

工程設計における不具合の予測に関する研究

品質マネジメント研究

3606R014-2 梶原 光徳

指導教員 棟近 雅彦

A study on Predicting Potential Failures in Manufacturing Processes Design

KAJIHARA, Mitsunori

1 序論

メーカーは様々な手法を活用し、不具合の未然防止に努めているが、工程不具合が発生してしまうことが少なくない。工程不具合が発生すると、設計変更や生産品の改修などを行うこととなり、開発期間の遅延や対策費用の発生などの問題を抱えることとなる。

工程不具合の未然防止の手法として、Process Failure Mode and Effect Analysis(以下、工程 FMEA)がよく利用されている。この手法についての文献^{[1][2]}は数多く存在するが、それらには実施手順の大枠しか述べられていない。このため、工程 FMEA を実施する際に、工程不良モードの予測の漏れや曖昧さが発生し、適切な対策を行うことができず、工程不具合が発生してしまっている。

本研究は、文献の調査と不具合事例の解析を通じ、従来の工程 FMEA の具体的な問題を抽出する。そして、これらを解決するための方法論を検討し、工程 FMEA の手順を具体化する。

2 従来研究と本研究のアプローチ

2.1 従来研究

鄭ら^[1]は、効果的な FMEA 実施のために、「連想」と「階層」概念に基づいた故障モードの予測を提案している。この研究の対象は、設計 FMEA ではあるが、実施時に発生する問題点には共通性があると考えられるため、問題点を把握する際に参考にした。

2.2 本研究のアプローチと工程の捉え方

本研究では、以下のアプローチにより工程 FMEA の手順の具体化を行う。

- ① 工程設計者の一般的な工程 FMEA の実施方法を把握する(3.1 節)
- ② 工程 FMEA 実施時の問題点を把握するために工程不具合の解析を行う(3.2 節)
- ③ ①、②を通じて、不具合予測の失敗を引き起こす原因を把握する(3.3 節)
- ④ ③で把握した問題を解決する方法論を検討し、工程 FMEA の手順を具体化する(4 章)

また、本研究では図 1 のように工程を捉える。

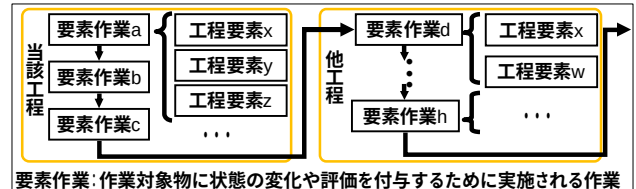


図 1 本研究における工程の捉え方

図 1 に示すように、各工程は、複数の要素作業から構成されるものとし、工程や要素作業を構成する 5M1E を工程要素とする。また、解析対象とする工程など、現在着目している工程を当該工程とし、それ以外の工程を他工程と定義する。

3 現状の工程 FMEA の問題の抽出

3.1 工程 FMEA の実施方法の把握

まず、工程設計や FMEA に関する書籍や論文、工程 FMEA の発表事例の調査と、工程 FMEA を実施している技術者へのインタビューを行った。この結果、現在の工程 FMEA は、表 1 で示したような実施方法で行っていることがわかった。

表 1 現在の工程 FMEA 実施方法

1. 設計や設計変更する工程(対象工程)や工程要素 5M1E の把握
2. 対象工程の要求特性(品質, 安全性, 生産性など)の確認
3. 対象工程における望ましくない事象(工程不良モード)の抽出
4. 不良モードによる製品・人・他工程などへの影響の把握
5. 不良モードの発生原因(関係する 5M1E やメカニズム)の把握
6. 不良モードの影響度, 発生頻度, 検知度の検討
7. 対策を打つべき不良モードを決定し, 対策案の検討
8. 副作用, コスト, 実現容易性などの観点から対策を決定
9. 試験などによる対策の効果の把握

3.2 工程不具合の解析

次に、現状の工程 FMEA で不具合を予測できず、発生を防止できなかった原因を把握するため、機械組立メーカーの工程不具合事例 24 件の不具合メカニズムと、予測漏れの原因を分析した。分析の例を示す。

事例 1: リフロー半田工程にて、基板上にある LED 内部の水分が加熱時に水蒸気となって爆発し、LED が破裂した。この LED は、長時間にわたって高湿度下で保管されていたため、吸湿してしまっていた。通常は長時間にわたる保管は行われなかったが、工場の非稼働日が連続したため、長時間にわたり保管される状態になっていた。

これは、「吸湿した部品が加熱により水蒸気爆発を起こす」ということを予測できていなかった事例である。この事例では、「長期間保管されることを予測できていない」や「基板上の部品の吸水量と水蒸気爆発の定量的関係を把握できていない」などの予測漏れの原因が考えられた。

3.3 不具合予測の失敗を引き起こす原因の把握

3.3.1 工程 FMEA 実施時の問題点

3.2 で推測した原因を KJ 法により分類し、工程 FMEA 実施時の問題点の全体像の把握を試みた。次に、3.1 の調査結果をもとに、他にも考えられる問題点を検討し、KJ 法の結果に加えた。各問題点とそれに該当する事例件数をまとめたものを表 2 に示す。なお、1 事例に複数の問題点が存在する場合は、それぞれの問題点にカウントした。

表 2 工程 FMEA 実施時の問題点

問題点	件数
I. 解析工程を取り上げない	—
i. 現在まで不具合が発生していないため、取り上げない	4
ii. 該当工程が設計する範囲外のため、取り上げない	3
II. 工程不良モード発生メカニズムに気づかない	—
i. 工程で発生する事象が後工程や製品の問題の原因となることがわからない	13
ii. 工程不良モード発生メカニズムの知識をもっていない	—
a. 設計部署全体として知識を持っていない	1
b. 個人の知識不足	3
iii. 個々の要素作業で起こる問題を把握していない	8
iv. 要素作業や工程要素の設計属性やストレスを把握していない	15
v. 工程不良モード発生メカニズムの知識を具体的に該当工程に適用しない	1
III. 発生メカニズムに気づくが、当該工程で発生しないと判断してしまう	—
i. 要素作業、5M1E の設計属性の水準とその変動範囲の見誤り	1
ii. ストレスの水準とその変動範囲の見誤り	4
iii. ストレスと設計属性の定量的関係の見誤り	4
iv. 工程不良モードの特性の程度の見誤り	2
IV. 工程不良モードの発生に気づくが、その影響の重要度を間違える	—
i. 工程不良モードによって影響を受ける工程や製品の品質、安全性、生産性上の技術特性を十分に把握していない	0
ii. 工程不良モードとその影響を受ける工程・製品の技術特性の定量的な関係の見誤り	1
V. 不具合の検知度を見誤る	—
i. 工程における検知方法を把握していない	1
ii. 検出方法の効果を見誤る	2
VI. 工程不良モードに対する有効な対策を導出できない	0
VII. 工程不良モードに実施する対策の効果や評価を確認できていない	—
i. 効果確認を行っていない	0
ii. 効果の度合いを過度にあると誤る	0
計	63

本研究では、表 2 で件数の多い以下の 3 つの問題点に注目して検討することとする。

問題点 A: 工程で発生する事象が後工程や製品の問題の原因となることがわからない (II-i)
 問題点 B: 個々の要素作業で起こる問題を把握していない (II-iii)
 問題点 C: 要素作業や工程要素の設計属性やストレスを把握していない (II-iv)

3.3.2 問題点の発生原因の把握

3.3.1 で挙げた 3 つの問題点は、事例を分析した結果、予測の中心とする故障モードの種類に原因があるため発生していると考えられた。3.1 で示したように、現在の工程 FMEA は、工程に対する故障モードであ

る工程不良モードを中心として予測をする方法である。しかし、この方法は、以下の理由により、3.3.1 で述べた問題点 A, B, C が生じやすい。

まずこの方法は、図 2 に問題点 A で示したように、工程を介して発生する不具合メカニズムの予測漏れが発生しやすい。これは、当該工程では、要素作業 c の故障モードは、問題として認識されず、後工程では、前工程に存在する原因を予測しにくいためである。

次に、工程の中心となる要素作業の故障モードに予測が偏りやすく、「移動」や「脱却」といった付随的な要素作業の故障モードを見落とす傾向がある。これが問題点 B の発生する原因である。

さらに、工程不良モードを予測しその原因を予測するため、図 2 の問題点 C で示したような、ある要素作業の故障モードや工程要素の故障モードが、他の要素作業の故障モードの発生原因となっている場合など、不具合メカニズムの原因系の部分の予測漏れが生じやすい。

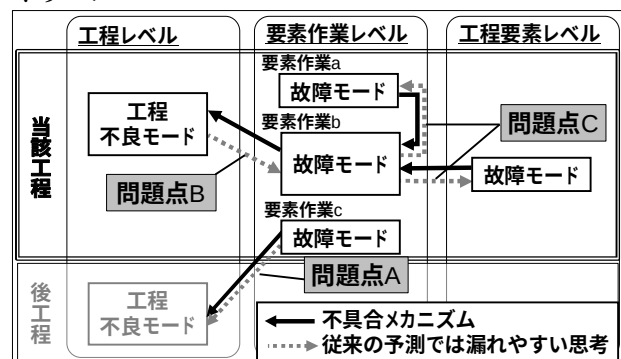


図 2 工程不良モードを中心とした予測の問題点

4 提案方法

4.1 予測すべき故障モード

3.3 を踏まえた結果、3 つの問題点を発生させないためには、要素作業における故障モードを中心に予測し、4 種類の故障モードを予測する必要があることがわかった。図 3 に本研究が提案する手法の各故障モードの関係とこれらの定義を示す。

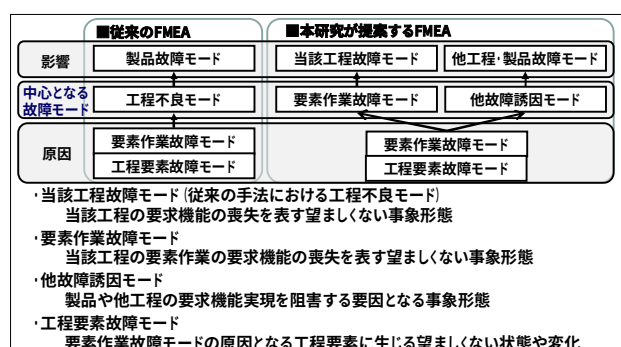


図 3 予測する故障モードとその定義

3.3の3つの問題点が、いずれも「不具合メカニズムの予測」における問題であるため、本研究では、これに対応した表1の手順3,4,5を具体化する。すなわち、図3で示した要素作業故障モード、他故障誘因モード、工程要素故障モードの予測方法についての提案を述べる。なお、当該工程故障モードと他工程・製品故障モードの予測は、工程や製品に要求されている機能の喪失を表す事象の抽出によりできるため、これらの予測方法は4.2以降で説明はしない。

4.2 要素作業故障モードの予測方法

本研究では、要素作業故障モードを予測する際に必要となる要素作業を、図4で示した田村ら^[2]が提案する要素作業モードをもとに把握する。

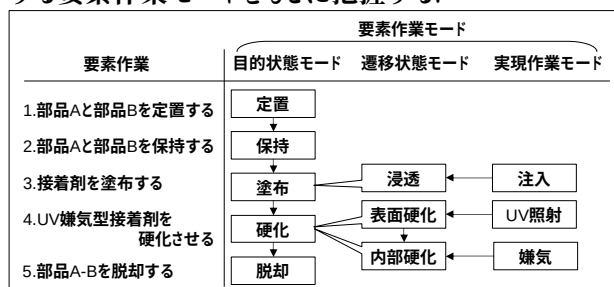


図4 要素作業モードの例(UV 接着工程)

要素作業モードは、目的状態モード、遷移状態モード、実現作業モードの3つからなる。目的状態モードとは、作業対象物の狙いとされた特性、状態の変化そのものを表す。遷移状態モードは、目的の状態に至る過程で一時的に現れる状態である。実現作業モードは、目的状態モードを実現するために実施される作業である。これらをもとに要素作業を把握することで要素作業を適切に把握できる。

本研究では、要素作業モードを利用し、以下のようない要素作業故障モードの予測方法を提案する。

- ①工程を要素作業モードまで分解する。
- ②工程要素の仕様やストレス(ワーク不良や設備異常、作業不良など)が要因となり、要素作業モードの機能未達成状態やワーク、工程要素における仕様と異なる変化が発生しないかどうか検討する。
- ③検討の結果、発生が考えられる事象が、該当工程の各故障モードの原因となりうるかを検討する。

4.3 工程要素故障モードの予測方法

工程要素故障モードは、要素作業故障モードの原因を予測するアプローチだけでなく、工程要素の属性・性質に立脚し、故障モードを予測するアプローチも必要である。そこで、本研究では以下のような工程要素故障モードの予測方法を提案する。

- ①工程を要素作業モードまで分解する。
- ②それぞれの要素作業モードに関係する工程要素を

把握する。

- ③把握した工程要素の属性や性質から、工程要素の故障モードを検討し、要素作業故障モードの原因となりうるかを検討する。
- ④③とは逆に、すでに把握している要素作業故障モードの発生原因となるような問題が、工程要素で発生しないかを検討する。

4.4 他故障誘因モードの予測方法

他故障誘因モードは、当該工程では問題とはならないため予測を行いにくい。このため、この予測には、「候補となる事象を列挙する方法」と、「列挙した事象が他工程や製品の不具合の原因となると特定する方法」を用意する必要がある。

そこで本研究では、要素作業故障モードの予測の際に抽出した事象と、表3で示す他故障誘因モードと要求特性の二元表を利用し、他故障誘因モードの候補の列挙と特定を行うことを提案する。

表3 他故障誘因モードと要求特性の二元表の例

工程	要素作業	他故障誘因モード(候補)	工程の要求特性			製品の要求特性
			ディップ半田工程	通電性	接合強度	シール性
ディップ半田	ディップ槽浸漬	高温加熱				レンズ部
接着工程	接着剤塗布	接着剤の飛散	○	接触不良		シール性低下
タッピング工程	タッピング	切り子	○			異物付着

以下のように二元表を作成し、予測を行う。

- ①4.2の②で抽出した事象を他故障誘因モードの候補として、列方向に並べていく。
- ②各工程や製品の要求特性を行方向に並べていく。
- ③各要求特性が、他故障誘因モードの候補より影響を受けないかを検討し、影響を受ける場合は故障モードを記入する。
- ④故障モードが記入された欄を左にたどり、他故障誘因モードを特定する(○をつける)。

5 検証

提案方法の有効性を検証するため、ある精密機器メーカーのカードリーダー製品のヘッド接着工程を取り上げ、工程設計時に実施された工程 FMEA と、提案方法に基づいて行った工程 FMEA を比較した。

対象に取り上げた工程は、磁気ヘッドとストッパーという部品を仮接着後、本接着し、余分な接着剤を削り取る作業を行う工程である。この工程は、既存工程の設計を参考に設計されており、ストッパーの形状が新しくなったため、工程 FMEA が実施されていた。

工程設計図、作業手順書、設計図面により工程を把握し、提案方法に基づいた不具合メカニズムの予測を行った。次に、この結果と、工程が設計された際に実施した工程 FMEA 表を比較し、提案方法により新たに抽出できた故障モードを把握した。そして、新たに抽出できた故障モードが、予測されるべきであっ

たかどうかという妥当性を技術者に確認した。提案方法により作成した工程 FMEA 表の一部を、表 4 に示す。また、提案方法により抽出した故障モードの種類と、それらの妥当性の確認結果を表 5 に示す。

表 4 において、背景色のない故障モードは、工程設計時に実施された工程 FMEA 表にも存在したものである。一方、背景色がある故障モードが、提案方法により新たに予測したものである。また、下線のある故障モードは、新たに予測したもののうち工程技術者に記載しておく必要があると判断された故障モードである。

表 5 新たに予測した故障モードの種類

新たに予測した故障モードの種類	必要と判断された数	記載されてもよいと判断された数	不要と判断された数	計
要素作業	3	3	0	6
故障モード	0	11	1	12
付随的な要素作業のもの	0	3	1	4
他の要素作業モードの原因となるもの	1	1	0	2
その他	1	3	0	4
工程要素故障モード	1	3	0	4
他故障誘因モード	1	2	0	3
当該工程故障モード・製品故障モード	6	23	2	31

表 5 で示したように、新たに予測した故障モード 31 個のうち、6 個が今回の FMEA 表に記載しておく必要があると判断された。23 個については、記載されていてもよいものであった。残りの 2 個の故障モードについては、固有技術的に今回は発生しないと回答を得た。

提案方法により予測した故障モードの種類をみると、3.3.2 で予測漏れが生じやすいと述べた「付随的な要素作業の故障モード」の予測ができており、6 件中 3 件が必要と判断された。また、「他の要素作業の故障モードの発生原因となる故障モード」も 12 件予測しており、このうち 11 件が記載されておいてよいと判断された。「工程を介して発生する不具合メカニズム」の予測、つまり、「他故障誘因モード」の予測に関しても 4 件を新たに予測し、このうち 1 件が必要と判断された。

このように提案方法による工程 FMEA は、3.3.2 で述べた予測漏れが発生しやすい 3 種類の故障モードを予測できており、予測内容の妥当性も確認できた。

6 考察

従来の工程 FMEA の思考方法は、工程不良モード

という工程全体として問題となる事象を取り上げ、その工程の構成要素に対して原因系を展開する流れが一般的であった。この点は Fault Tree Analysis(以下、FTA)に近い思考である。この方法では、当該工程故障モードに関係しないが、他工程の不具合の原因となる問題の抜けが生じやすい。また、設計変更点に対する FMEA では、変更点となる要素作業や工程要素を起点とした故障予測解析を実施するべきである。しかし、従来の工程 FMEA では、工程不良モードを基点とした原因系の展開による予測であるため、設計変更点に対する FMEA の考え方として適さない。

一方、提案方法による予測は、工程設計の対象である要素作業や工程要素を解析対象として着目し、各対象の故障モードを予測し、当該工程や他工程の影響を把握する。このため、設計対象における不備抽出の漏れが生じにくく、設計変更点の FMEA にも対応できる。また、FTA を行う際にも各要素作業レベル、工程要素レベルの解析を展開指針として持てば、原因系の展開を進めやすくなる。このため、提案内容は、FTA を実施する際にも応用できると考えられる。

7 結論と今後の課題

本研究は、文献調査と工程不具合事例の分析をもとに、工程における不具合予測の失敗を引き起こす問題点を明らかにした。そして、問題点を克服するために、各故障モードの予測方法を提案した。今後の課題は、工程 FMEA 全体の手順の具体化である。

参考文献

- [1] D.H.Stamatis(1995):Failure Mode and Effect Analysis, ASQ Quality Press.
- [2] 鈴木順二郎ら(1982):FMEA・FTA 実施法—信頼性・安全性解析と評価, 日科技連
- [3] 鄭敬勲ら(1996):”「連想」および「階層」概念の導入による効果的な故障モード予測”, 「品質」, 26[4], 84-92
- [4] 田村泰彦ら(2005):”工程設計のための不具合に関する知識の運用—工程不具合の因果連鎖に関する知識構造の構築”, 「品質」, 35[2], 95-113

表 4 提案方法により作成した工程 FMEA 表 (一部)

単位工程	要素作業	工程の機能	使用機械/治具等	工程故障モード	影響	故障モードの発生要因※
ヘッド仮接着	1.ヘッドとストッパの位置・固定 2.接着剤塗布 3.接着剤硬化 4.ヘッド組脱却	ヘッド本接着を実施するために必要な仮接着強度を確保する ヘッドとストッパの図面寸法(垂直度など)を確保する	ヘッド接着治具 ブラックCA スクレーパー スポンジ		ヘッド検知特性不良	0.ストッパ変形、バリ 1.ヘッドとストッパのセット時に位置がずれる ↳ 1.ヘッド接着治具固定力不足 ↳ 1.ヘッドが浮いた状態で固定 1.ヘッドとストッパのセット時に位置がずれる ↳ ヘッド接着治具に異物付着 ↳ スポンジでの塗布時に接着剤付着 ↳ 3.接着剤の白化現象 ↳ 2.7クレーン・クレーン過剰塗布 4.ヘッド組脱却時に強度不足で位置がずれる ↳ 3.仮接着部の硬化状態が不十分 ↳ 3.接着剤硬化の待ち時間が短い ↳ 3.接着剤の硬化遅れ
※ 「1」等の数字は、当該工程の要素作業の番号。ただし、「0」は、前工程をさす。 「↳」以降の記述は、その上行の内容の展開要因						
		故障モード : 本提案によりあたらずに予測した故障モード				
		故障モード : 予測した故障モードのうち、FMEA表に記載しておくべきと判断されたもの				
ヘッド本接着	1.接着剤塗布 2.接着剤硬化 3.ヘッド組バレット入れ	ヘッド組の固定強度を確保する	ブラックCA スポンジ	接着剤塗布物がヘッド組に付着する ↓ ヘッド検知特性不良	2.接着剤の白化現象 ↳ 1.接着剤塗布量過多 3.バレットの汚れ・接着剤塗布物がヘッド組に付着する ↳ バレットの汚れ	