

FMEAによる空気圧制御システム における安全性解析の実践

職業能力開発総合大学校 中村 瑞穂

1. 緒言

FMEA (Failure Mode and Effects Analysis : 故障モード影響解析) は、国内および海外でも製品開発から運用までのすべてのライフサイクルにおいて製品、運用の問題を解決するツールとして活用されている手法である。

職業能力開発分野では在職者訓練 (能力開発セミナー) では人気コースとなっている。

学卒者訓練 (専門課程, 応用課程) では担当者, テーマにより総合製作実習, 開発課題で行われている程度であるが「実践技術者 (テクニシャンエンジニア)」、「生産現場のリーダー」などの養成には必要な技術である。

本報では代表的空気圧制御システムの構成例を定めて, 各種コンポーネントについてFMEAを行い, 安全に関係する故障モードの抽出を行い, 安全システム構築に必要な条件を検討した。

第2章ではFMEAの概要と解析手順について示した, 第3章では解析対象となる代表的空気圧制御

システムの構成例を示し, 各種コンポーネントについてFMEAによる解析結果を示した。第4章ではFMEAの解析結果について考察を行い, 空気圧制御システムでは圧力上昇, 下降の両側に安全に関係する故障モードが存在すること示した。その結果, 圧力上昇, 下降についての監視機能が必要であることを考察した。

さらに, 第5章では今回のFMEAの解析結果について教育訓練での活用した場合に予想できる効果について述べることでより実践技術者育成のための資料として供したい。

2. FMEA (Failure Mode and Effects Analysis)

2.1 FMEAの概要

FMEAは信頼性解析手法の1つで, システム (装置・機器) を構成する部品や機器で発生した故障が上位のサブシステムやシステムへ及ぼす影響を表1のようなワークシートを使用して解析する手法である。FMEAは品質管理, 信頼性, 保全性, 安全性

表1 基本的FMEAワークシート

システム _____

| 機器名 | 機能 | 故障モード | 原因 | 発生頻度 | 影響 | | | 致命度 | 対策 | 対策順位 |
|-----|----|-------|----|------|--------|------|-----|-----|----|------|
| | | | | | サブシステム | システム | 安全性 | | | |
| | | | | | | | | | | |

解析などが目的であり自動車、家電、重電、鉄道などの多くの産業で使用されている。

ISO9000シリーズではFMEAが改善ツールとしてあげられている。また、ISO9000をベースとしたTS/ISO16949（自動車セクター規格）ではFMEAの実施が要求事項とされているため、自動車メーカはFMEAの実施を部品メーカなどに対して取引条件としている場合もある。

これらの背景からFMEAは製品の品質保証や改善には欠かせないツールであることがわかる。

2.2 FMEAの手順⁽¹⁾

FMEAはワークシート（表1）を使って、FMEA解析グループ（3～5名）を編成して、図1のFMEAにおける解析手順により作業を以下のとおりに行う。

解析グループには解析対象システムについて経験があり高い技術レベルを持った中堅、ベテラン技術者を中心に構成するのが理想的である。

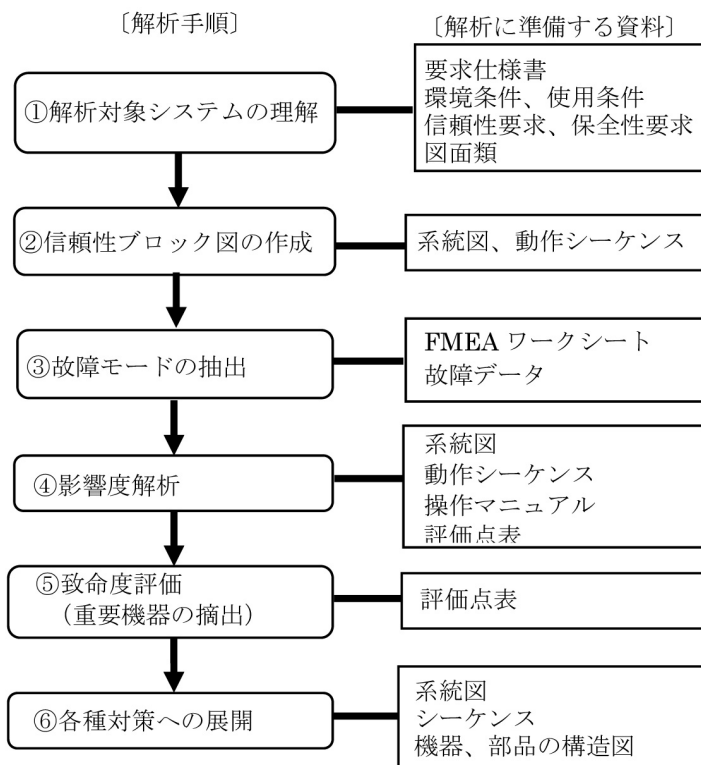


図1 FMEA手順⁽¹⁾

① 解析対象システムの理解

解析対象となる製品全体を理解していることであり、具体的には製品の機能、性能、構造、材質、システムとしての任務、製造方法、製造工程、使用環境、起動・停止、運転条件（運転頻度、稼働時間など）、保全方法などを理解していることである。

② 信頼性ブロック図の作成

FMEA実施での信頼性ブロック図はシステム、サブシステム、ユニット、使用機器（部品、機器、回路、モジュールなど）などの分解レベルを表している。すなわち、サブシステムや機器などの要素間の機能的な相互依存性を明らかにすることができるため、一つ部品で発生した故障モードが上位の機器、サブシステム、システムなどへの影響を追跡するために使用する。信頼性ブロック図の代わりに解析対象システムが機械や装置であれば全体的な組立図などを利用している場合もある。

③ 故障モードの抽出

故障モードは機器や部品で発生する故障（機能停止型故障、機能低下型故障）の状態または現象である。

故障モードの抽出は、解析対象システムが運用されているときに発生する物理的、化学的、機械的、電気的、人為的などが故障モードの原因であり、アイテム（システム、機器、部品など）で故障が発生する仕組み（故障のメカニズム）を考察することが必要であり、漏れがないように抽出する。

④ 影響度解析

影響度解析は部品で発生した故障モードのサブシステム、システムへの影響、安全性、経済性などにどのような影響が生じるかを定性的に求め、各影響について表2の評価点表により、評価レベルを決め、式(1)により各影響の評価レベルの合計を求めたのが影響度である。

影響度解析の範囲は製品によりすべてが異なるため企業または組織で設計改善または工程・作業改善をできるレベルであることが基本であるため解析グループであらかじめ設定しておく必要がある。

表2 影響度評価点表 (例)

| 評価レベル | 評価基準 | システム・サブシステムへの影響 | 安全性への影響 |
|-------|---------|--------------------------|----------------|
| 10 | 致命的 | システムに重大な損傷 | 死亡事故 |
| 8 | 重大・機能喪失 | システムの一部に損傷 | 人身事故 (中程度の怪我) |
| 6 | 機能低下 | システムに1つの重大な影響を与える | 軽傷または機械システムの破損 |
| 4 | 軽微 | 部品の損傷が軽微で、システムに与える影響が小さい | 怪我 |
| 2 | 極小 | 無視できる程度である | なし |

$$\text{影響度} = [\text{サブシステム}] + [\text{システム}] + [\text{安全性}] \dots\dots (1)$$

⑤ 致命度評価

致命度は式(2)により発生頻度と④で求めた影響度の積により評価を行う。発生頻度については評価レベルを定めた表3の評価点表により行う。表3の評価点表は高い評価レベルは故障モードの発生頻度が高いものから順番にレベルが決まっている。

表3 発生頻度評価点表 (例)

| 評価レベル | 評価基準 | 発生頻度 |
|-------|-------------|---------|
| 10 | 発生頻度が非常に高い | 1回/週以内 |
| 8 | 発生頻度が高い | 1回/月以内 |
| 6 | 故障の可能性はある | 1回/年以内 |
| 4 | 少ないが起りうる | 1回/5年以内 |
| 2 | 故障がほとんど起らない | 1回/5年以上 |

$$[\text{致命度}] = [\text{故障モードの発生頻度 (評価レベル)}] \times [\text{影響度}] \dots\dots (2)$$

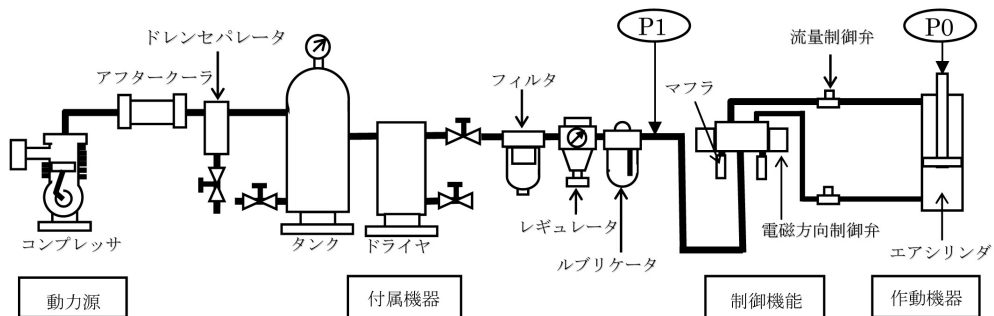


図2 代表的空気圧制御システムの構成例

⑥ 各種対策への展開

致命度の高い順に対策順位が決まることから致命度の高い故障モードが多い機器が重要機器となる。

また、抽出された故障モードは、解析対象システムの弱点であることから、対策順位の高い順に対策を施す必要がある。FMEAの結果が設計改善、運用改善、工程改善、故障診断システムの設計などに反映されることになる。

3. 空気圧制御システムにおけるFMEA

3.1 解析条件

解析対象となる代表的空気圧制御システムの構成例を図2に示す。図3には図2による信頼性ブロック図を示す。図2、図3を用いて解析を行う。

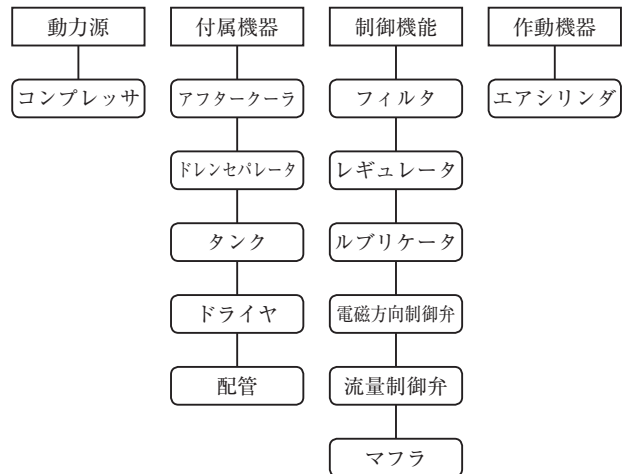


図3 信頼性ブロック図

表4 空気圧制御システムのFMEA⁽²⁾

| 空気圧機器 (コンポーネント) | 故障モード | 影響度 (方向制御弁入力またはシリンダ出力P0への影響の仕方) |
|--------------------|---------------|---|
| コンプレッサ | 電源停止 | コンプレッサが動作しないため、圧縮空気が供給されないので入力P1発生せず。 |
| | モータ故障 | |
| アフタークーラ | 容器の一部破損 | 破損箇所より、圧縮空気が漏れるので入力P1発生せず。 |
| ドレンセパレータ | ボウル部破損 | 破損箇所から圧縮空気が排出され、入力P1が発生せず。 |
| タンク | 本体破損 | 破損箇所より、圧縮空気が漏れるので入力P1発生せず。 |
| ドライヤ | 冷却器破損 | 破損箇所から圧縮空気が排出され、入力P1が発生せず。 |
| 安全弁 | 操作部のはずれ | 弁体が閉じた状態では、圧縮空気が流れず、入力P1は発生せず。 |
| | | 弁体が開いた状態で、圧縮空気が排出されており入力P1が発生する。 |
| フィルタ | フィルタエレメント目詰まり | フィルタエレメントが90%以上塵埃などで、目詰まりしたら入力P1は発生せず。 |
| レギュレータ | 調整バネ折損 | ハンドルを回しても圧力調整ができず、設定圧力値が0MPaであれば、主弁が閉じているので圧縮空気は通過できないので入力P1は発生せず。 |
| | | ハンドルを回しても圧力調整ができず、空気圧制御システムに必要な設定圧力値であれば入力P1は発生し続ける。 |
| | | ハンドルを回しても圧力調整ができず、設定圧力値が低い値であれば、入力P1は発生する。 |
| ルブリケータ | ボウル破損 | 破損箇所から潤滑油が漏れ、圧縮空気漏れによる圧力低下が発生する。 |
| マフラ | ごみ詰まり | シリンダ前側から排気される圧縮空気が排気ポートからマフラを通るときごみ詰まりにより排気できないので出力P0発生せず。 |
| 電磁方向制御弁 | ソレノイド焼損 | ソレノイドが励磁できなくスプールが動作しないため、圧縮空気の流れる方向が切換わらないので、出力P0発生せず。 |
| | バネ折損 | ソレノイドが励磁されスプールが動作した場合ばねは伸びた状態で出力P0を生じ、ソレノイドの励磁がOFFされたときスプールが自動復帰できなくなり、圧縮空気の流れる方向が切換わらないので出力P0が発生した状態で停止する。 |
| | スプール固着 | ソレノイド非励磁状態：ソレノイドが励磁されても、スプールが固着して圧縮空気の流れる方向が切換わらないので、出力P0発生せず、 ソレノイド励磁状態：ソレノイドが非励磁になっても、スプールが固着して圧縮空気の流れる方向が切換わらないので、出力P0発生し続ける。 |
| 流量制御弁 | ごみ詰まり | シリンダ前側から排気される圧縮空気が排気ポートからマフラを通るときごみ詰まりにより排気できないので出力P0発生せず。 |
| エアシリンダ | ピストン固着 | 圧縮空気がチューブ内に入っても、ピストン固着しているので出力P0発生せず。圧縮空気注入状態では出力P0は発生しつづける。 |
| | ロッドパッキン割れ | 割れ箇所から圧縮空気の漏れ、割れの大きさによっては、P0は発生するが圧縮空気の圧力、流量が不足して動作が鈍い。 |
| | チューブ破壊 | 破壊箇所から圧縮空気の漏れ、出力P0発生せず。 |

(外国文献調査例 約60例、および実施例220件)

解析の目的は図2のシリンダの出力P0への影響と方向制御弁への圧縮空気の入力P1への影響についてとする。解析のレベルはすべてのコンポーネントの故障モードとしている。

今回は表1の発生頻度、影響度の評価点表による評価レベル付けと致命度、対策、対策順位については解析の目的から必要としないので表4で表すように故障モードとP0、P1への影響のみとした。

3.2 解析結果

FMEAの解析結果である表4では出力（方向制御弁入口圧力P1）、または、アクチュエータ出力（圧力P0）への影響の仕方で表している。

全部は示さないが、13のコンポーネントにおける故障モードは220件に上り、そのうち、15件（6.8%）はシステム内部の圧力が上昇する側の故障モードで、140件（64%）はシステム内部の圧力が低下する側の故障モードであった。また、残りの65件（30%）は安全に特に関しない故障モードであることがわかった。

4. 考察

現状の空気圧制御システムにおける圧力制御は図2のレギュレータにより流体の圧力が設定値以上になった場合に内部の流体をシステム外部へ開放し、システム内の流体の圧力を強制的に低下させることでシステムの破壊などを防止する機能を持つが、この場合の危険側の故障（圧力が低下できない側の故障）が考慮されていない。また、圧力が低下する側については何も行われていない。

解析の結果から安全に関係する故障モードは圧力が上昇する側、低下する側の両方に存在することがわかった。

したがって、空気圧制御システムの安全システムの構築には圧力の上昇と低下の両方を検出する監視機能が必要であり、ISO13849-1（制御システムの安全関連部）に沿った安全関連部としての監視機能の構築が必要である。

5. 教育訓練への活用

FMEAはグループによる実施が原則であり、グループ員の経験・能力が解析の質を左右することになる。

解析を行うに当たり最も重要なことは解析対象のシステムを理解していることであるため、学生に学ばせるには解析対象のシステムの選定が重要である。

図2のような課題であれば学生は専門課程における専攻学科の油空圧制御、専攻実技の油空圧制御実習で学んでいるため、解析を行うなかで信頼性ブロック図の作成、故障モードの抽出、影響度評価を行うことにより、空気圧制御システムの全体と各種コンポーネントの構造、動作などについてコンポーネントの説明書、テキスト、教材、図面などを見て理解する必要があるため学科、実習の復習となる。

さらに、機械のメカニズムを検証することから分解・組立作業や設計・製図に必要な能力を向上させ高い効果が予想できる。

6. まとめ

空気圧制御システムで圧力上昇、下降の両側に安全に関係する故障モードが存在すること示した。

その結果、圧力上昇、下降についての監視機能が必要であり、ISO13849-1に沿った安全関連部の構築の必要性について述べた。

また、図2のような代表的空気圧制御システムを構成する機器におけるFMEA解析結果の教育訓練での活用について考察を行い、専門課程、応用課程による活用について述べた。

<参考文献>

- 1) 小野寺勝重：『実践FMEA手法』、日科技連出版社、2000
- 2) 中村・蓬原：「空気圧制御システムの論理構造とその適用」、日本信頼性学会 第19回 秋季信頼性シンポジウム発表報文集 pp73-7、2006.10.20