

F M E A と F T A

牧野 鉄治

はじめに

FMEAは、もともと航空機の信頼性を保証する手法として、約30年前に開発された。アメリカのグラマン社はFMEAの活用によって、ジェット戦闘機の開発を効果的に実施した。FTAはミサイルの安全性を保証するためにアメリカ国防省がベル電話研究所の技術者の協力を得て開発した手法である。FTAを活用して大陸間弾道ミサイル(ICBM)ミニットマンの開発の安全性確立に大きな成果があった。このFTAは信頼性解析にも広く活用されており、JIS信頼性用語にも採用されている。以下FMEA、FTAを説明し、経営に対する応用を検討したい。

1. FMEA

1.1 FMEAの実施法

FMEAは表1に示す手順で実施する。これらの手順の中、重要な項目は、

- ① システム等の任務の確認……1項
- ② 分解レベルの決定……2項
- ③ 効果的な故障モードの選定……6項

である。FMEAはシステム、機器や工程の設計の弱点を把握して、対策を立てることが目的であるから、任務達成を妨げる要因を究明する。そのためどの部分にどのような弱点をもっているかを系統的に検討し、分析し、評価して、部品や構成

品の設計変更や工程や加工設備の改善を提案する。このために、設計されるシステムや機器あるいは工程の任務を明確に把握することが重要で、任務の把握が不十分であればFMEAの目的は達成できない。工程のFMEAはFMEAをベースとして日本で開発された手法である。いつ、誰が開発したか不明であるが、5年ほど前から機械製品や電子機器の生産工程の計画や工程設計に活用されており、最近ではかなり広く普及している。

FMEA実施において、記入用紙の様式を決めておく。記入用紙の一例を図1に示す。次に選定した故障モードがシステムや工程に与える影響を評価する方法を確立する。評価の方法には故障評点法、致命度評点法、致命度解析法などがある。

(1) 故障評点法

故障の影響の大きさを総合的に判断して格づけ

表1 FMEAの実施手順

1	FMEAを実施しようとするシステム、サブシステムの任務(構成品の機能など)を確認する。
2	FMEAを実施しようとするシステム、サブシステムなどの分解レベルを決める。
3	機能図、システム明細書などを調べて、それぞれ機能別ブロックを決める。
4	機能別ブロックからサブシステムの信頼性ブロック図を作成する。
5	ブロックごとに故障モードを列挙する。
6	列挙した故障モードを整理して、FMEAの実施に効果的な故障モードを選定する。
7	選定した故障モードごとに推定原因を列挙する。
8	FMEAの記入用紙に要約を書き入れる。
9	設計条件、致命度分類基準を参照しながらFMEAをまとめる。
10	故障等級の高いものについて、設計変更の要否などの検討を行なう。

まきの てつじ 宇宙開発事業団

システム：_____					F M E A					日付：_____
サブシステム：_____										作成者：_____
										承認者：_____
										査閲者：_____
(1) 番号	(2) 対象品目	(3) 機能	(4) 故障モード	(5) 推定原因	(6) 影響		(7) 故障検知法	(9) 故障等級	(10) 記事	
					サブシステム	システム				

図 1 FMEA記入用紙の様式

し、対応策の範囲と実施の優先度を定める基準を与える。機能的故障の影響の大きさや故障発生頻度、故障防止方法の難易などを技術的に判断し10段階法で評価したうえ、次の式で計算する。

$$C_s = \sqrt[3]{C_1 \times C_2 \times C_3 \times C_4 \times C_5} \quad (1)$$

ただし、

C_1 = 機能的な故障の重要さ

C_2 = 故障の影響を受ける範囲の大きさ

C_3 = 故障発生頻度

C_4 = 故障防止法の難易

C_5 = 新規設計の程度

(1) 式で求められた数値により表 2 から故障等級を求め、故障の影響の大きさを評価することができる。機能的な故障の重要さと故障の発生頻度だけで故障の影響の大きさを評価する場合は、次の式を用いる。

$$C_s = \sqrt{C_1 \times C_3} \quad (1)'$$

(1)'式により求められた C_s を用いて、表 2 から故障等級を求めることができる。 C_1, C_2, \dots, C_5 の値は技術判断により評価するが、過去の故障の経験を活用することと、設計者を含め実験、品質管理の担当者が協議して決めることが望ましい。

(2) 致命度評点法

故障による影響を次の式で求める。

$$C_E = F_1 \times F_2 \times F_3 \times F_4 \times F_5 \quad (2)$$

ただし、

F_1 = 故障の影響の大きさ

F_2 = システムに与える影響の範囲

表 2-(1) 評点要素と係数の関係

評点要素 i	係数 C_i
1. 機能的な故障の影響の重要さ	$C_i = 1 \sim 10$ $1 \leq i \leq 5$
2. 影響をおよぼすシステムの範囲	
3. 故障発生頻度	
4. 故障防止の可能性	
5. 新規設計の程度	

表 2-(2) C_s と故障等級の関係

故障等級	C_s
I	7 以上 ~ 10
II	4 以上 ~ 7
III	2 以上 ~ 4
IV	2 以下

F_3 = 故障の発生頻度

F_4 = 故障防止の難易

F_5 = 新規設計か否かのファクター

(2) 式の値が 1 以上であれば設計変更の要否を検討する。2 以上であれば設計変更しなければならない。(2)式の中 F_1, F_2, \dots, F_5 の値はあらかじめ定めた表から求められる。これらの値を定める場合、過去の故障および故障による被害を参照し、適正な評価をする。

(3) 致命度解析

システムや機器の運用される環境条件、組み込まれている構成品や部品の故障率などから定量的に故障の影響を評価する方法で、(3)式を用いて計算し、図 2 に示す記入用紙を用いて整理し評価する。

$$C_r = \sum_{n=1}^i (\alpha \times \beta \times K_A \times K_E \times \lambda_G \times t)_n$$

ただし、

C_r = 致命度指数

n = 構成品の致命的故障モード番号

t = 任務当りの動作時間(または回数)

K_A = 運用時の故障率補正係数

K_E = 運用時の環境条件の修正係数

致命的故障		致命度計算									
(1) 対象品目 番号	(2) モード	(3) 影響	(4) アーク源	(5) モード 比率 α	(6) 影響確率 β	(7) 運用係数 K_A	(8) 環境係数 K_E	(9) 基準故障 率 λ_G	(10) 運用時間 t	(11) 寄与率 $\alpha\beta K_A K_E$ $\lambda_G \cdot 10^6$	(12) $C_i =$ $\sum_{i=1}^{(11)}$

図2 致命度解析記入用紙

λ_G = 基準故障率(時間またはサイクル当り)
 α = λ_G のうち当該故障の占める割合
 β = 当該故障が発生した場合、致命的影響が
発生する確率

1.2 FMEAの実施例 —— 船用ディーゼルエンジンの燃料システムの例——

船用ディーゼルエンジンは一般に船底に燃料タンクをもち、燃料供給ポンプ(膜型あるいはピストン型)で燃料小出しタンクに燃料を圧送し、重力で燃料噴射ポンプに燃料を供給する。燃料供給ポンプで直接に燃料噴射ポンプに燃料を供給するものもある。4サイクルディーゼルエンジンの燃料システムのFMEAを示す。図3にディーゼル

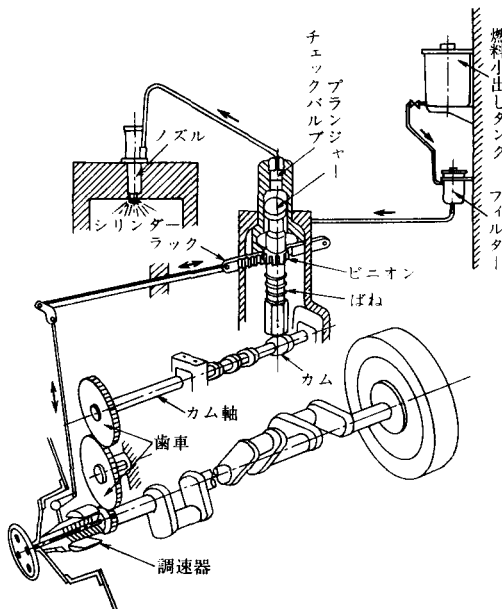


図3 ディーゼルエンジン燃料システム機能説明図

エンジンの機能説明図を示す。
表1に示した手順でFMEAを実施する。

(1) 任務

所要の燃料を与えられた時間間隔(クランク軸が2回転する間に1回)の所定の時間内にシリンダー内の燃焼室に噴射すること。

(2) 分解レベル

原則として組立品レベル

(3) 機能ブロック

次の5つの機能に分けることができる。

- ① 燃料供給機能
- ② 燃料圧送機能
- ③ 燃料噴射機能
- ④ 燃料噴射ポンプ駆動機能
- ⑤ 調速機能

(4) 信頼性ブロック図

図4にディーゼルエンジン燃料システムの信頼性ブロック図を示す。

(5) 故障モードの列挙

約80の故障モードが考えられる。全部の表示は省略する。

(6) 効果的な故障モードの選定

表3に示す故障モードについて、FMEAを実施する。

(7) 推定原因

一般に推定原因だけを表にすることは稀である。表3に推定原因を示す。

(8) FMEA記入用紙に記入して、FMEAチャート作成

表4に示すようなFMEAチャートが完成される。このFMEAチャートは故障評点法により故障等級を決めた例であり、故障等級IおよびIIの故障モードのみ記入し、故障等級IIIあるいはIVのものは省略した。

(9) FMEAのまとめ

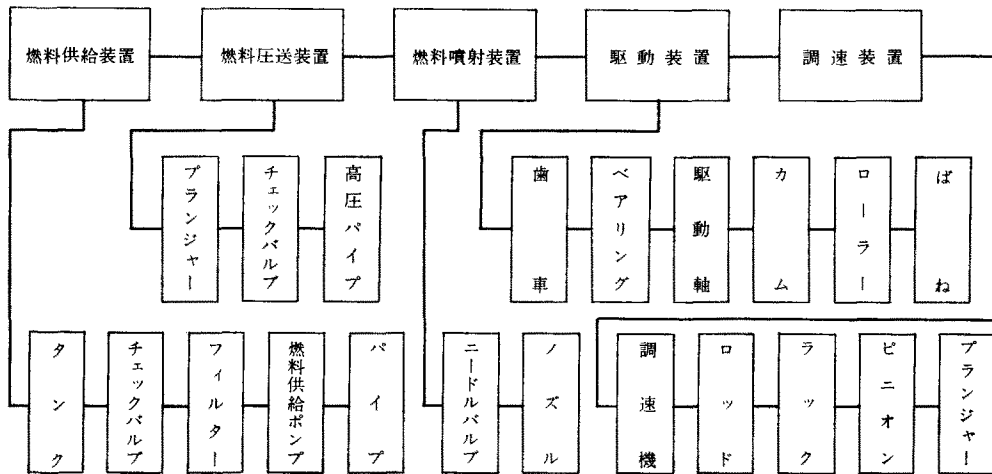


図 4 ディーゼルエンジン燃料システムの信頼性ブロック図

故障等級 I のものを致命品目表にまとめて表 5 に示す。FMEAチャートは表 5 に示すとおりディーゼルエンジン燃料システムの FMEAチャートの一部を示したが、致命品目表は故障等級 I のものをすべて集めた。

(10) 設計変更の検討

パイプの接手は破損の他に「燃料の洩れ」もあり、ユーザーのクレームが比較的多いので設計変更を提案した。また表 4 に示す故障モードの多くがコンタミネーションに起因することが判明したので、フィルターを 1 個追加することを表 6 のと

おり提案した。

2. FTA

2.1 FTAの実施法

FTAは表 7 の手順で実施する。

この手順の中、最も重要な事項はトップ事象の選定である。トップ事象の選定の標準を定めることは困難であるが、一般的にシステムや機器は 2 つのトップ事象を選定して FT 図を作成し、解析する必要がある。

〔例 1〕 ドア

表 3 故障モード・推定原因一覧表

構成部品	故障モード	推定原因	構成部品	故障モード	推定原因
燃料供給装置	1. タンク洩れ	クラック 材料欠陥 溶接不良	燃料圧送装置	1. プランジャー洩れ	クリアランス過大 表面あらさ粗大 組立不良
	2. 燃料に不純物混入	安全性の欠陥 材料選定ミス 燃料の仕様不適格		2. クリアランス過大	潤滑方法不良 材質不良 加工不良 組立の欠陥 保全不良
	3. チェックバルブ洩れ	パッキング不良 コンタミネーション 加工不良 組立不良		3. プランジャーステイクション	コンタミネーション 材質不良 組立の欠陥
	4. チェックバルブ閉じず(open)	コンタミネーション 加工不良 バルブシート表面に傷	燃料噴射装置	1. ニードルバルブ固着(close)	コンタミネーション かじり現象
	5. チェックバルブ開かず(close)	コンタミネーション 加工不良 バルブとシート間かじり現象		2. ニードルバルブ動作不良	表面あらさ不適切 コンタミネーション

表 4 ディーゼルエンジン燃料システムのFMEAチャート

番号	構成品	品名	故障モード	推定原因	影響		故障等級	備考
					燃料システム	エンジン		
1.0	燃料供給装置	1.1 タンク	1. 洩れ	1)クラック 2)材料欠陥 3)溶接不良	機能不全	・運転時間短縮 ・火災の可能性	II	
			2. 不純物混入	1)保全の欠陥 2)材料選定ミス	同上	運転上問題あり	II	
		1.2 チェックバルブ	1. 洩れ	1)パッキング不良 2)コンタミネーション 3)加工不良 4)組立不良	同上	・運転時間短縮 ・火災の可能性	II	
			2. 動作不能 (閉じず)	1)コンタミネーション 2)バルブシート表面に傷 3)加工不良	機能せず	停止時間問題あり	III	
			3. 動作不能 (開かず)	1)コンタミネーション 2)バルブとシート間かじり現象 3)加工不良	同上	運転不能	I	
		2.0	燃料圧送装置	2.1 ブランジャー	1. 洩れ	1)すきま過大 2)表面あらさ粗大 3)組立不良	機能不全	運転に支障あり
2. クリアランス過大	1)保全の欠陥 2)加工不良 3)材質不良 4)組立欠陥 5)保全不良				同上	同上	II	
3. スティックション	1)コンタミネーション 2)組立の欠陥 3)すき間過小				機能せず	運転不能	I	

- ・ドアが開かない。
 - ・開いたドアが閉じない。
- [例2] ミサイル
- ・ボタンを押してもミサイルが発射しない。

- ・ボタンを押さないのにミサイルが発射された。
- またトップ事象に取り上げてはならない事象もあるので注意を要す。

表 5 ディーゼルエンジン燃料システムの致命的品目表

番号	品名	故障モード	影響	故障等級	備考
1.2	チェックバルブ	動作不能 (開かず)	エンジン運転不能	I	
1.4	燃料ポンプ	膜に欠陥	同上	I	
		膜の動作不能	同上	I	
1.5	パイプ	接手破損	同上	I	
2.1	ブランジャー	スティクション	同上	I	
2.2	チェックバルブ	開かず	同上	I	

[例3] ガソリンエンジン

表 6 設計変更提案の1項目

番号	項目	関連する品名	理由
1	フィルターを1個追加	燃料供給機能 チェックバルブ 燃料圧送機能 ブランジャー チェックバルブ 燃料噴射バルブ ニードルバルブ	コンタミネーションによる致命的欠陥が多いから

表 7 FTAの実施手順

1	解析の対象となるシステムの構成・機能・作動を理解し把握する。
2	システムについてのトップ事象を選定する。
3	手順2で定められた事象につながる第1次要因(サブシステムレベル)を列挙し、それらに関連する外部要因も吟味する。
4	手順3で得られた要因と事象との因果関係を論理記号を用いて結びつける。
5	手順3および4を繰り返して、構成レベルまたは部品レベルと展開し、もうこれ以上分解できないレベルまで続けFT図を描く。
6	描かれたFT図を見直し、必要な整理を行なう。
7	FT図の末端の各要因に発生確率を割り付ける。
8	論理記号にしたがってトップ事象の発生確率を計算する。
9	各要因の上位レベルへの影響のきびしさを評価し、効果的な改善対策を検討する。

(注) 発生確率のデータが得られない場合は、手順7, 8は省略してもよい。

- ・エンジンが始動しない。
 - ・エンジンが所定の出力を発揮しない。
 - ・エンジンがユーザーの満足を得られない。
- この3番目の事象はトップ事象にならない。

FTAを実施する場合表8に示す事象とゲートを組合わせてFT図を作成する。これらの中で否展開事象は、展開を保留したままで解析を終了せず、情報が得られて展開が可能になった時FT図を追加して解析結果を再検討する。

2.2 FTAの実施例

2.2.1 FTAの簡単な例

引出しのFTAを説明する。タンスの引出し、机の引出し、スチールロッカーの引出しなど種々の引出しがある。ここでは机の引出しのFTAを実施する。

(1) トップ事象

引出しが開かない。引出しが閉らない。この2つのトップ事象の中“引出しが開かない”をトップ事象としてFTAを実施する。

(2) FT図

図5に示すようなFT図が得られる。

(3) FTAのまとめ

“引出しが開かない”をトップ事象としたFT図から、

表 8 FTAに用いられる記号(基本的なもの)

No.	記号	名称
1		事象 event
2		基本事象 basic event
3		否展開事象 undeveloped event
4		ANDゲート “AND” gate
5		ORゲート “OR” gate
6		制約ゲート “INHIBIT” gate

- ① 引出しの構造不良
- ② 引出しを開けるための力不足
- ③ 中の品物が引っかかる

の3つの1次要因があり、FT図が作成された。非常に簡単な事象についてFTAを行なったが、FT図から不具合を修正すれば効果が大きいことがわかる。

2.2.2 動力芝刈機のエンジンのFTA

芝刈機の空冷2サイクルエンジンのFTAを実施する。ガソリンエンジンで出力3馬力であり、燃料はガソリンとオイルの混合燃料である。エンジンの上に燃料タンクがあり、重力でキャブレターに燃料が供給される。

(1) トップ事象

“エンジンが始動しない”をトップ事象とする。

(2) FT図の作成

1次要因は燃料不足、圧縮不足、スパークなし

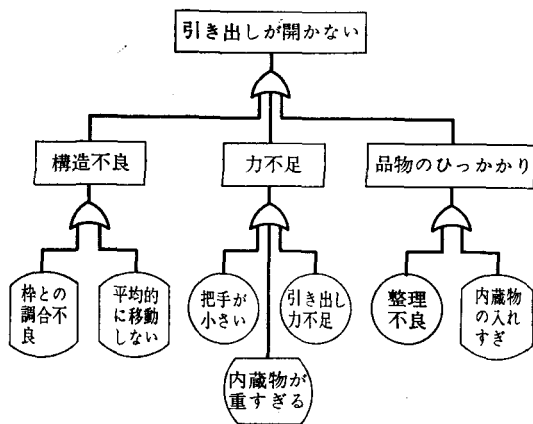


図5 引出しのFT図

の3つの事象が取り上げられる。2次要因、3次要因を順次ゲートで結合すれば図6に示すFT図が作成できる。

(3) FTAのまとめ

それぞれの事象の発生確率を割り付け、トップ事象の発生確立を計算すれば図6に示すとおりになる。また3つの1次要因中、電装品の故障による「スパークなし」が故障の50%以上を占めることが明らかとなった。

3. FMEA, FTAの経営に対する応用

3.1 FMEAの応用例

会社の新製品開発能力のFMEAを実施する。

(1) 任務：社会のニーズに合った新製品を開発する。

(2) 分解レベル：機能レベルに分解する。会社組織を基本とし、新製品開発のために果たす機能を整理する。

(3) FMEAチャート：手順

(3)~手順(7)はFMEAの手順どおりであるから省略する。

表9に新製品開発能力のFMEAチャートを示す。このFMEAチャートには不良モードに対する対策を示した。

3.2 FTAの応用例

製品の販売に際して販売金額が減少し、会社は重大な岐路に立った。対策を検討するため「販売額減少」をトップ事象としたFTAを実施した。

(1) トップ事象

販売額減少

(2) 1次要因

「販売能力低下」「製品の生産量減少」「原価高」「製品がユーザーの好みに合致しない」を1次要因として取り上げる。

(3) FT図の作成

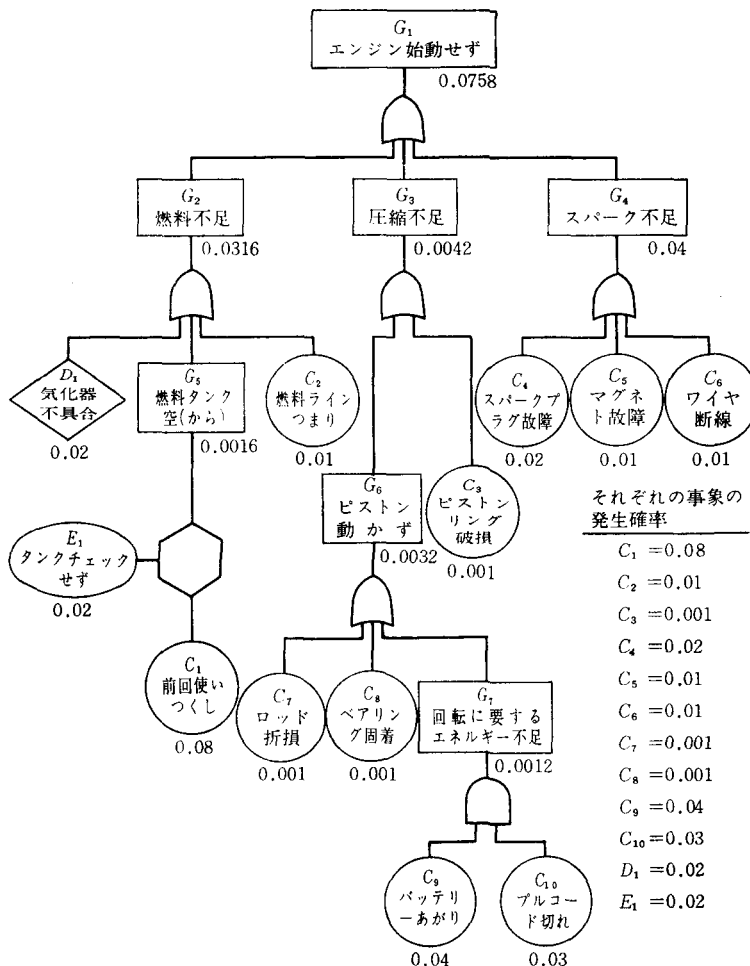


図6 動力芝刈機エンジンのFT図

表 9 新製品開発能力のFMEAチャート

番号	機能	不良モード	影響		等級	対策
			新製品	会社		
1.0	市場調査機能	ユーザーのニーズ調査不十分	開発方針に影響	非常に大	I	特別チーム編成
		同業他社製品の調査不足	支障あり	影響あり	II	
		需要予測の誤り	支障あり	製造販売に影響大	I	特別チームで処理
2.0	技術開発機能	技術者の質, 経験など能力不足	支障あり	影響大	I	長期方針で能力向上を計る
		プロジェクトの責任者の質が劣る	影響大	非常に大	I	社内社外から人材を求める
		特許競争力不足	影響大	特許を購入	I	長期方針で対処
		コンピュータ活用不足	支障あり	影響あり	II	
	試験機能	試験設備不十分	支障あり	影響あり	II	

り検討することができる。

アメリカの文献には、コンサルタント会社に経営上の問題をFTAを活用して解析させた例がある。現在はFMEAやFTAをオペレーションズ・リサーチに活用した例は少ないが、今後増加することが期待される。

参考文献

- 1) 日本ロケット開発協議会：「宇宙開発におけるFMECA」, 1971
- 2) 井上威恭：「FTA安全工学」, 日刊工業新聞社, 1979
- 3) 牧野鉄治：信頼性管理入門(4)；FMEA, 「油圧と空気圧」Vol.11, No.5, 1980
- 4) 牧野鉄治：信頼性管理入門(5)；FTA, 「油圧と空気圧」Vol.11, No.6, 1980
- 5) 鈴木, 牧野, 石坂：「FMEA・FTA実施法」日科技連出版社, 1982

FTAの手順にしたがって2次要因まで取り上げてFT図を作成すると図7のとおりになる。実際の場合にはこれら2次要因中間題となる項目を取り上げ、詳細なFT図を作成する。

おわりに

FMEA, FTAは信頼性保証に活用されている手法である。その特徴は思考の過程を表や図にあらわし、検討できることである。このため設計の弱点の解明や故障発生メカニズムを視覚によ

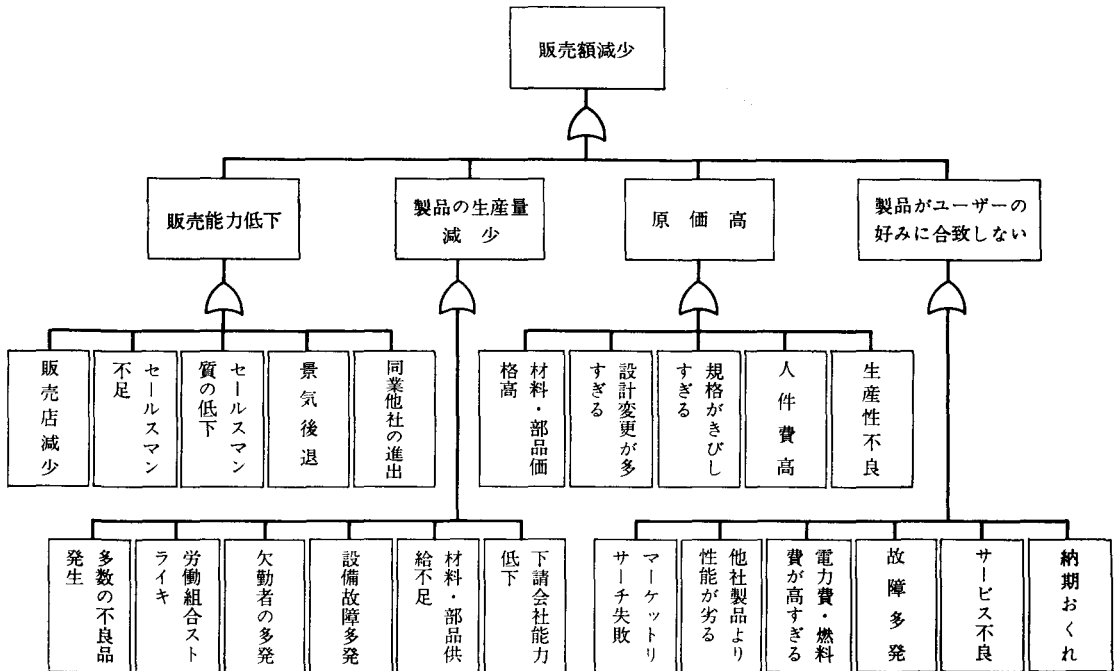


図 7 販売における「販売額減少」をトップ事象としたFT図