除する。
- ⑤ 万一、ミュートイング中にロボットに異常が発生したときは、ロボットのマニピュレータの位置をティーチング操作などによって手動で復旧を図るとも