

Fault Tree Analysisを用いた高信頼性設計

およびその知識マネジメント

-Fault Tree Analysis 支援システム開発

と自動車部品開発における効果検証-

平岡 洋二

2013年2月

目 次

	ページ
図の説明	4
第1章 序 論	
1. 1 論文の趣旨と構成	7
1. 1. 1 論文の趣旨	7
1. 1. 2 論文の構成	8
1. 2 製品設計と Fault Tree Analysis	9
1. 2. 1 産業界での製品設計と課題	11
1. 2. 2 安全, 安心が要求される製品設計	11
1. 2. 3 製品設計と設計知識マネジメント	13
1. 2. 4 製品設計における FTA	15
1. 3 設計知識マネジメントの従来研究と問題点	17
1. 4 論文の目的と研究課題	24
第2章 企業における FTA を用いた製品開発の現状と課題	
2. 1 実際の製品設計と FTA の現状	26
2. 2 FTA を用いた品質問題の現状と課題	28
2. 3 設計における FTA の効果検討	30
2. 3. 1 Fault Tree 図 (以下、FT 図と略す) の必要条件	30
2. 3. 2 オイルポンプ設計事例とその FT 図の有効性	32
2. 3. 3 油圧系システム設計事例とその FT 図の有効性	35
2. 4 企業における FTA の改善活動の効果と課題	38
2. 4. 1 FTA の改善活動の背景と概要	38
2. 4. 2 FTA の改善活動内容	39
2. 4. 3 FTA の改善活動の効果と課題	42
2. 5 設計における FTA の効果と課題	43
2. 5. 1 設計における FTA の効果と問題点	43
2. 5. 2 設計者における FT 図作成の問題点	45
2. 5. 3 設計における FTA の課題定	47

第3章 FTA 支援システムの提案	
3. 1 FT 図作成支援手法の提案	50
3. 1. 1 FT 図の分類定義	50
3. 1. 2 物理量次元インデクシングによる FT 図作成支援方法	53
3. 1. 3 システム系故障の FT 図作成支援方法	58
3. 1. 4 制御系故障の FT 図作成支援方法	59
3. 2 FTA 支援システム構成の設計	59
3. 2. 1 システム要求と目標値	59
3. 2. 2 FTA 支援システム構成	62
3. 3 故障現象と FTA 支援システム	72
3. 4 FTA 支援システムの開発	76
3. 4. 1 研究体制と開発マネジメント	76
3. 4. 2 FTA 支援システムのソフトウェア開発	77
第4章 企業の設計活動での FTA 支援システムの検証	
4. 1 FTA 支援システムの考察	79
4. 2 FTA 支援システムの検証方法	80
4. 3 物理量次元インデクシングによる支援の検証と解析	81
4. 4 ブロック図による支援の検証と解析	87
4. 5 妥当性検証と効果解析	89
4. 6 FTA 支援システム検証まとめ	96
第5章 結 論	97
第6章 研究課題と今後の発展性	99
6. 1 研究課題	100
6. 2 今後の発展性	101
謝辞	103
参考文献	104
出願特許	108
付録	109

【図、表の説明】

第1章

- 図 1・1 世界の自動車販売台数実績と予測
- 図 1・2 ISO26262 における安全ライフサイクル
- 図 1.3 FTA を用いた設計開発プロセス [大城, 1996]
- 図 1.4 設計知識の体系図
- 図 1・5 TRIZ の体系的構造 [中村, 2003]
- 図 1・6 ストレス・ストレングス モデル (SSM) [田村, 2002]
- 表 1・1 物理量と物理量次元の事例 [村上, 2006]

第2章

- 図 2・1 設計のアウトプット
- 図 2・2 FTA を用いた設計開発プロセス [大城, 1996]
- 図 2・3 MECE (Mutually Exclusive and Collectively Exhaustive) 構造
- 図 2・4 MECE 概念
- 図 2・5 オイルポンプの概略図
- 図 2・6 オイルポンプギヤ焼けの FT 図
- 図 2・7 CVT (無段変速機、以下 CVT と略す) 油圧システムの概略図
- 図 2・8 CVT 油圧系ブロック図
- 図 2・9 CVT 油圧系の FT 図
- 図 2・10 FTA レベルの現状把握
- 表 2・1 FTA スキルランクとランク取得講座の関係
- 図 2・11 FTA の改善活動による効果
- 図 2・12 人間の思考モデル [畑村, 2000]
- 図 2・13 実務での FT 図の事例

第3章

- 図 3・1 故障による FT 図の分類
- 図 3・2 故障による FT 図の分類事例
- 図 3・3 FT 図の支援手法の概略図
- 図 3・4 FT 図の事例
- 図 3・5 FT 図の支援手法プロセス
- 図 3・6 ブロック図
- 図 3・7 図 3・6 のブロック図からの FT 図
- 図 3・8 実際の設計における FT 図作成手順
- 図 3・9 FTA 支援システムの動作

- 図 3・10 FTA 支援システムの Excel 事例
- 図 3・11 FTA 支援システムにおける編集
- 表 3・1 FT 図の XML タグ
- 表 3・2 物理量次元インデクシングの XML タグ
- 図 3・12 物理量次元インデクシングを用いた FT 図
- 図 3・13 FTA 支援システムにおける整合性検証の表示方法〔古川, 2011〕
- 図 3・14 物理量次元インデックスのリスト事例
- 図 3・15 ブロック図から FT 図変換
- 図 3・16 破損の FT 図事例
- 図 3・17 摩耗の FT 図事例
- 図 3・18 温度が高いの FT 図事例
- 表 3.3 故障現象と FTAid 支援機能の対応
- 図 3.19 FT 図作成プロセス

第 4 章

- 表 4・1 検証に使用した FT 図
- 図 4・1 FTA 支援システムによる整合性検証判定結果
- 図 4・2 FTA 支援システムによる効果確認事例 1
- 図 4・3 FTA 支援システムによる効果確認事例 2
- 図 4・4 システム:NG、FTA の指導者:OK とした事例
- 図 4・5 物理量次元が付加できない事例 (ハード系)
- 図 4・6 物理量次元が付加できない事例 (制御系)
- 図 4・7 システム系故障のブロック図
- 図 4・8 ソフトウェアが作成した FT 図
- 図 4・9 設計者が作成した FT 図
- 図 4・10 実際の設計業務における FTA 支援システムの効果確認
- 図 4・11 FT 図評価点と作成時間の要因分析
- 図 4・12 FT 図作成時間とスキルランクの関係
- 図 4・13 FT 図評価点とスキルランクの関係
- 図 4・14 FTA 支援システム使用による FT 図事例 1
- 図 4・15 FTA 支援システム使用による FT 図事例 2
- 図 4・16 FTA 支援システム使用による FT 図事例 3

第 6 章

- 図 6・1 システム検証での FTA 活用研究
- 図 6・2 CVT の物理モデルシミュレーション

第 1 章 序 論

1. 1 論文の趣旨と構成

1. 1. 1 論文の趣旨

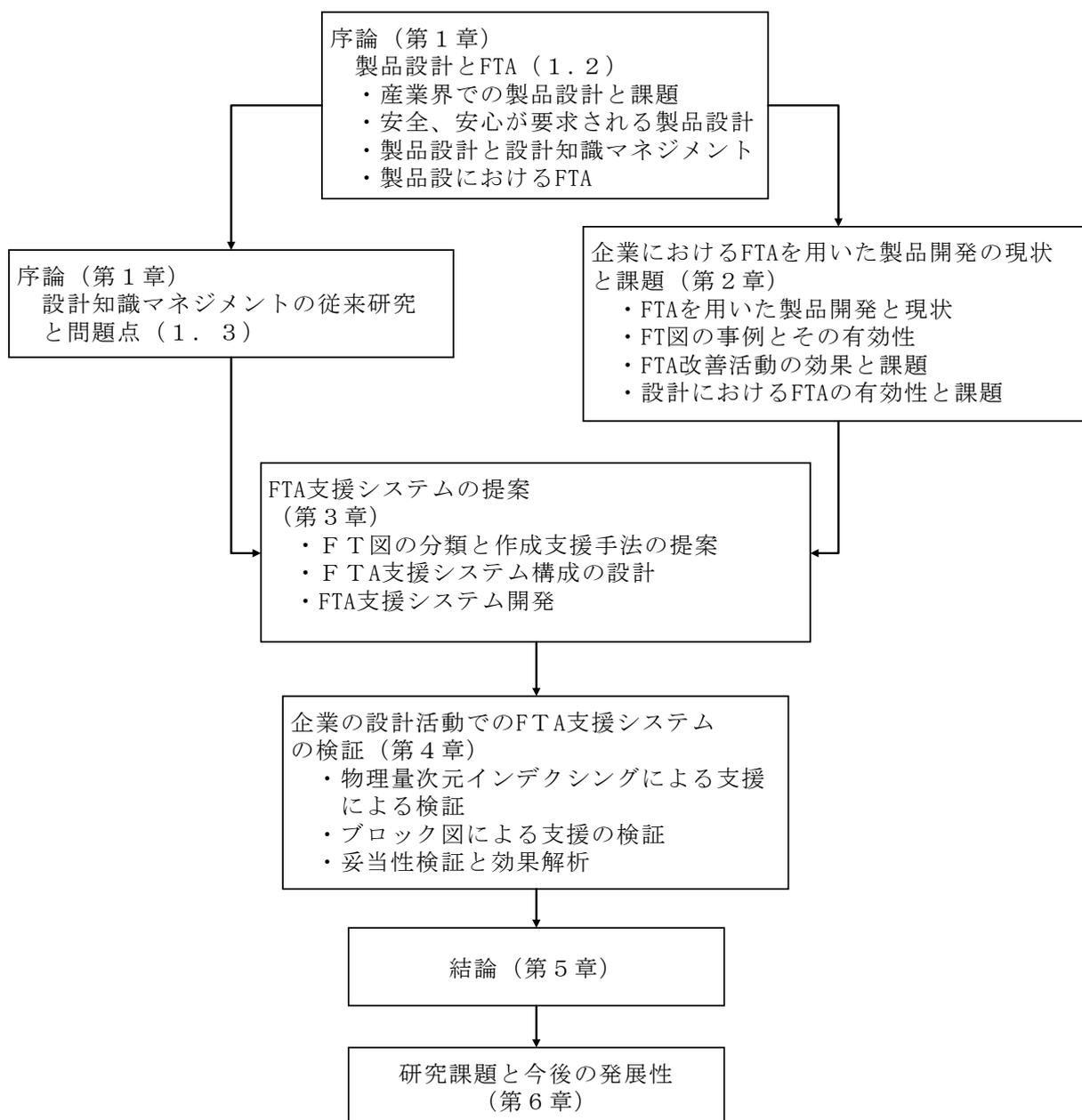
本論文の作成の趣旨を示す。

本論文は、品質向上、機能向上、コスト削減、及びグローバル化の相反する課題に取り組んでいる日本の製造業にあつて、製品の競争力を維持、向上するための解決すべき主要課題のひとつが、製品設計の有効な知識マネジメントによる効率化であることを示し、その課題解決を扱ったものである。

作成の趣旨は、設計の知識マネジメントの多くの研究がされているが、製品設計の現状や要望に応えられるものではないため、先行研究の調査、分析及び実際の設計活動での検討から、有効な設計知識体系の構築を情報技術によって実現することにある。さらに、企業における設計活動の知識体系を構築することによって、実際の設計活動の効率化ができるシステムを提案し、その検証を行うことで研究課題を明確にすることである。

1. 1. 2 論文の構成

本論文の構成をフローにて示す。

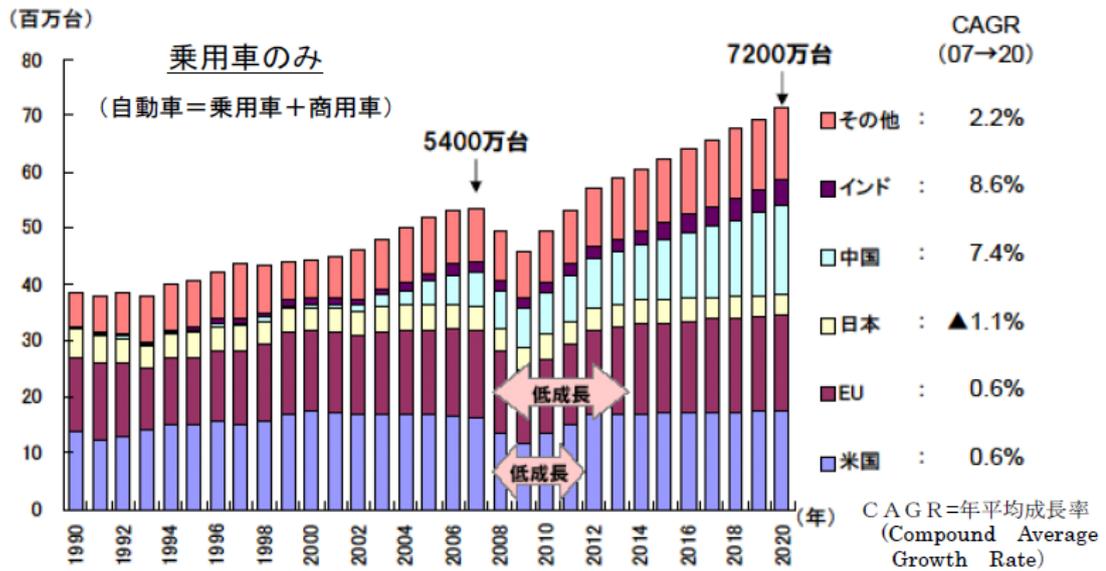


1. 2 製品設計と Fault Tree Analysis

1. 2. 1 日本製造業における製品設計の課題

日本の製造業、特に家電、パーソナルコンピュータ（以下、PC と略す）、自動車など大量生産品の製造事業では、リーマンショック以降の世界経済状況、消費者動向の変化に伴い、製品戦略、生産体制を変えざるを得なくなっている。現在、マーケットの主要需要が欧米中心からアジア、中国へ移行しており、日本の製造業は戦略の転換を余儀なくされている。さらに、競争相手である韓国、インド、中国などの追い上げが厳しく、製造業のアウトプットである製品は、消費者にとって、他社よりも性能、品質が良く、安全性が高く、さらに価格が安いことが求められる。日本製造業にとって、グローバルな環境での戦略転換からも、魅力ある製品を生み出す開発部門、生産部門に対する期待は、さらに大きくなっている。

自動車産業でも、ここ数年の間で米国、日本から中国、アジアへ自動車の主要需要の地域が大きくシフトしており、この傾向は拡大すると予測されている（図 1・1 参照）。また、韓国の現代、インドのタタ自動車などのコンペティターの脅威もあり、競争は厳しさを増しており、車両の仕様、価格を販売地域に適合した車両開発、生産が急務の課題となっている。例えば、中東、南米、中国の道路では、高速道路の整備が大幅に行われ、欧州のアウトバーンに匹敵するように高速走行の平均車速が高くなっており、各地域での販売車両の仕様変更の検討が必要となっている。また、部品の設計仕様も販売地域に適合させることだけでなく、現地での価格適正の要請、為替問題からも、開発拠点、生産拠点の現地化、グローバル化がさらに進行している。自動車産業界の各社ではグローバル化の波を受けて、当たり前品質を備えた魅力ある製品の開発、生産の海外対応に努力しており、生き残りを賭けた戦いを行っている。従来、基幹部品や新システムは、日本での集約的な開発、生産が当たり前であったが、前述のようにグローバルな開発、生産ができる体制、整備が急務である。これは日本だけで製品の開発、生産を行う技術開発から、グローバルに技術知識を、言語的、地域的、時間的、さらには論理的にも共有ができるマネジメントが要求される時代となったことを意味している。



(資料)野村総合研究所 NRIメディアフォーラム(09年2月)資料「2010年以降の自動車業界」

図 1・1 世界の自動車販売台数実績と予測

日本の製造業では、QCサークルなどの現場の品質造り込み活動を中心に、製品の品質改善を行ってきた。これが日本の競争力の源と言われてきたが、製品に要求される開発や生産のグローバル化のもとでは、生産現場による品質改善努力だけでなく、製品設計の品質すなわち‘何をどのように作るのか’が問われる。ここでの製品設計の品質とは、結果としての設計のアウトプットである設計図（仕様図も含む）の質を意味する。ものづくりでは、競争力のある製品を生み出すもととなるものが設計図であり、生産はその設計図に従った製品を効率的に、安定的に生産することが求められる。その設計図は、抜けなく、想定外もないように以下のことを満たす必要がある。

- ・ ユーザ（または顧客）が要求する機能、条件を満足たす
- ・ どこでも（グローバルに）製造が可能である（工程能力の確保を含む）
- ・ コストの目標を達成できる

要求条件を満たした設計図を生み出す設計行為を、高信頼性設計という。

一方で、昨今の製品に要求される機能、性能は多岐に渡るため、製品設計には電子制御、情報技術にを用いた複雑なシステム化が進行している。したがって、設計部門は機械設計、電子制御設計、ソフトウェア設計などの多くの機能部署をもった組織の運営が必要となっており、高信頼性設計を実現するためには、下記の設計のマネジメント課題がある。

- ①. 設計をどのような順番で検討し、設計間でどのようにすり合わせるか
- ②. 設計情報を担当部署間でどのように正確に伝達するか
- ③. 設計に有効な過去の知識をどのように蓄積し、伝えるか
- ④. 設計のアウトプットを誰が、どのように決定するか

したがって、製品設計のアウトプットである設計図を作成する高信頼性設計のためには、上述の①～④の課題を解決した設計部署の製品設計のプロセスおよびその知識の体系化が必要であり、どの製造業においても経営課題のひとつであると考えている。

1. 2. 2 安全、安心が要求される製品設計

現在、日本、および海外でも、安全、安心な製品（家電、自動車、原子力発電など）が大きな関心事となっている。PC電池の発火、ハイブリッド乗用車の不具合、及び原子力発電の放射性物質の放出などの問題から、安全、安心な製品に関する消費者の関心が高い。製品が安全であるということは、‘人への危害がない許容できる状態’と安全規格（ISO/IEC ガイド 51）で、定義されている。このため、従来はフェールセーフ、冗長系設計などが多く提案、採用され、自動車、航空機などの輸送機器、発電プラントでは基本設計のひとつとなってきた。しかしながら、昨今の電子制御システムの高度化、及び複雑化に伴い、局所的な領域のフェールセーフだけではなく、システム全体としての安全設計、製造が問われている。

自動車でも機能安全の国際規格である ISO26262 が 2011 年 11 月に発効され、自動車用電子機器による制御システムに対する設計、検証、及びその組織までも規定している。現在、自動車の車両メーカーだけでなく、部品サプライヤー各社が規格適応に向けた努力を行っている。本規格は、航空機、原子力で用いている ISO/IEC ガイド 51 の安全思想を基本に、自動車用の電気・電子システム故障時の安全確保を目的とした安全設計の‘State of the Arts’である。この中では、潜在的な危険分析（ハザードリスク分析）による徹底的な安全分析によって、不安全事象に対するリスク評価を行い、危険事象ごとにリスクランク（ASIL：Automotive Safety Integrity Level と呼ぶ）を設定する。そのリスク評価結果から、ASIL に従った冗長系対応、設計方法、及びプロセスを規定している。さらに、設計をコンセプト設計、システム設計、ハード設計、及びソフトウェア設計に分類し、ASIL に従った設計検討結果のトレーサビリティ、及びその結果の監査を要求している（図 1・2）。ここでの設計検討には、従

来の信頼性工学の手法による徹底的なシステム分析結果である Fault Tree Analysis (以下、FTA と略す)、Failure Mode and Effect Analysis (以下、FMEA と略す) とその結果の精査が、システム全体として要求される。現在、筆者は社内で ISO26262 適応担当をしているが、車両メーカー及び関係部品メーカーの製品設計の作業的、能力的な負荷が大きくなると予測している。自動車用電気・電子システムの安全性を確保するためには、必要な技術プロセスであるが、製品設計にはグローバルな競争戦略の中で、このようなプロセス改善は大きな負担となる。したがって、この新しい規格に適合した安全な設計を行うためにも、効率的な開発が可能となる FTA、FMEA の有効なシステム分析における設計知識マネジメント構築が必要と考えている。

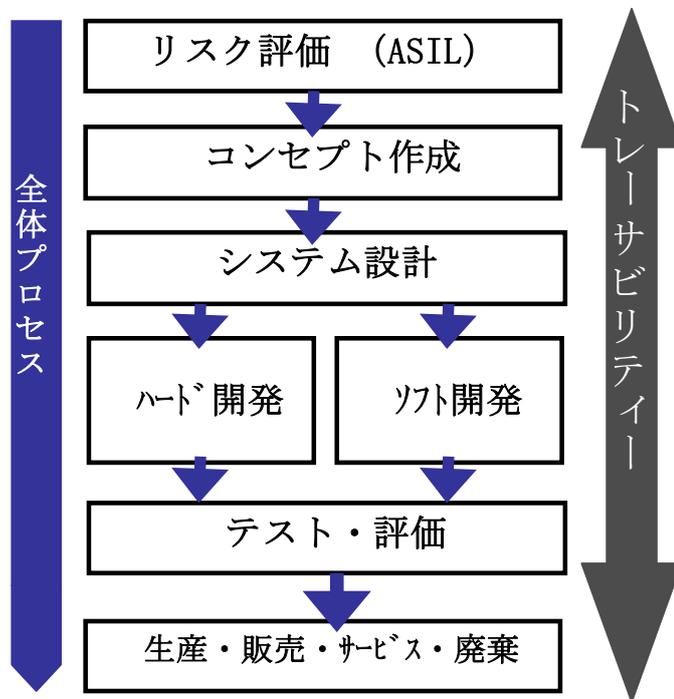


図 1・2 ISO26262 における安全ライフサイクル

1. 2. 3 製品設計と設計知識マネジメント

設計とは、制約条件（コスト、レイアウト、重量、製造）のもと、要求機能を満たすような設計解を求める作業であると定義されている。多くの学者が、設計という行為を理論的、工学的に説明している。吉川らは一般設計学論で、機能による設計を提唱した〔吉川, 1979〕。ナイジェル・クロスは設計者の設計行為を観察し、それを手順化してエンジニアリングデザインにまとめた〔Cross, 2008〕。Nam P Suh は公理的設計を提唱し、この設計検討を数学的な写像と捕らえて、ロバスト設計のプロセスを理論化した〔Suh, 2001〕。さらには、石井らは企業との共同研究から Design for X (D f X) を提唱し、設計の目的と価値作りのプロセスを提唱している〔石井, 2008〕。しかしながら、数多くの設計手法の理論があるが、企業における製品設計は秘匿性が高く、企業独自の設計プロセスもあり、公開されることが少ないため、企業がこれらの設計理論を使用しているかは不明である。これらの設計理論は理論的に正しいが、個々の企業での使用を想定していないこと、設計手法が難解であること、及び企業側の理解も乏しいことから、使われていないと推定している。

一方で、企業では TQC (Total Quality Control) などの全社活動や ISO9000、TS16949 などの国際規格で、製品設計に課せられる品質管理プロセスはあるが、製品設計における効率的、有効性のある共通プロセスや設計手法は未だなく、各社の設計プロセスが独自の進化を遂げていると考えている。このように、設計に関する理論的研究、国際規格は数多くあるが、設計現場では未だに試行錯誤の設計検討、解析を行っており、設計における検討作業は日々増加しているのが現状である。その中で、製品設計の負荷を軽減させ、効率的な開発を行うためにも、設計プロセスの構築、有益な設計知識、情報の伝達、及び設計者の育成が不可欠である。製品の品質を確保した設計仕様を決定する高信頼性設計のためにも、企業における設計の基準、知識、及びノウハウを各設計者に正確に伝えることが必要であり、同時に製品開発の経験で獲得したノウハウの知識化、及びその知識の蓄積が重要である。この有益な設計知識、情報の伝達、蓄積、及び運用は、設計知識の企業内の主要なマネジメント課題であり、これが企業における製品設計の競争力と言っても過言ではない〔野中, 1996〕。設計における知識、伝達、蓄積及びその組織内での運用は、設計知識マネジメントと定義されており、多くの研究がある。

企業における設計知識マネジメントとは、企業内の設計基準、過去に設計した実績ある設計図、検討文書、及び品質問題を解決した文書などの、新しい設計に有用な情報を指し、それらをどのように蓄積するかが課題である。これらの文書、情報が新しい設計に有効であるかは、その文書、情報が一般解でなくても、論理性をもった検討がされていて、どこまでの検討が実績として使用可能かの判断が必要である。新たな設計にそのまま使えなくても、過去の情報を生かした効率的な設計検討が可能なのが重要である。すなわち、企業での設計知識は設計情報に論理性を有することが不可欠なため、抜けのない情報整理が高信頼性設計には重要である。抜けのない情報整理には、論理性を表した樹形図（FTA も樹形図を使用した解析のひとつである）による設計知識マネジメントが有効であるとされている。

設計知識マネジメントは広く議論がされ、その研究成果を応用したソフトウェアも多い。その中で、宮村らは FTA を設計知識の蓄積として企業内で採用することが有用であるとし、FTA に対する設計知識マネジメントの有効性を報告している [宮村, 1997]。FTA は論理性を Fault Tree 図（故障を分析した樹形図、以下 FT 図と略す）を作成し、それをを用いて故障を解析する手法である。FTA を設計知識マネジメントで利用することは、FT 図を設計技術の解析、知識の伝達と蓄積することであり、製品設計に有効である。ジャトコでは製品設計に FTA を用いた設計プロセスを採用し、製品設計での FTA を重要なツールとして位置付けている（1. 2. 4 にて述べる）。また、他企業でも、品質問題において FTA を用いており、製品設計における知識の蓄積、利用及び整理には FTA が一般的である。本論文では、製品設計における信頼性設計に着目し、その中で企業において広く使われている FTA に焦点をあてて、設計知識マネジメントへの応用と改善方法を提案する。

1. 2. 4 製品設計における FTA

FTA は日本語で故障木解析と言い、故障を頂上事象である最上位に置き、階層的に、体系的、論理的に事象を展開した樹形図である Fault Tree 図（以下、FT 図と略する）を作成し、それをを用いて故障解析、診断を行う手法であり、主に航空機、原子力などの安全設計、冗長設計にて故障確率を算出する目的で使用している〔塩見, 1993〕。この FT 図は階層的、体系的、論理的に展開した樹形図であり、製造業の製品設計における故障解析では一般的である。また、一般的なシステム分析の FT 図には、AND、OR の論理記号の表記が事象展開の間にある。

製品設計の FT 図では事象展開が大規模となるため、AND、OR の論理記号の表記を省略し、表記がなければ OR の論理としている。本論文でも同様に論理記号を省略する。

FTA は、一般的には故障確率算出、故障要因解析を目的に用いているが、日産自動車 PT 部門では設計段階から信頼性ブロック図、FMEA、Perfect・FTA (FTA のひとつであり、以下 P・FTA と略す)、Quality Function Deployment (以下、QFD という) を組み合わせることによって、品質問題の未然防止に活用しており、ジャトコでも本プロセスを採用している (図 1・3 参照)。P・FTA は設計でコントロールすべき項目 (設計パラメータ呼ぶ)、環境条件まで展開するツール〔大城, 1999〕であり、FTA のひとつとして定義されている。このプロセスでは、設計の早い段階から P・FTA によって設計パラメータなどを分析し、抜けがない製品開発を行うことを目的にしている。設計の初期段階でコントロールすべき項目である設計図の寸法、公差、及び環境条件を FTA で抽出することによって、設計者が設計のアウトプットである設計図の設計パラメータを意識することを要求している。設計者が初期段階に設計パラメータを意識して、設計図の値を決めることによって、FMEA で評価した故障モードの未然防止することから設計品質の向上に繋げている。

FT 図が階層的に展開されていれば、その論理性を理解することは容易であり、説明もし易い。したがって、設計者自身とその上司による間違った設計検討も防止できると考えている。設計者の間違った設計検討とは、想定外の条件があることや設計検討の判断ミスがあり、開発の品質問題ほとんどがこれに起因する。また、FTA を論理的に思考する設計ツールとして使用しており、設計者の経験値だけに頼ることなく、FTA を用いた設計知識によって、未知の領域でも新たな製品設計の要因分析が可能であるとも考えている。最近の大規模システ

ムの機能、性能が高度化した複雑なシステム開発や専門細分化した設計組織にも、有効な設計知識の創出、共有のツールとして使用している。

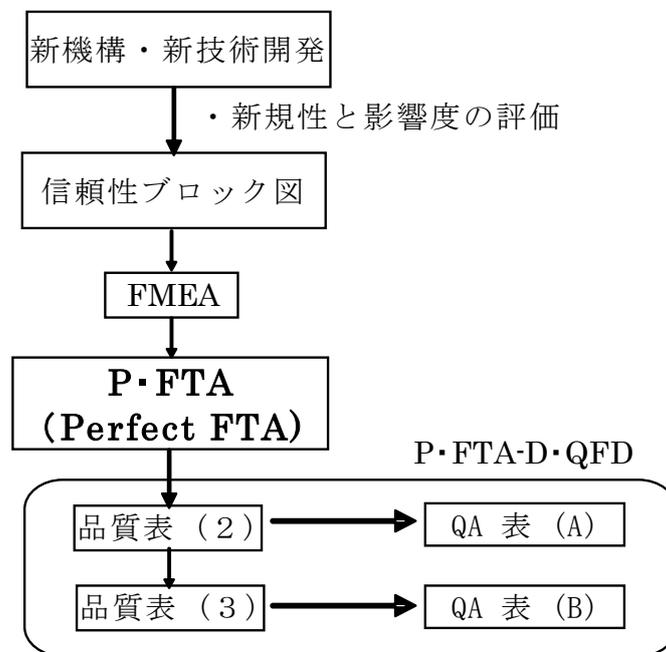


図 1・3 FTA を用いた設計開発プロセス [大城, 1999]

しかしながら、FTA によって故障要因のすべてを抽出する目的で、設計者に FT 図を作成させても、初心者では作成が難しく、経験者でも経験値を書くのみで、過去の経験と勘による解析となんら変わらないことを、筆者は多く経験した。現在でも、開発の経験豊富な設計者ほどその傾向が強く、FT 図の作成、修正に多くの時間が必要となっている。また、前述したように、製品のシステムが電子制御により複雑化しており、その要因が機械系、電気系、電子系、及びソフトウェアに渡るため、FT 図が膨大となっており、人の力だけでは FT 図の作成およびその解析が難しくなっている。他の企業でも、品質問題等に広く FTA が採用されているが、同様な状況であると推測している。本論文では、これらの FTA における問題点を設計知識マネジメントの応用研究によって、解決することを目的とする。

1. 3 設計知識マネジメントの従来研究と問題点

企業における知識と情報が多くの場面で議論され、野中らは企業組織における経営戦略の中で、どれだけ企業にその知識、ノウハウが創出されるかが競争力の源であると言及した〔野中, 1996〕。この中で設計に必要な知識は、形式知であり、設計領域（コンセプト、システム、詳細など）によって異なるが、過去に経験した設計知識（過去の設計情報、品質情報など）、そのドキュメント化（設計検討書、設計基準書など）、及び知識の一般化（工学書、ソフトウェアなど）があり、その知識マネジメントの研究は数多くある。設計知識体系の分類を図 1・4 に示した。本分類からは設計に必要な知識体系はコンセプト設計、システム設計、ハード設計、ソフトウェア設計などの設計分野ごとに違うが、信頼設計知識と工学知識は共通である。ここでは、設計における代表的な知識マネジメント研究を解説し、問題点を述べる。

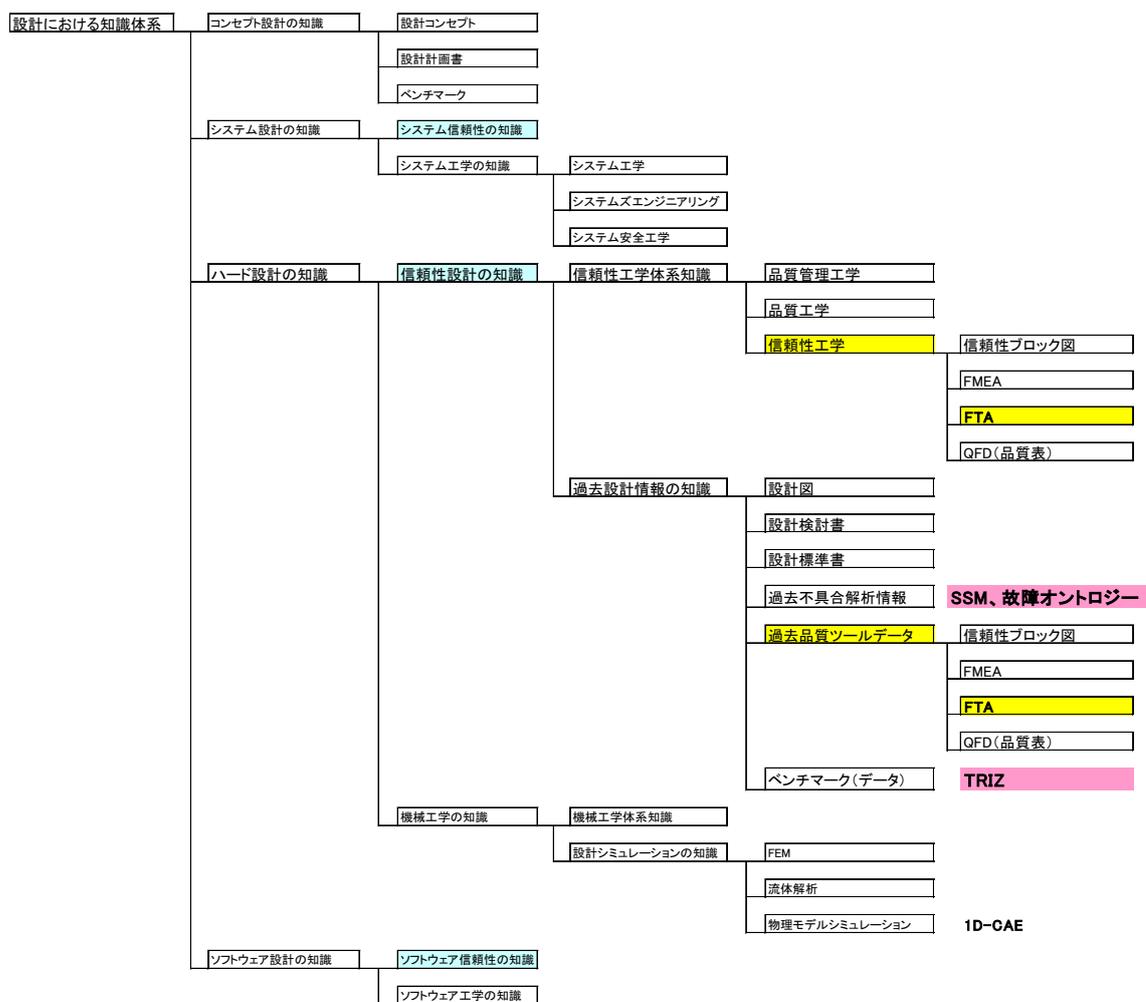


図 1・4 設計知識の体系

i) TRIZ による設計の知識マネジメント

TRIZ (ロシア語の Teoriya Resheniya Izobretatelskikh Zadatch の頭文字を取って、TRIZ と呼ぶ) は、ロシアのアルトシューラーが提唱した発明問題解決理論である。これは、特許を分析して、発明者の問題解決に法則性があることを見つけて、それをパターン化しているものである。TRIZ は図 1・5 のように体系化されている。

TRIZ の体系は、3つの要素 (プロセス、テクニック、知識データベース) から構成され、各要素に手法、パターンが組み込まれている [中村, 2003]。プロセスは TRIZ の考えに沿った問題解決のプロセスを定義し、テクニックは TRIZ を使うための考え方を定義しており、その考え方に有効な知識データベースを提案している。注目すべき点は、特許を分析した結果からの技術問題の考え方であるテクニックと知識データベースである。これらは、特許が技術問題の解決方法を記しており、それらの法則性を見つけて、一般解としている。この体系から標準設計対策のやり方、設計案を見つけることができる。しかし、これは設計問題を TRIZ の考え方に入力すると答えが見つかるものではなく、問題解決のプロセスを踏み、対策検討する際に、標準設計対策の指針を得られるというのが TRIZ の進め方である。すなわち、製品設計における問題の原因を見極めた後に、TRIZ のパターンである技術システムの進化パターン、発明原理及び技術問題の解決手法を用いて、設計検討を行うことが必要である。したがって、TRIZ の考え方を理解することが重要であり、それと同時に問題の捉え方の正確性と分析が必要である。このため、設計問題のパターンや対策指針を得るためのソフトウェアが販売されているが、そのまま使えるわけではなく、TRIZ の考え方に当てはめるために、企業での設計活動では、コンサルティングの力が必要である [中尾, 1999] と言われている。筆者も導入を検討したが、同様な問題に直面した。製品設計における設計知識マネジメントでは、問題解決プロセスの中に対策の指針を得るようなプロセスを変更することで、有効な使い方となることが予測されるが、企業での設計で使用するためには、下記の課題がある。

- ・ 設計の問題点を明確にした後に、TRIZ の考え方にあてはめること
- ・ 使用可能な対象範囲を明確にして、有効な使い方を行うこと
- ・ 設計プロセスを TRIZ に合せること
- ・ TRIZ による企業内の教育体系を構築すること

したがって、上記の課題を解決するためにも、企業での受け入れ準備、体制には多くの課題があると言える。

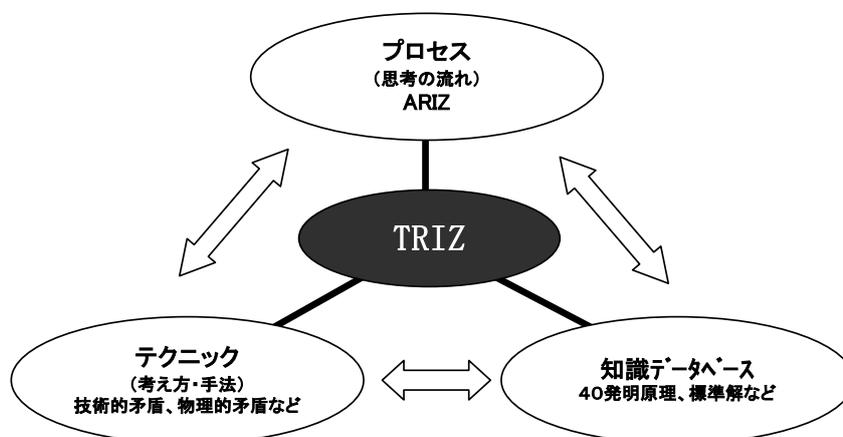


図 1・5 TRIZ の体系的構造 [中村, 2003]

ii) Stress Strength Model による不具合に至る因果連鎖の知識構造の構築

不具合に至る因果連鎖の知識構造研究は、設計知識マネジメントを対象に広く研究がされ、多くの事例研究がなされている [田村, 2002 及び 2005]、[黒川, 2007] [鹿島, 2011]。本研究では製品不具合の因果連鎖に着目し、製品の個々のサブシステム、部品の不具合原因における因果連鎖は Stress Strength Model (以後、SSM と呼び、図 1・6 参照) を用いることで、他のサブシステム、部品の故障要因となり得るとの理論である。SSM は、ストレングスを不具合モードの発生に関わる対象とする特性、ストレスを設計仕様によって備わるストレングスを構成する性質の集合、属性を設計特性、設計仕様と定義して、不具合の因果連鎖をモデル化する手法である [田村, 2002]。

破損を例にとると、ストレスが入力応力 (荷重)、ストレングスが材料強度であり、属性が設計寸法、材料選択であることが明確となり、他の不具合も同様な整理が可能である。SSM は製品設計での設計アウトプットである仕様決定に必要な考え方であり、設計者にとって有効な整理法でもある。また、ある部品の不具合要因が他の部品で起きていた不具合の発生メカニズムとその要因が似ているとの指摘は、企業内では多くあると筆者の経験からも言える。これは不具合の発生メカニズムが工学原理、ノウハウなどの設計モデルが共通な場合は、異なる部品の不具合も同様なメカニズムであると説明できるためである。

また、不具合モードを **SSM** に適合させて、ストレングス、ストレス、属性を言葉で定義し、コンピュータに入力してデータベースを構築する。このデータベースより不具合の知識を再利用するシステムができる。製品設計時に過去の不具合データから、検討ができていない不具合モードなどの情報が、検索によって入手可能となる。但し、多数の事例研究〔黒川,2007〕〔鹿島,2011〕からは、その有効な対象範囲と運用方法に課題があると考えている。以下に、課題を整理する。

- ・ 共通部品（ボルトなど）には適応が有効であるが、新規システムへの適応効果が不明である
- ・ データベース構築に投資と設計者の工数の負担
- ・ コンピュータによるブラックボックス的な支援方法なので、設計者の思考に沿っていない

上記の課題を解決するためにも、投資と設計者の工数、設計プロセスの **SSM** に沿った変更が必要と考える。



対象に備わる“属性集合”によって作りこまれる対象の“ストレングス”に対し、より大きなストレスが与えられると“不具合モード”が発生する

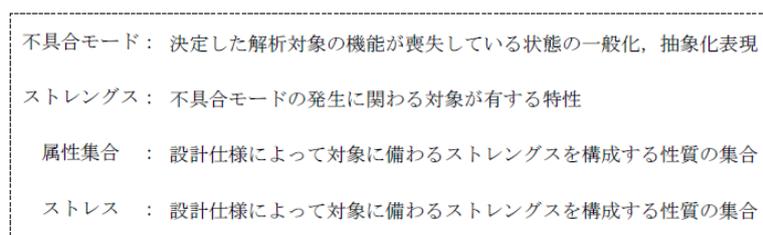


図 1・6 ストレス・ストレングス モデル (SSM) 〔田村,2002〕

iii) オントロジーによる問題解決システムの研究

オントロジーは主に人工知能研究の中で、概念の分類と理論構築が行われ、体系化されたものである。オントロジーとは、「人間が対象世界をどのようにみているかという根元的な問題意識をもって物事をその成り立ちから解きあかし、それをコンピュータと人間が理解できるように書き記したもの」と定

義されている〔溝口,2004〕。色々な分野の知識をコンピュータと人間が理解できるように、言語によって上位と下位の階層構造をもったものである。したがって、対象とする知識を論理的にすべて分類化してコンピュータに入力することで、知識体系を構築、さらに再利用することを目的としている。その中で、製品設計を対象にした問題解決研究として、故障オントロジーの研究がある。我々が研究対象とする FTA に関係する関連研究として以下に言及する。

故障オントロジーはコンピュータによる故障の問題解決システムを目的に研究され、主に故障診断システム開発を行っている〔来村,1999a 及び 1999b〕。この中で注目すべき点は、故障原因を認知的故障原因と物理的故障原因に分類している点である。最初に故障する部品、サブシステムの原因を物理的故障原因、その故障によって副次的に発生する故障を認知的故障原因と呼んでいる。その分類法は実際の製品設計でも理解でき、大規模システムではひとつの部品やサブシステムが故障した後に、それに伴う故障が発生することからも有効であると考えられる。これらを正確に分類した故障オントロジーを作成し、故障診断に活用している。しかしながら、自動車のような大規模システムの製品設計では、その故障オントロジーは、システムが多岐にあることから莫大である。これらの故障オントロジーを作成するには、技術者の工数を含めた投資が必要であり、企業の負担も大きいと考えられる。故障オントロジーは、大規模システム運用時の故障診断システムとして優れた手法であり、故障過程を原因、状態、時間の分類を考察し、故障の構成である故障オントロジーを定義している。また、実際のプラントにも応用し、システムの評価がされており、有効性を示している。故障をオントロジーに沿って再定義しており、コンピュータの推論による大規模システムの故障診断に有効ではあるが、企業の製品設計の場面に応用するには、以下の課題があると考えている。

- ・故障オントロジーを正確に作成するための時間と工数の負担
- ・製品設計行為とは別のデータベース構築とシステム開発
- ・製品設計プロセスを変更すること

iv) 物理量次元インデクシングによる設計知識マネジメント

2006 年当時の物理量次元インデクシング研究では、物理量で表した設計パラメータが 7 つの SI 単位系物理量次元で表すことが確認でき、設計知識のインデクシングに可能であるとの報告があった〔村上, 2006〕。物理量次元を 7 つの

SI 単位で表すとの理論は新鮮であり、新規性の高いアイデアであった。筆者自身も自分が作成した製品の工学モデルの運動方程式や流体シミュレーションの方程式の確認ために、単位系確認または次元解析を用いた経験があり、メカニズムのパラメータ検証には有効であるとの認識であった。但し、物理量次元のインデクシングとしての活用が、語句検索よりも検索が有効であるとの説明であったが、PC の計算性能が格段に上がっている現在では、語句検索でも十分に可能であり、応用領域の検討が必要な状態であった。

Category	No.	Knowledge	Index (R)
Space and time	8	角速度	rad/s
	9	角加速度	rad/s ²
	10	速度, 速さ	m/s
	11	加速度	m/s ²
Periodic and related phenomena	12	周波数, 振動数	Hz
	13	回転速度, 回転数	s ⁻¹
	14	波数	m ⁻¹
	15	角波数, 波長定数, 位相定数	rad/m
Mechanics	16	密度	kg/m ³
	17	比体積	m ³ /kg
	18	線密度	kg/m
	19	面密度	kg/m ²
	20	運動量	kg · m/s
	21	運動量モーメント	kg · m ² /s
	22	慣性モーメント	kg · m ²
	23	力	N
	24	万有引力	N · m ² /kg ²
	25	力のモーメント	N · m
	26	圧力	N/m ²
	27	線ひずみ, 伸び率	m/m
Heat	28	圧縮率	m ² /N
	29	断面二次モーメント	m ⁴
	30	断面係数	m ³
	31	粘度	Pa · s
	32	動粘度	m ² /s
	33	表面張力	N/m
	34	仕事	J
	35	仕事率, 工率, 動力	W
	36	質量流量	kg/s
	37	流量	m ³ /s
Heat	38	線膨張係数	K ⁻¹
	39	圧力係数	Pa/K
	40	熱流密度	W/m ²
	41	熱伝達係数	W/(m ² · K)
	42	熱絶縁係数	m ² · K/W
	43	熱抵抗	K/W
	44	熱拡散率	m ² /s
	45	熱容量	J/K
	46	比熱容量, 比熱	J/(kg · K)
	47	比エンタルピー	J/kg

表 1・1 物理量と物理量次元の事例 [村上, 2006]

i) ~ iii) は、設計の知識体系を理論的に構築しており、ソフトウェアも製作され企業内でのトライアルも実施されているが、3つの手法ともに下記の共通の課題があると考えている。

- ・ 社内の設計プロセスやツール（帳票）を変更する必要がある
- ・ 設計者の思考方法に沿っていない
- ・ 新規ソフトウェアの導入が必要がある
- ・ 情報システムのインフラであるデータベースの新規構築
- ・ 新しい手法の教育体系の作成と実施

したがって、企業は新たなプロセスや情報システムの導入には多額の投資と技術者の工数が必要であり、プロセス変更にも抵抗感が設計現場には強いと推測される。また、iv)の研究は非常に興味深い研究であったが、未だ企業の製品設計の中の応用方法を模索しおり、実用化には至っていなかった。

設計では、過去に設計した製品を違う条件、仕向けに変更のみを設計する適用設計と、まったく新たなシステムを開発する新規設計に分類される。適用設計でも新たな条件での設計検討が必要であり、設計に必要な知識体系は数学的に一般解が必要である。したがって、理想的には、設計の必要な知識は、形式知かつ一般解が必要であると言える〔野中, 1999〕。しかしながら、過去の設計、品質問題対策における知識の一般化プロセスを踏む時間は、設計者にはないのが現状である。設計に必要な知識体系は、設計領域（コンセプト、システム、詳細設計）でも、その要求知識のレベルや粗さは異なり、各設計に共通な知識マネジメント方法をもつことは難しいと考える。さらに、それぞれの設計領域で共通する要求は、すぐに使える知識体系でもある。

すなわち、要求されている設計の知識体系は、設計知識の形式知化、かつ一般解化ではあるが、すぐに使えることが必須条件である。従来研究では、製品設計に有効な知識マネジメント手法として未だ十分に満足されるものではない。企業の製品設計では知識マネジメントの重要性を理解しているが、その要求レベルは高く、設計工学、設計知識マネジメント研究成果の応用研究がさらに必要と考えている。

1. 4 論文の目的と研究課題

現在、グローバルな競争時代での産業界における製品設計では、有効な設計知識マネジメントは、形式知かつ一般解であり、すぐに使えることが必要である。従来研究を企業の設計活動に適応させるには、投資と設計者の工数と企業側の体制が必要であり、設計者はすぐに使えない。また、設計者の思考に支援プロセスが沿っていないことから、企業で定着するには設計者の教育が難しいと予測される。本論文では、その設計知識マネジメントに信頼性設計で、どの企業でも採用している FTA に着目し、設計者に有益な知識マネジメント構築を目指した支援システムの開発を目標とした。FTA の設計知識マネジメントを構築するための研究課題（前述）から、本論文の目的を下記とする。

- ①. 企業（ジャトコ）における FTA にもとづく高信頼性設計を展開した結果から、実用の問題点を分析し、製品設計における FTA の課題を定義すること。
- ②. FTA の課題を解決するため、設計知識マネジメントの研究成果を応用し FTA の支援システムを開発し、提案すること。
- ③. 実際の企業における設計現場における支援システムの試用、評価検証を行い、システムの効果を明確にすること。
- ④. 実際の企業における評価検証結果から支援システムの課題を明確にし本システムの発展性を考察すること。

第2章

企業における FTA を用いた 製品開発の現状と課題

2. 企業における FTA を用いた製品開発の現状と課題

本章では、ジャトコを題材に企業における製品開発を検討し、FTA の位置付け、その特徴と課題に言及する。筆者が設計にて担当した事例を用い、製品設計での FTA の有効性を論じ、FTA の課題について言及する。また、実際に企業（ジャトコ）で行った FTA の改善活動から FTA の品質に対する効果と課題を考察し、製品設計における FTA の課題を定義する。

2. 1 実際の製品設計と FTA の現状

設計とは制約条件（コスト、レイアウト、重量、製造）のもと、要求機能を満たすような設計解を求める作業であると定義されている [Suh, 2001]。実際の製品設計では、製品の使用条件、環境条件、製造工程のばらつき、及び検討実験のばらつきをも考慮する必要があるため、多くの詳細検討と検証を行って、部品特性（寸法、公差など）である設計解を決めている。最終的には、その部品が必要としている品質特性とその目標値、部品特性（図面值、公差）、それらの関係特性（計算値、実験値）、さらには工程特性（工程能力）によって、部品特性（寸法、公差など）を図 2・1 のように決定している。企業での製品設計では図 2・1 のように、各特性のばらつきを考慮し、制約条件の中で仕様を決定している。

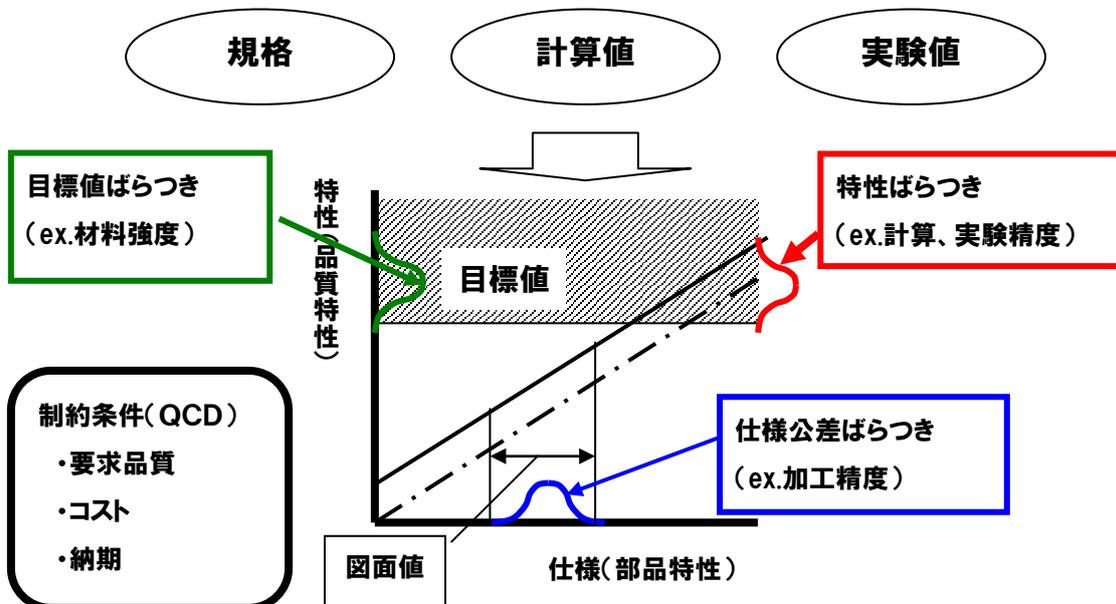


図 2・1 設計のアウトプット

しかしながら、既存の製品を適応するのであれば、その部品特性を複製すれば良いが、新しい機構、技術が含まれているものでは設計検討が必要である。それらを検討する手法として、ジヤトコでは日産自動車パワートレーン部門で開発した P・FTA-D・QFD 法のプロセスを採用している (図 2・2)。

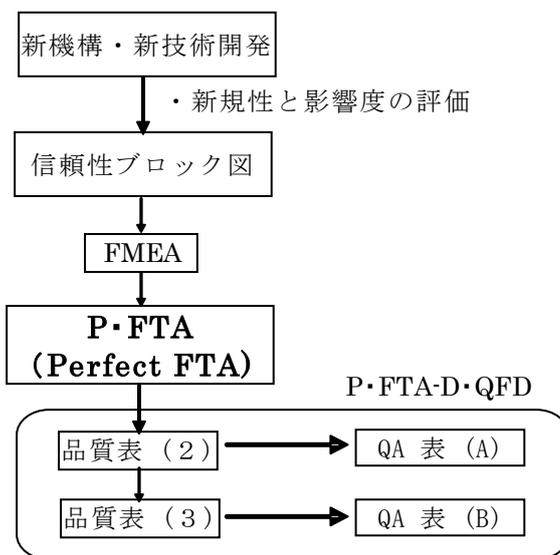


図 2・2 開発の設計プロセス [大城, 1996]

これは、最初に新しいシステム、機構を定義し、その定義された対象のみに本プロセスを適応している。まずは、定義されたシステム、機能の設計機能を明確にするため、信頼性ブロック図を作成する。その設計機能を FMEA に入れて、影響度の高い故障モードを明らかにする。その故障モードを頂上事象に、FTA のひとつである P・FTA を実施することによって、影響度の高い故障モードをコントロールする設計パラメータ (設計図の寸法、公差、仕様など) を抽出する。影響の大きい故障を起こさないようにするためには、設計者自身が FT 図で抜けのない設計パラメータを抽出し、設計図の寸法、公差などの値を規定することを意識することが重要である。本ステップの後、実験、シミュレーションによって、設計者が設計パラメータ (寸法、公差、仕様など) を決めることができる。この設計パラメータの中から感度の高いものを QA 表に登録し、品質維持のために工程能力管理を行っている。ジヤトコでは、本プロセスを 1990 年代より採用し、製品品質の向上に努めている。この中で、中心的な位置を占めているのが、FTA である。

2. 2 FTA を用いた品質問題の現状と課題

企業における品質問題は負の遺産、またはブランドイメージの喪失として捉えられ、良い印象を持たれていない。過去、企業側での品質問題隠しが批判され、一部の製造業では経営問題までに発展した例は数多くあり、昨今では品質問題を積極的に公開している。品質問題を改善の機会、また製品設計としては技術向上の好機と考えると、企業における貴重な知識財産でもあるので、これらを知識体系として技術蓄積とする企業も少なくない。品質問題に対して対処療法しか行ってこなかった企業では品質問題の再発が起り、ブランドイメージの喪失につながるが、品質問題の根本原因を究明し、再発防止につなげている企業にとっては改善の機会であり、技術蓄積のチャンスでもある。企業の品質管理では、この再発防止を最優先課題とし活動している。したがって、企業にとって、品質問題の根本的な原因を究明し、対策、及び知識化することが最優先の課題である。

製品における品質問題の根本原因を究明する解析手法は、QC 手法 (Quality Control 法、または品質管理法)、KT 法 (ケプナー・トリゴー法) の問題解析法がある。QC 手法は主に工場における品質管理として、問題解決のプロセスとツールを提案しており、日本では全国規模の活動となっている。その中で、有効な QC ストーリーは、科学的解析法として仮説立案とその検証を基礎に、現場でも理解しやすいプロセスとして構成されている。また、KT 法の中にある問題解決は、アメリカの経営学者のケプナーとトリゴーがアメリカの企業での問題解決を分析し、業績を挙げている企業に共通した仕事のやり方を体系化したものである。この KT 法の中で、問題分析は原因究明法として確立されており、効率的な品質問題分析として有効であると考えている。

企業ではこれらのプロセスに加えて、FTA を基本ツールとした問題解決プロセスを採用している。これは、FT 図によって品質問題のすべての要因を分析し、その要因を検証するというプロセスであり、根本原因を究明する目的で使用している。FT 図は品質問題の要因を洗い出す手法として中心的な位置を占めており、抜けのない要因分析として欠かせないものである。最近では、顧客の品質要求レベルの向上などで、他の企業でも品質問題分析に FT 図を用いた徹底的な分析によって、根本原因究明に役立ており、一般的な品質ツールとなっている。

しかしながら、FTAには課題も多いと考えている。FT図の作成には個人差があり、設計者ごとにその精度が違い、抜けがあると考えられる。また、一般的にはこれを防止するため、専門家を5名ぐらい集めて、ブレインストーミング〔Osborn,2008〕で作成することが多い。確かに、専門家を多く集めることで専門家の経験したことは反映されるが、経験のない事象は抜ける可能性があり、本当に抜けのないFT図ができたかは不明である。抜けのあるFT図をもとに調査を進めると、FT図の要因がすべてつぶれてしまい、原因解析をやり直すことがある。筆者もこの原因解析のやり直しや停滞をよく経験した。これを防止するためには、抜けのないFT図が必要であると考えているが、なかなか難しい。このように、品質問題の根本原因究明を目的とした原因解析には、技術的な困難が多く、どの企業でも、多くの時間と多大な工数がかかっていると推定している。

2. 3 設計における FTA の効果検討

筆者が設計にて経験した事例の FTA を紹介し、FT 図を使った設計の有効性を分析する。FTA で用いる FT 図は、論理的なつながりを樹形図に記したものであるため、FT 図には本章で述べる 2 つの必要条件を満たすことが求められる。その必要条件を満たした FT 図を用いた FTA を紹介し、製品設計での有効性を述べる。

2. 3. 1 FT 図作成の必要条件

FTA は、故障の要因を樹形図である FT 図により抽出する解析法であり、その故障確率結果から冗長系システム設計に活用されてきた [塩見, 1983]。FT 図は樹形図であり、各事象の展開を論理的に展開していくため、上位事象と下位事象の展開の仕方が大きなポイントである。FT 図に論理的な展開であることを確実にするため、以下の 2 点の必要条件を設計者に要求している。

i) 上位事象と下位事象の関係

FT 図の上位事象と下位事象の関係に、Mutually Exclusive and Collectively Exhaustive (相互に重なりなく、漏れがない、後に、MECE と略する) という考え方 [Rasiel, 2006] を導入している。これは経営学、経営マネジメントなどの樹形図、イベントツリー図で一般的に紹介されている。下記の図 2・3 A~F の FT 図の展開が MECE であることは、下記の集合のベン図で表現することが可能である。すなわち、FT 図展開では相互に重なりなく、漏れがない状態とするためには、図 2・3、図 2・4 に表した集合の概念になっていることが必要である。設計者には、FT 図におけるこの基本概念を FTA 教育の中で教示し、FT 図の作成時にこの概念を考えさせることで、抜けのない FT 図ができると考えている。



図 2・3 MECE 構造

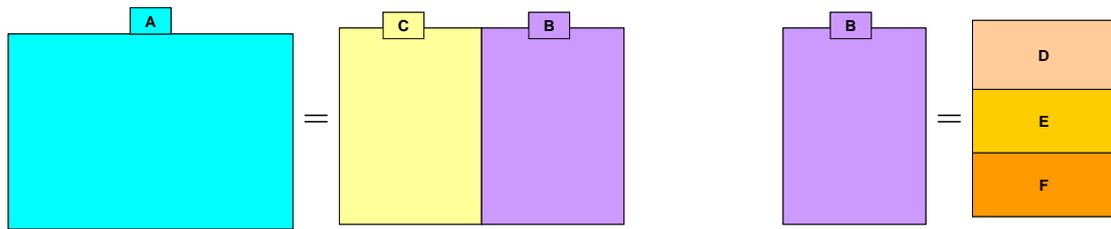


図 2・4 MECE 概念

ii) 物理的な原理、工学知識で展開する

設計では、物理的な原理、工学知識を用いて、設計で与える機能を満足させるために、形状寸法、仕様などを決めている。設計というプロセスの中では、設計検討上で問題となる事象（又は課題）を表すメカニズムに従って、簡単な形状に置き換えて考えており、工学ではこの思考プロセスをモデル化と定義されている。実際の設計では、ポンチ絵、ブロック線図を描いて、必要な粗さの簡略化したモデルを作成して、設計の検討を行っている。

【例えば】

破損 → 応力と材料強度のメカニズムで材料力学の梁問題に置き換える

油圧 → 供給油量と消費流量のメカニズムで、油圧回路を作成する
 使用する物理的な原理、工学知識に従ったモデルに沿って、FT 図では事象展開するように要求している。この事象展開法は、Plant Maintenance 分析（一般的には、PM 分析と呼ばれている）〔白勢, 1999〕と同様な考え方で、既存の手法であり、設計者が技術的に MECE を満たす思考として優れている。日産パワートレイン部門が開発した P・FTA-D・QFD 法では、故障事象をコントロールする設計パラメータ（図面值、公差、など）を抽出するために、FTA の一種である P・FTA〔大城, 1996〕を用いて、上記の物理的な原理、工学知識に従った事象展開を行い、抜けのない設計パラメータを抽出している。

一般的には専門家を集めてブレインストーミング〔Osborn, 2008〕にて FT 図を作成するが、社内では FT 図の論理性を確保するため、前述の 2 つの必要条件を設計者には要求している。

2. 3. 2 オイルポンプ設計事例とその FTA の有効性

i) 概要

オイルポンプは油圧アクチュエーターへの作動油の供給源である。オイルポンプが故障すると、自動変速機（以下、AT と略す）、無段変速機（以下、CVT と略す）が走行不能となるため、重要な構成部品のひとつである。その代表的な故障が、オイルポンプのギヤ焼けである。ここでは、アウターギヤ外周の焼けを題材に、FTA による部品の設計検討の方法を述べる。

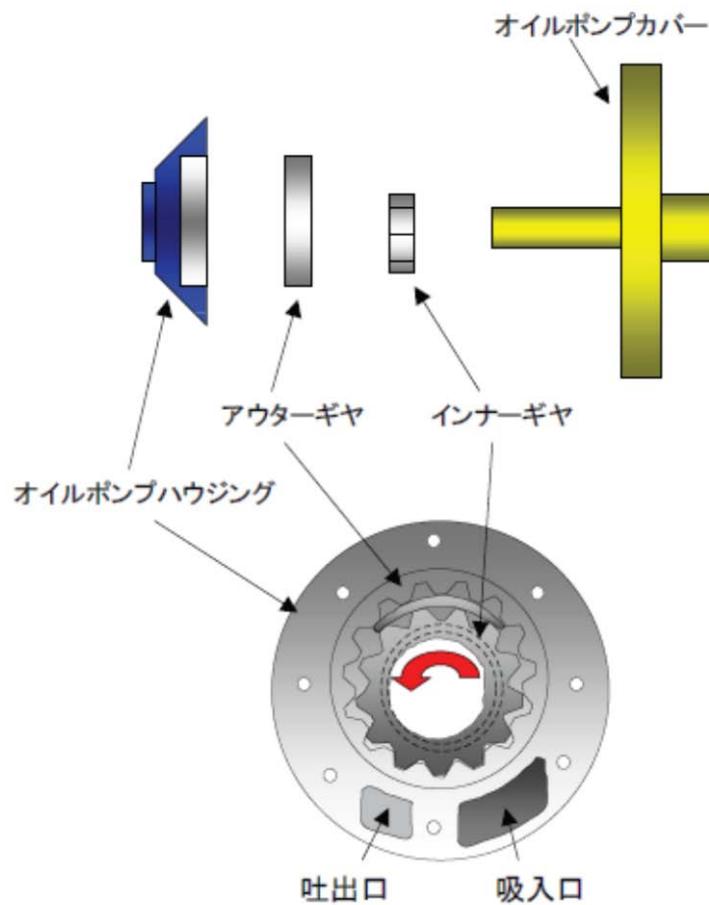


図 2・5 オイルポンプの概略図

ii) 検討内容と FTA の有効性

①. 工学原理（メカニズム）を考える

故障モードの現象から使用する工学原理（メカニズム）を考えると

- ・ アウターギヤ外周の発熱により、材料が溶解し、焼けに至る。

となるため、発熱による温度上昇と材料の溶解温度の関係により、発生すると考えられ、まずは熱力学のモデルを用いる。

②. 他の部品の工学原理（メカニズム）から類推

アウターギヤ外周には油が入り、油膜形成を考える必要があり、ジャーナル軸受の理論〔岡本, 1994〕を用いて、油膜形成を類推する。ジャーナル軸受理論のメカニズムから軸回転、ジャーナル軸受、油粘度により、流体潤滑により内部圧力分布が発生し、ラジアル荷重を受けることができる。

③. 上記の2つのメカニズムを合成した FT 図を作成する

図 2・6 の FT 図から、アウターギヤ外周、ポケット（図 2・5 のアウターギヤが入る HSG の穴）の寸法精度（径、真円度、粗さ）、油粘度（温度、オイル性状）、ラジアル荷重（圧力、受圧面積、分布）、回転数などが抽出できる。

④. 実験計画を作成する

設計パラメータの設計値を決めるため、実験計画、シミュレーション計画を作成する。

⑤. 設計パラメータ感度、制約条件から設計図の寸法を決める〔大城, 1999〕

④での設計パラメータ感度より、制約条件である使用条件、環境条件、コスト、実験や製造のばらつきを考慮して、設計値を決める。

上記の検討プロセスで、設計にとって重要なポイントは

- ・ 現象のメカニズム、他部品の類推できる工学知識を検討し、それに従った論理的な FT 図を作成する
- ・ FT 図から故障事象の設計パラメータである寸法公差までを抽出すること
- ・ 設計検討時に、設計図に必要な設計パラメータを決定するための必要な結果を考えること

であると考え。工学原理検討から設計図の公差、検討すべき入力条件、環境条件を抜けなく、FT 図を作成することで定義することは設計品質にとって、最も重要である。従来、設計者の勘、経験で決まってきた経緯があり、抜けによる品質問題の発生、並びに開発プロセス終盤での設計対策によるコスト増につながる危険がある。また、その部品を初めて設計する者は、この設計の思考過程をたどることで、工学原理を理解できれば、設計検討が可能となる。

設計は科学とは違い、真理探究の必要はないとされているが、今回のように工学知識から類推してモデル化を行うことで、設計で決めるべき仕様が明確に

なる。ここでは、オイルポンプの焼けのメカニズムにジャーナル軸受理論が使えるため、ジャーナル軸受のように詳細な理論検討の必要はなく、工学的な類推による FT 図でパラメータを検討し、その後実験、シミュレーションを行うことで、設計値の決定ができ、ポンプの焼けは防止できる。このように、製品設計ではこの手順で設計検討することで、どのような部品の高信頼性設計も可能であると考えられる。

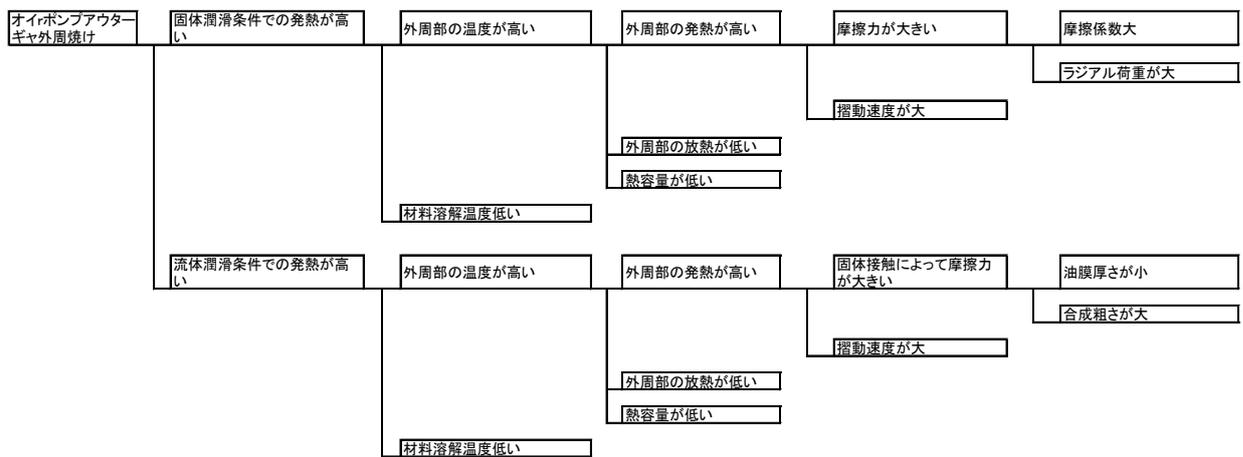


図 2・6 オイルポンプギヤ焼けの FT 図

2. 3. 3 油圧系システム設計事例とその FTA の有効性

i) 概要

AT・CVT では変速のアクチュエータに油圧システムを用いており、油圧によって変速を制御している。本事例は、システムは図のように、オイルポンプ、コントロールバルブ（以後、C/Vと略する：調圧弁で構成される部品）、プーリのピストン室で構成され、管路で接続されている。最初に油圧部品のメカニズムを考える設計者が多いが、各要素部品を接続させたのは設計者であり、メカニズムを検討するのではなく、各要素を接続させたシステム検討が必要である。本事例は油圧系システムを FTA で検討した事例である。ここでは、プーリの油圧低下を題材に FTA を考察する。

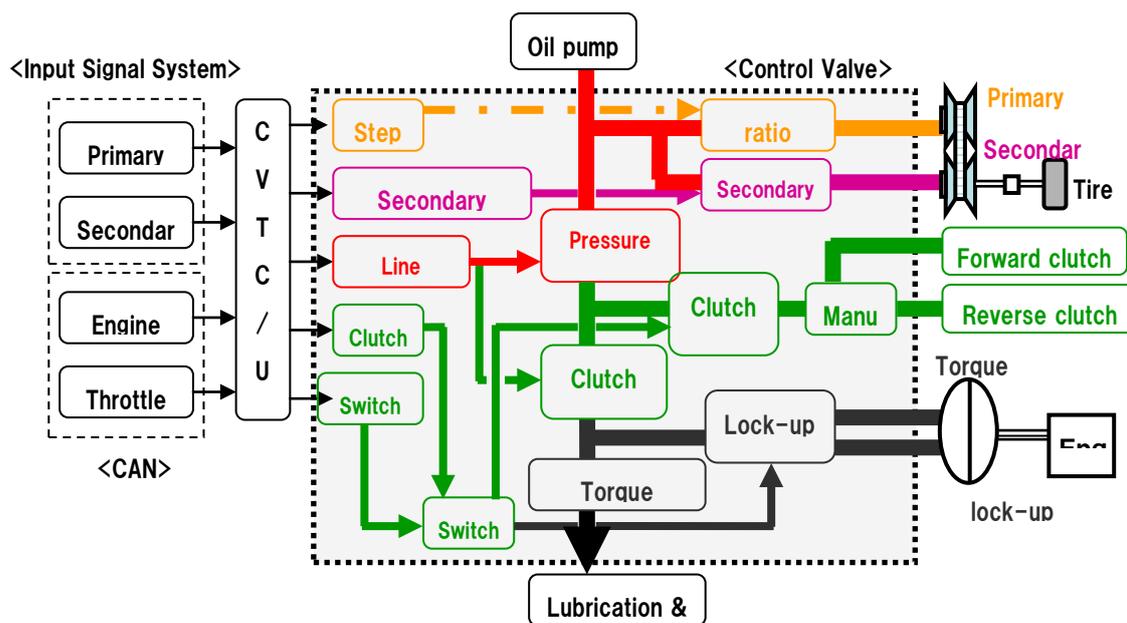


図 2・7 CVT油圧システムの概略図

ii) 検討内容と FTA の有効性

- ①. システムを検討する場合、部品要素間のつながりを明確にする
油圧系の場合は油圧回路図がそれに当たるが、油圧担当者にも油圧系ブロック図を作成することを要求している。各要素がどのような接続をしているかを明確に表現する。

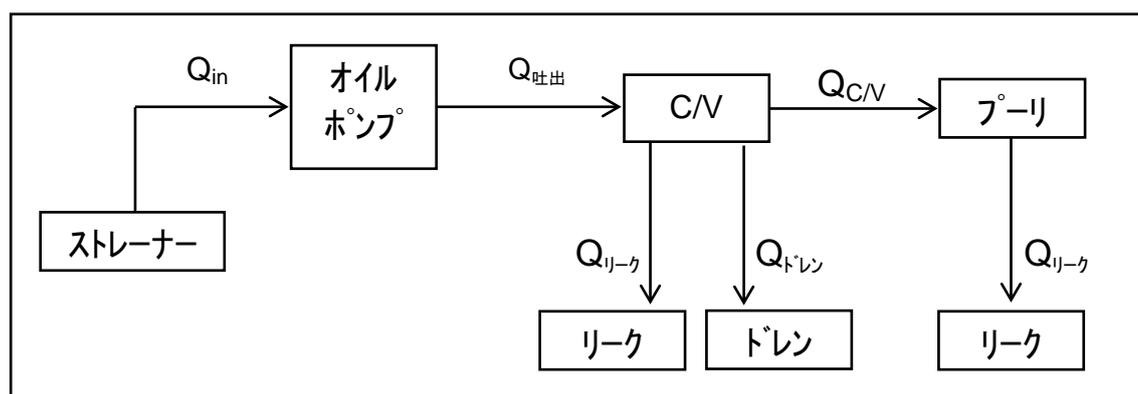


図 2・8 CVT 油圧系ブロック図

- ②. 油圧の発生メカニズムを考える
要素間をつなぐのはオイルであり、油圧発生メカニズムは閉鎖空間にオイルを押し込むことで、その反発力が圧力をなす。したがって、油圧発生メカニズムのパラメータは流量差、体積弾性係数及び空間体積変化であるので、それらを FT 図に作成する。
- ③. 油圧系ブロック図をもとに、入力と出力を FT 図に作成する
油圧系ブロック図は正確に要素間のつながりを表現できている前提で、FT 図に油圧発生メカニズムの後に入力と出力の関係を FT 図に作成する。前述のやり方は静的な現象に対するものである。これに対して、動的現象すなわち振動問題は振動モデル（強制振動、自励振動など）をモードとして記述し、FT 図に整理する。
- ④. 油圧低下要因分析の実験計画、シミュレーション計画を作成
静的な問題では供給量と消費量のバランスで油圧が決まるので、各要因の実験計画を作成する。
- ⑤. 設計パラメータを決める
設計パラメータを決め、設計予測と製造管理の結果を比較検討し、最終仕様（設計パラメータ）を決定する。

上記の事例で重要な点は

- ・ 設計が配置したシステムを必要な粗さのブロック図に表すこと
- ・ 油圧システムを扱う場合、流体（油）の工学知識を用いること
- ・ 油圧のサブシステム（調圧弁、電磁 SOL 弁など）のメカニズムも考えること。
- ・ 油圧系をコントロールするための設計パラメータ（油温などの環境条件も含む）をすべて抽出する

であると考えます。ここでのブロック図は、サブシステム（油圧アクチュエーター、センサーなど）のつながりを俯瞰できることが狙いである。油圧系ブロック図でのインプット、アウトプットを正確に定義することで、モデル化が可能となる。また、ハード設計（パワートレーン設計者なども）、制御設計とのコミュニケーションがこのブロック図でできることも重要である。油圧系設計者は JIS で決められた油圧回路図を作成して考えるが、油圧回路図はハード設計者、制御設計者にとっては難解のため避ける傾向である。このため、ブロック図によるシステム図の作成を提唱しており、社内コミュニケーションの円滑化と抜けのない FT 図に役立つと考えている。昨今、システムの電子制御による複雑化による設計分業化によって、設計間のインターフェイスが問題となることが多いため、このようなブロック図と FTA による情報伝達、設計検討が有効な手段であると考えている。

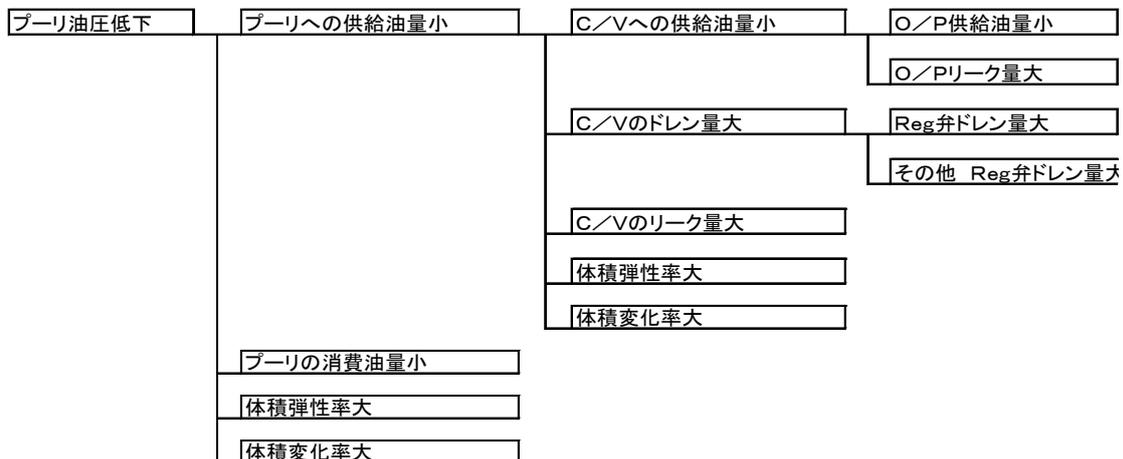


図 2・9 CVT 油圧系の FT 図

2. 4 企業における FTA の改善活動の効果と課題

本章では、過去数年間ジャトコ社内で実施した FTA の改善活動とその効果、及びこれらの活動結果からの FTA 品質に対する課題を述べる。

2. 4. 1 FTA の改善活動の背景と概要

数年前、ジャトコでは FTA の品質が良くないとの認識があり、FTA の改善活動に取り組んだ。最初に、現状の品質レベル、問題点を把握する目的で、社内で作成した FT 図を集約し、社内の FT 図を社内評価基準（100 点満点での減点法：階層ごと論理性を評価し、抜けがあると減点する）によって、評価した（図 2・10：横軸が評点、縦軸が件数）。その結果からは、評価レベルの高い FT 図もあるが、社内基準 60 点に満たない FT 図が多いとの問題点が分かった。したがって、今回の改善活動の目標を社内基準の 60 点を増やすことに主眼を置き、その原因分析及び対策実施を行った。まず、原因調査として、社内のヒアリングを行った結果、

- ・ FT 図の作成が決まったやり方がない
- ・ FT 図の作成方法が分からない設計者が多い
- ・ FT 図に作成に時間がかかり、考える時間がない

との声が多くあった。FT 図を作成するマニュアルがない、社内展開ができていない、FT 図作成の効率化が課題であることが分かった。これらの問題を解決するため、社内の FT 図のレベル向上と効率化を目的とした FTA の改善活動を計画し、実行することとした。

FTA の改善活動は、以下の 4 つの対策方策をもって活動を行った。

- ① FT 図の作成方法をマニュアル化
- ② FTA 教育体系を整備
- ③ 社内ネットワークでのデータベース構築
- ④ FTA 支援チームによる実践指導

これらの方策はマネジメント課題を解決する方法としては一般的であり、十分な効果があると考え、活動を推進した。以下に、その活動内容、成果及び課題を考察する。

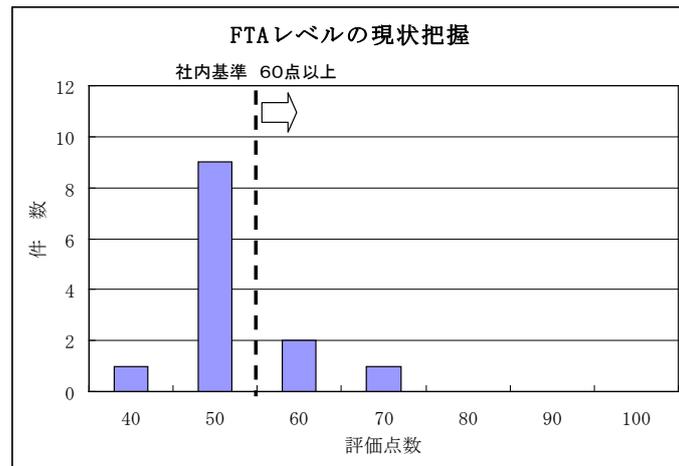


図 2・10 FTA レベルの現状把握

2. 4. 2 FTA の改善活動内容

i) FT 図の作成方法をマニュアル化

FT 図を作成する現状の手順を整理すると同時に、マニュアルを作成して社内展開を行った。マニュアルでは、社内の手順を均一化し、レベルを上げることを目指したが、信頼性工学の教科書、外部講習の FT 図の作成手順は、5 名ぐらいの専門家を集めて、ブレインストーミングで作成することが一般的であり、改善活動には十分でなかった。そこで、前述の FT 図の必要条件 (2.1.2) と作成手順を、マニュアル化し、社内に展開を行った。マニュアルはすべての部品、場面、条件を表すことは難しいので、FT 図作成での共通な作成手順を記述し、分かりやすい内容とした。また、社内のホームページでも公開し、いつでもマニュアル検索が可能な環境とした。

ii) FTA の教育体系を整備

FTA の教育は、以下の項目のスキルを身に付けることを目的に実施している。

- ・ 製品設計、品質問題における FTA の必要性を理解すること
 - ・ FT 図の作成には。論理的、物理的、及び工学的な思考が必要なことを理解すること
 - ・ FT 図作成演習によって、FT 図の作成手順と考え方を理解すること
- FTA 教育では、FT 図を正確に作成できることを目指しているが、同時に論理

的に技術問題を考えられるスキルを持つことも目標としている。したがって、講座では演習を中心として、問題の正解を見付けるのではなく、技術問題を悩んでもらい、考えるプロセスを学んでもらうことを狙っている。実際の開発でも技術問題は同じものではなく、自分で考えられるスキルを身に付けることが重要なため、受講生間のディスカッションにて自分で答えを見出すプロセスを踏んでいる。講座の時間制限もあるので、最後は正解例の解説を行っているが、FT 図は自分で考えて作成することを基本にしている。このような講座のため、設計者の FTA の技術問題分析の力量を定義し、その適切な教育を行う目的で、FTA 教育では FTA のスキルランクに従った講座で構成している。

FTA のスキルランクはエンジニアの個々の FT 図作成のスキルレベルを表すものであり、エンジニアの課長層、担当層に対して、必要なスキルランク取得を要求している。スキルランクは下記の三段階ランクとしている。

- ・A ランク : 講座の講師、指導者層の指導ができること
- ・B ランク : 一人で FT 図を作成でき、担当層を指導できること
- ・C ランク : B ランクの指導があれば、FT 図が作成できること

これらは、設計部署内で FT 図を作成する状況を考えて、FT 図作成の担当者に対して C ランクを設定し、技術的な結果を承認するリーダーには B ランクを設定した。また、A ランクは集合教育の講師として、特殊なスキルとした。したがって、技術（設計、実験、生産）部署の技術リーダー層には B ランク取得、担当層では C ランク取得を社内教育体系の中で要求しており、本スキルを必須としている。

FTA のスキルランクとランク取得講座の設定を表 2・1 に表す。このように、スキルランクの目標達成レベルを定義し、それに必要な講座設計を行っている。B ランク取得講座では、実務演習課題を演習課題とし、FT 図が完成するまで講師と 1 対 1 の指導を実施している。指導では、講師は安易に正解を言わずに、質問形式での指導を基本とし、受講者自身が FT 図を自ら作成することを目指している。また、C ランク取得講座でも演習課題を中心として、自分が作成した FT 図をグループディスカッションに持ち込んで、他の受講者間の FT 図と比較しながら議論することで、自分で論理的に、FT 図を考えることを身に付けさせている。但し、企業での教育受講は受講側の工数を考えると、時間的な限界があり、C ランク取得講座受講者でもスキルランクレベルに到達しない受講者には、個別に補習を行うが、全員の理解を得られるまでには至っていない。

表 2・1 FTA のスキルランクとランク取得講座の関係

スキル ランク	目標達成 レベル	講座名	取得基準	講座内容	講座日数
A	Bランク層の FTA が 指導できる	今回は論議しない			
B	Cランク層の FTA が 指導できる ひとりで FT 図の 作成が可能	FTA B ランク 取得講座	講座修了のこと ・演習課題が基準 内、及び終了	・座学 ・実務課題演習 (演習完了まで指導)	座学：0.5 日 演習：0.5 日 指導会：1 Hr ×3 回 (平均)
C	Bランク層の指導で FT 図の作成が可能	FTA B ランク 取得講座	講座修了のこと ・演習が基準内	・座学 ・共通課題演習 (演習完了まで指導)	座学：0.5 日 演習：0.5 日 グループ 討議：2Hr (時間内で終了)

iii) 社内ネットワークでのデータベース構築

社内データベースは、Windows のファイルサーバーに、過去に作成した FT 図を集約し、Microsoft 社 Excel の表から部品名、頂上事象から設計者が検索できるように、ハイパーリンクシステムを用いた。設計者が部品名と問題事象から、類似の頂上事象を選択するシステムであり、システム構築に時間と投資をかけずに簡易的に FT 図の検索は可能となった。但し、改善活動を進めている中で、下記の問題があることが分かった。

- ・問題事象と頂上事象が同様であれば有効であるが、データベースに類似した頂上事象がない場合は新規で作成する必要がある
- ・データベースの FT 図が間違っ展開をしていると、リファレンスして作成した FT 図も間違いが入っている可能性が高い

社内で集約した FT 図を選別して掲載するとの案があったが、実際の業務で作成した FT 図であったので、ホームページに注意を書き、あえてそのまま掲載することにしていく。

vi) FTA 支援チームによる実践指導

上記の対策だけでは、実際の FT 図が作成できない場合がある。システム問題や社内に専門家が少ない部品の場合は、過去に作成した FT 図の参照ができないので、FT 図の作成難易度が高い。FTA の教育講師が、設計部署からの要請に直接応える体制を取り、具体的な問題に対して担当設計と FTA 支援者（FTA 教育講師が担当）が協力して取り組み、問題解決を目的に FT 図を作成し、その有効性を担当者に理解させる活動を行った。実践指導では、設計担当者が FTA を理解し、FT 図の品質レベル向上にもっとも役立った場合もあったが、設計部署の中には FTA 支援者を作成担当者として扱い、設計担当者の力量向上に繋がらなかった場合もあった。さらに、FTA 支援者が協力して取り組む時には、問題解決まで達成しないと設計者が FTA を役立たないと考えてしまうため、FTA 支援者が設計対応に入り込むことになるので、客観的な指導がなかなか難しい場合もある。この実践指導には設計部署での FTA 支援の理解と支援者の客観的な指導スキルに、大きな課題があると考えている。

2. 4. 3 FTA の改善活動の効果と課題

FTA 改善活動での FTA のマニュアル化、社内データベース構築、FTA 教育および FTA 支援チームによる実践指導は一定の効果はあったと考え、FTA 教育目標であるランク取得実績を達成した時期に、効果確認を実施した。改善活動の効果確認は、図 2・11 に示すように、社内の FT 図を社内評価法によって、評価者を一人として評価した結果、FTA の改善活動前：平均 5 2 点、活動後：平均 5 7 点であった。平均点が 5 点上がったことと点数分布から FTA 改善活動の効果があることは確認できたが、基準点を満足できないものが、未だ 3 5 % もあり、満足できるものではない。この理由としては、活動内容から下記の 4 つの要因があると考えている。

- ①. マニュアルは基本的な手順しか記述できていないので、すべての技術問題に対応できない
- ②. 社内データベースの検索は FT 図の頂上事象で行うため、同様な FT 図がない場合がある
- ③. FTA 教育は設計者の中間以上をターゲットにしているため、理解ができない受講者が約 1 0 % 程度でしてしまう
- ④. 製品システムが複雑となっているため、FT 図作成の難易度が高くなっている

講座の効果や日々のFT図作成支援業務から上記が挙げられるが、限られた時間と工数の中で、設計者のFT図レベルをさらに上げるためには現状の改善活動（知識教育）だけでは限界がある。マニュアル、教育ではケーススタディであるため、実践時には設計者個々の能力が問題となり、データベースや教育の目的と内容も理解しない設計者が作成したFT図はまず使えないものとなる。さらに、実際の製品はシステムが複雑となっており、分業化が進んでいるため、各領域の設計が作成したFT図の精度がばらつくことは予想される事態である。これらは、製品の複雑なシステムを分析するための大きな課題と考えている。したがって、一般的な改善活動方策では十分に解決できない課題が、FT図作成にはあると考える。

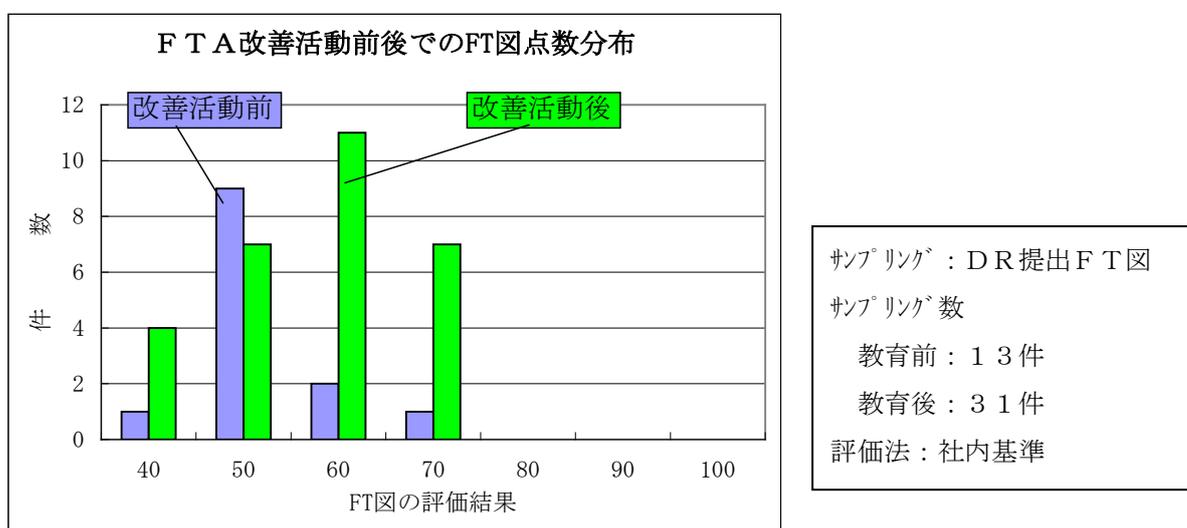


図 2・11 FTA 改善活動の効果

2. 5 設計におけるFTAの有効性と課題

2. 5. 1 設計におけるFTAの効果と問題点

設計段階、及び製品の問題解決の早い段階にて、設計者がFT図を作成することは、設計の最終ゴールである設計パラメータ（設計図の寸法、公差、仕様など）の決定を目標とした思考プロセスを踏むことができる。すなわち、設計段階で新しい機構の部位を設計する場合、従来の設計実績が使えないため、その部位の詳細な設計検討が必要となる。設計者が制約条件のもとに必要な設計

機能をもつように、設計の仕様、寸法、及び公差を決定するために、工学的な知識を用いて新しいの機構の FT 図を作成し、FT 図でコントロールすべき設計パラメータを抽出することは、設計品質の維持、向上に有効である。設計段階に FT 図を用いて、論理的に思考することは抜けを防止すると同時に、FT 図をもとにした開発部門、生産部門、及び部品サプライヤーとのコミュニケーションに有効であり、何故、設計で厳しい寸法、公差、仕様などを規定する必要があるかを説明し易い。さらに、設計者の思い込み防止としての論理的な思考のトレーニングにもなり、抜けのない設計と設計者の育成に役立つと考えている。

また、品質問題解決の場合には、科学的な原因究明としての仮説検証法（QC ストーリー）の要因分析として FTA は有効であるとされており、企業では一般的である。問題解決過程において、すべての要因を抽出して、それらを丹念に検証していくことで、正確に根本原因を究明し、有効な対策ができる。その際にも、設計者は何故、不具合が出るのかを論理的に FT 図を使って技術問題を思考することが、設計段階と同様に、設計者の育成には欠かせないと考えている。

しかしながら、設計にとって、FTA は良い面ばかりだけではない。FT 図作成は設計者の思考による判断をもとにしているため、その質と作成工数に個人差が大きい。FT 図は課題によっては FT 図が膨大となってしまうため、FT 図のチェックと修正の作業が多く発生することが少なくない。FT 図に工数がかかり始めると、設計者は頭の中で FT 図の要因を省く傾向にあり、設計 DR での指摘を受けて、さらに工数がかかるとの悪循環を繰り返すことがある。設計段階、製品問題解決のときに、設計者に FT 図は有効であるが、FT 図の質向上と作成効率が、FTA を用いた製品設計には大きな問題であると言える。筆者自身の経験からも設計作業の効率が継続的に改善されていかないと、有効である設計プロセスとツールも使われないことが多く、FTA を使ったプロセスとツールも効率の改善が必要である。設計の仕事は忙しく、設計者の新陳代謝も激しいので、継続的な FTA 教育は重要であるが、前述のような教育の実施だけでは十分ではないと考えている。

2. 5. 2 設計者における FT 図作成の問題点

ジャトロコでは新規製品の開発プロセスに、前述の P・FTA-D・QFD 手法を採用し、設計の変更点に対して、FTA ひとつである P・FTA を用いており、FTA を製品設計、製品の問題解決における重要な解析ツールとして位置付けていることは前述した。開発プロセス時の FTA の指導、及び FTA の改善活動で、設計者における FT 図作成には事象の抜けがないことを目標とすると、下記の課題があることが分かった。一般的な企業でも同様なことが、設計者には起きていることが推定される。

【 FT 図作成上の問題点】

- ・ FT 図の作成には幅広い知識、深い専門性が要求されるため、若手には作成が困難である。
- ・ ベテラン設計者は、過去に経験した製品設計や製品の問題に思考が引きずられるため、論理的で抜け・漏れのない FT 図を作成することが難しい。
- ・ 実業務での FT 図は、複雑で大規模となるため、抜け・漏れの確認と修正が、人の力では難しい。
- ・ FT 図の完成までには、新規 FT 図作成、上位者のフィードバック、修正のサイクルを繰り返す必要があるため、工数と日数が掛かる。

FT 図作成には対象とするシステム、機械構造、制御システム等の理解、その事象定義、及び事象展開には工学的知識、専門性が必要であることは言うまでもない。一方、ベテラン設計者は、過去に自分が経験した不具合事象のみを FT 図に記述することが多く、それ以外の事象の抜けがあり、上位者のフィードバックを受けながら試行錯誤を繰り返している。これは専門性と設計権限を有するベテラン設計者にとっては、過去に経験したものや思いついたものが問題の要因であるとの思い込みが強く、業務の忙しさからも他の要因を考えられない。また、違うと思ったものは省略する傾向にある。そのため、FT 図にもこのような思い込みの思考過程がツリー図に記述されることが多い。設計現場では、ツリー図の論理性の欠落、事象のジャンプが起きており、MECE [Rasiel,2006] でない FT 図ができてしまうのが現状である。これらは、心理学でも言われている過去に強く経験した事象に、設計者の思考が引きずられる現象と考えている [市川, 1996]。人間の思考は過去に強く経験した記憶に影響されるとの理論であり、まさにベテランの設計者は、過去に苦勞し、強い印象をもった経験を FT 図の上位階層に書く傾向があり、FT 図の論理性が崩れることが多い。

この状況を畑村氏は著書〔畑村，2000〕の中で、図 2・12 のように説明している。人が意識して思考する思考平面に、さまざまな経験、生き方、知識、好みなどの情報が落ちてきて、思考する道筋の邪魔をするか、止めてしまう。つまり、人が物事を考えるときには、START から順序立て GOAL を目指すが、それを経験値が妨げるのである。これは、問題解決経験が経験値となり、製品設計での不具合要因分析では、検討不十分となることがある。GOAL が経験値と一致するならば、問題は早期に解決するが、GOAL が経験値と一致しない場合は、これが思い付きとなり、経験、好み、カンなどで、設計者の思考がぐるぐる回るか、止まることが容易に予想される。これらから、‘人間の考えは思い付きである（論理的でない）’ということが、人間の特性（頭の構造）であると説明できる。人は柔軟な発想が可能であるという良い面もあるが、複雑な設計の検討項目を論理的に考えることが難しい。この状況を防止するためにも、設計者には FT 図の作成を要求しているが、上記の状況が FT 図の事象展開に現れるのが現状である。

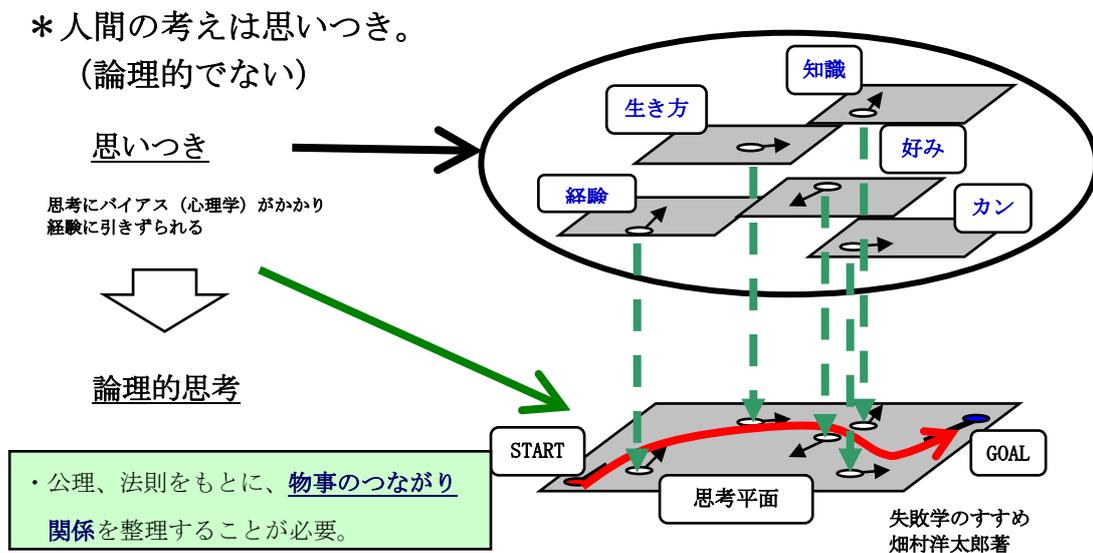


図 2・12 人間の思考モデル〔畑村，2000〕

また、実務で作成した FT 図はシステムが複雑なほど膨大となる傾向にある。これは、システムが電子制御、油圧制御によるシステムであると、さらに複雑になり、昨今のシステム課題の FT 図は末端事象が数百、数千を越えるものさ

えある。図 2・13 に実際にジャトコで作成したシステムの問題を対象とした FT 図を示す。この FT 図はゲート数が 193、最終の基本事象が 336 もあり、A0 版にプリントしても事象が読めないほどである。この FT 図作成には、ユニット不具合の分析、設計検討として、システム設計、ハード (パワートレイン) 設計、油圧設計、電装品設計、制御設計の 5 部署 5 名の設計担当者が分割して担当し、約 1 ヶ月以上をかけて作成したものである。設計担当者は分割した FT 図を上司、FTA 支援者に確認してもらい、多くの時間と工数がかかっている。また、FT 図の作成には確認、修正のサイクルが多くかかるため、トータルで作成工数、確認工数と完成までの日数が設計にとって、大きな負担となっている。したがって、FT 図作成の効率化と質の向上を両立できる支援システムの開発が望まれる。

2. 5. 3 設計における FTA の課題定義

ここでは、前述のジャトコにおける FTA の改善活動、設計における FTA の効果と問題点の考察から以下の課題を設定する。

- ①. 設計者による FT 図の精度ばらつき低減と作成効率の向上の両立
- ②. 製品システムの複雑化に伴う FT 図に対する仕組みの構築

上記課題を設計者自身の思考にて、①、②をさらに向上させる仕組みを作ることが必要であり、従来のマニュアル化、教育、社内のデータベース整備だけでは十分でないと考えている。前述の品質問題対応で述べたように、精度が悪く、抜けのある FT 図を用いて原因解析を行うと、作業のやり直しとその停滞を招くため、設計部門が作成した FT 図に沿った仕事をしなくなる。また、FT 図の作成作業に多くの工数がかかる場合は、時には FT 図作成を後付けとする設計者も出てきてしまう。したがって、上記①、②の課題は両立することが必要であり、本論文での研究目標とする高信頼性設計における FTA の課題と定義する。

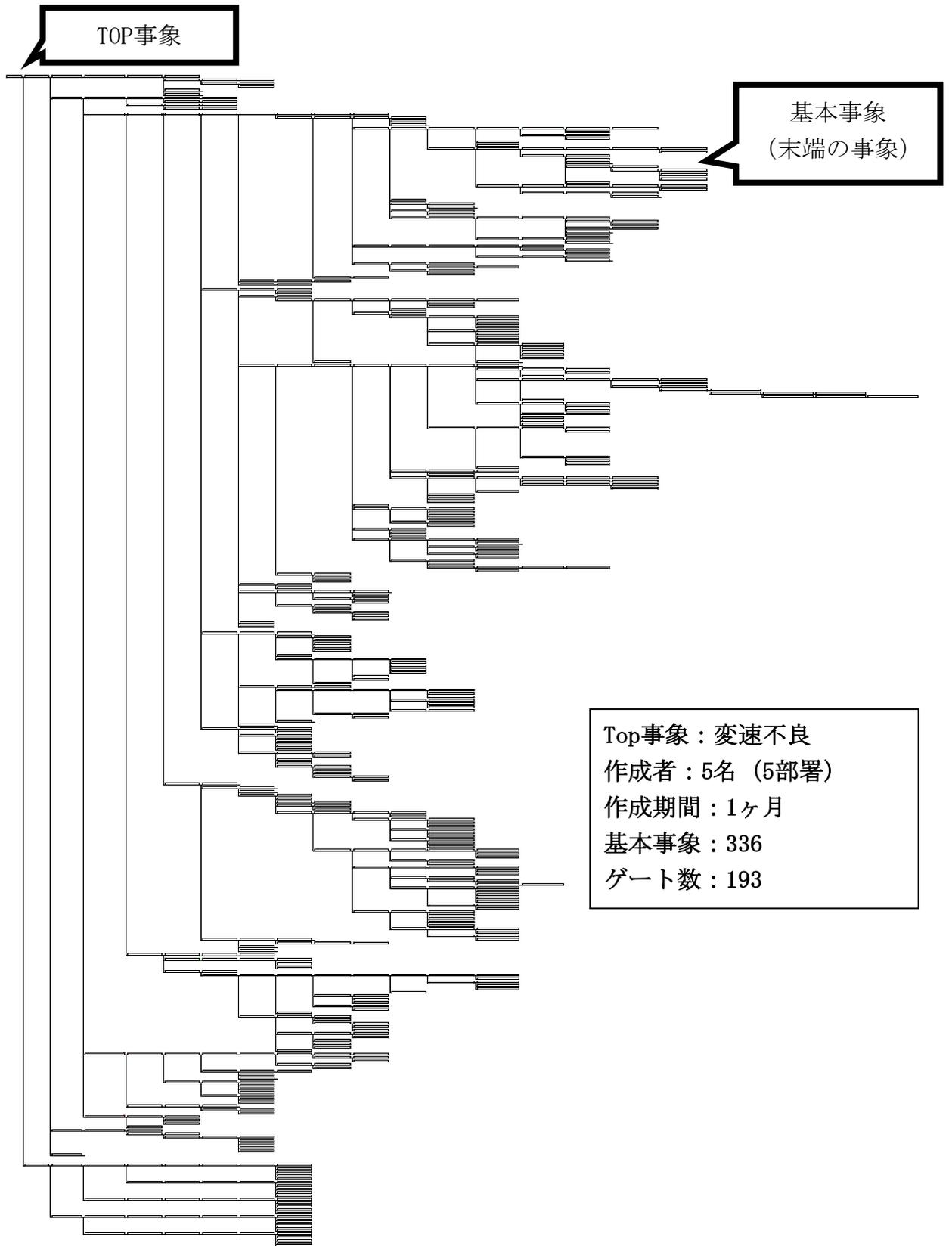


図 2・13 実務での FT 図の事例

第3章

FTA 支援システムの提案

3. FTA 支援システムの提案

本章では、製品設計における FTA の課題を解決するため、設計知識マネジメント研究を応用した FTA 支援システム（本システムを Computer Aided FTA から別名、FTAid と呼び、本文では FTAid と略する。FTAid は、商標登録済である。）を提案する。本システムは、先行研究で述べた東京大学の物理量次元インデクシングを FT 図作成支援に採用し、その支援手法を検討した。また、物理量次元インデクシングでは難しい課題であるシステム系、制御系の支援も考察し、FTAid を以下に提案する。

3. 1 FT 図作成支援手法の提案

3. 1. 1 FT 図の分類定義

FTA は故障解析や故障確率を算出する目的で開発され、故障の要因を樹形図である FT 図によって、論理的に各事象を展開し、解析する手法である。FT 図は論理性を追求するため、単一部品の故障解析でも、大規模になることが少なくない。多くの部品で構成され、電子制御により成り立つ大規模なシステム製品の不具合では、制御系か、機械系の部品か、または、最初に故障した部品によって故障要因が、まったく異なるものとなる。したがって、そのようなシステム製品の FT 図はさらに大規模なものとなり、人の力では事象展開の確認、修正が難しくなる。実際には、設計者が扱いやすい大きさとするため、FT 図を下記の分類を定義し、設計機能部署ごとに分割して作成している。

- ・ システム系故障の FT 図
- ・ 機械系故障の FT 図
- ・ 制御系故障の FT 図

システム系故障の FT 図は、複数の部品や制御の間に起こる故障の樹形図と定義し、末端の事象は部品故障や制御故障とする。機械系故障の FT 図は、部品の破損、摩耗などの故障を頂上事象とする。制御系故障の FT 図は、電子制御、組み込みソフトウェアなどの制御系故障を表す FT 図とし、制御ロジックやその入力（センサーなど）を要因とする。上記の定義に従うと、図 3・1 のようにシステム系故障の FT 図は、機械系故障及び制御系故障の FT 図の頂上事象により、複雑な組み合わせで構成されると考える〔平岡、2011a、及び 2012a〕。

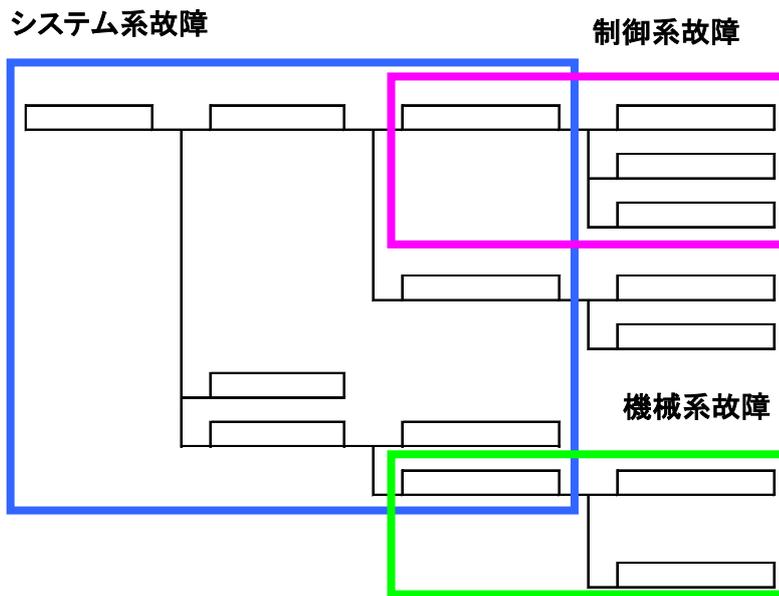


図 3・1 故障による FT 図の分類

システム系故障である‘変速ショック’を簡単な事例として、図 3・2 を示す。Automatic Transmission(自動変速機、以下 AT と略する)における‘変速ショック’は、車両システムでは AT の‘出力トルク上昇率が大’であるか、車両の’伝達系の減衰率小’に展開される。AT 内では、‘出力トルク上昇率が大’は AT の’クラッチ伝達容量の上昇率が大’がクラッチパックの問題として、クラッチ部品の頂上事象(機械系故障)につながる。クラッチ部品の展開事象には、’油圧上昇率大’が油圧システムの頂上事象(システム系故障)につながる。さらに、油圧アクチュエーターである電磁 SOL の’SOL 電流量大’(油圧と電流の特性が逆)の頂上事象につながるが、この後電気回路システム(システム系故障)、ソフトウェア(制御系故障)の頂上事象にもつながると考えている。ソフトウェア(制御系故障)の頂上事象をもつ FT 図では、ソフトウェアの構成上に論理式(加減乗除、IF 文など)が入ってくるが、それを FT 図に表すことは図のように可能であり、制御設計者は現在プログラムから FT 図を人手で行っている。この領域は現在研究中であるが、ソフトウェアによる自動作成が望まれる。したがって、問題現象を上記 3 つの FT 図の頂上事象をつなげて、組み合わせることで表現できる。実際には、最上流のシステム系故障 FT 図をもとに、各頂上事象を各機能設計部署で分担して FT 図を作成し、最後に統合しているのが現状である。

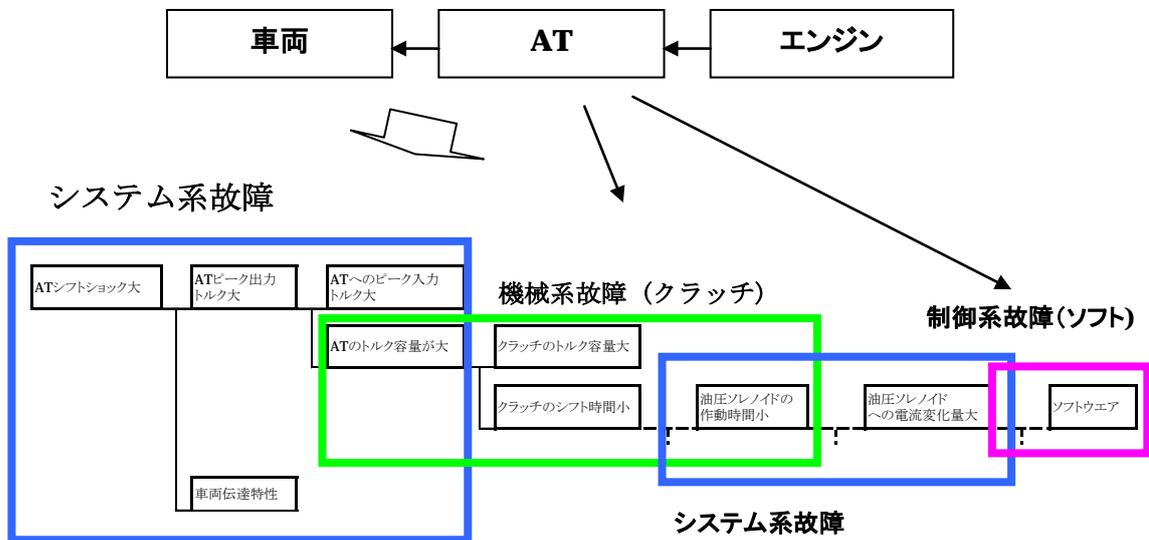


図 3・2 故障による FT 図の分類事例

本研究では上記の分類における FT 図の特徴から、図 3・3 の双方向矢印のような FT 図の支援方法を提案する。機械系故障の FT 図は物理現象に従うことが多いため、東京大学が先行で研究していた物理量次元インデクシング法による FT 図作成の支援（詳細は次章にて述べる）を行う。システム系、制御系の FT 図は、システム系、制御系のエンジニアがシステムや制御の振る舞いをブロック図によって解析していること、また FT 図作成の OJT による支援の時、エンジニアにブロック図を作成してもらうことが、設計者の思考にとって有効な FT 図の支援であった。このことから、システム系故障と制御系故障にはブロック図による FT 図の作成支援が有効である。これらから、大規模システム製品の FT 図作成支援に対しては、図 3・2 の支援手法を組み合わせることを提案する [平岡, 2011a、及び 2012a]。今後、システム設計の流れであるシステムズエンジニアリングズ [西村, 2011]、物理モデルシミュレーションを用いたモデルベース開発 (1 DCAE [大富, 2011]) などのシステム表記からもブロック図が有効であると考え、これらのシステム設計手法とのつながり、融合を検討することが、設計者の効率的な設計手法には必要と考え、設計知識マネジメントとして発展性があると考え。

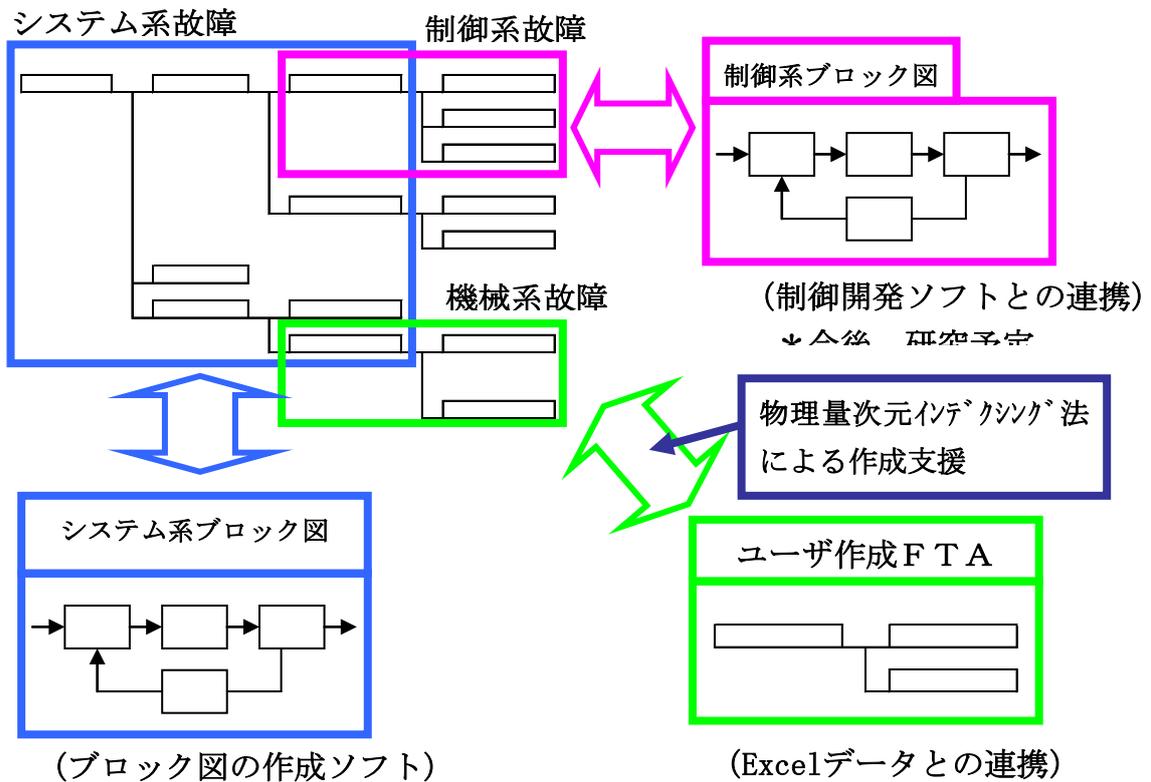


図 3.3 FT 図の支援手法の概略図

3. 1. 2 物理量次元インデクシングによる F T 図作成支援方法

i) . 物理量次元インデクシングとその応用

東京大学の先行研究である物理量次元インデクシングとその応用を以下に述べる。SI 単位系では物理量の単位は、7 基本単位（長さ[m]、質量[kg]、時間[s]、電流[A]、熱力学温度[K]、物質質量[mol]、光度[cd]）の組合せで表現できるため、物理現象を記述するすべての物理量は、7 つの基本単位のべき数の値で構成される 7 次元ベクトルで表現できる [村上, 2006]。

$$\mathbf{a} = [a_m \ a_{kg} \ a_s \ a_A \ a_K \ a_{mol} \ a_{cd}] \quad (3.1)$$

例えば、力[N] = [kg · m/s²] = [m¹ · kg¹ · s⁻²] は [1 1 -2 0 0 0 0] と表現される。これを物理量次元ベクトルと呼ぶ。この物理量次元ベクトル表現は、設計問題に現

れるさまざまな事象の普遍的、客観的な表現になりうることから、これらの情報のインデクス (index、索引付け) とする物理量次元インデクシングの設計知識マネジメントが東京大学の村上氏によって、先行研究として提案されている [村上、2006]。本手法は SI 単位系を用いることで物理現象の表現として個人、製品、組織、国、地域、技術分野に影響されずに、客観性、普遍性を有すると考え、技術分野を問わずに、グローバル展開する製品設計に有効である。製品設計で用いる設計パラメータのほとんどが物理量であるので、設計パラメータの抽出で用いる FT 図に対して、物理量次元インデクシングによる設計知識マネジメントへの応用が可能であると考えた。 [村上, 2008] [平岡, 2009]

ii) . 物理量次元インデクシングによる FT 図作成支援方法

製品設計の FT 図では、頂上事象に故障や問題事象を置く。その事象が物理現象に従って起こっていると考えられる場合は、頂上事象から展開される事象は、物理量で表現されることが多い。特に製品設計では、後工程である製造を考えると、図面寸法、仕様などの測れる物理量で最終的に表現するのは当然である。したがって、製品設計で作成する FT 図は、事象をできるだけ物理量で表現することが必要なため、物理量次元の応用が可能である。

物理量で表現される事象の展開では、上位事象の物理量次元が、下位事象の物理量次元で表現されないと、論理的な展開の必要条件を満たせない。すなわち、上位事象の物理量次元が、下位事象の物理量次元の乗除の計算で表現できるか、または同じであることが、抜け漏れのない展開である。

図 3・4 の事例のように、部材 A から荷重がかかり、部材 B に発生する応力が問題となる事例を考える。この場合の FT 図は図 3・4 のように展開され、‘応力が大きい’の事象には $[N/m^2]$ の物理量次元インデクシングが付加される、また、その下位事象には、‘荷重が大きい’ $[N]$ 、‘有効面積が小さい’ $[m^2]$ の展開ができ、上位事象の物理量次元インデクシングは下位事象の次元計算が一致することが必要である。また、‘有効面積が小さい’ $[m^2]$ の下位事象は、‘見かけの面積が大きい’ $[m^2]$ と ‘無効面積大’ $[m^2]$ の展開ができ、物理量次元インデクシングが上位事象と下位事象も一致する必要がある。この次元解析によって物理量次元インデクシングを用いて、事象展開の必要条件をコンピュータにて確認する。この確認を整合性検証という。

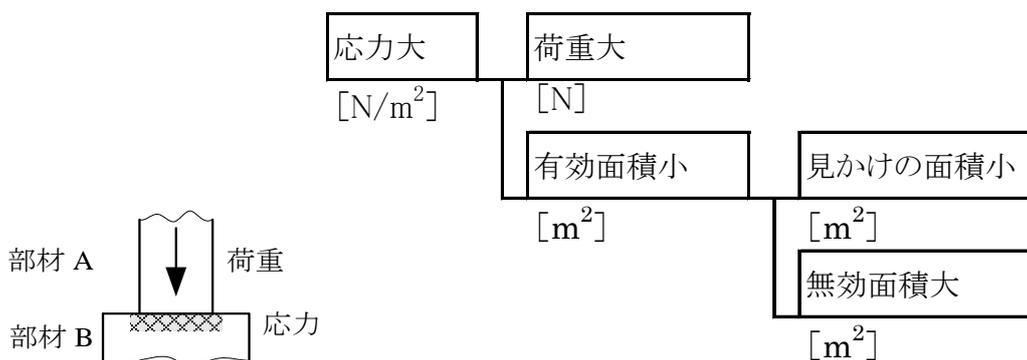


図 3・4 FT 図の事例

FT 図の各事象に物理量次元インデクシングを用いることで、物理量で表現される事象では、上位事象と下位事象の物理量次元ベクトルを計算によって、FT 図が正しく展開できているかの整合性検証から判定できる。さらに、各事象の物理量次元ベクトルをもとにしたインデクスによって、コンピュータによる検索が容易にできることから、FT 図の正確性だけでなく、データベースから展開候補の検索及び提示も可能である。

iii) . 物理量次元インデクシングを用いた支援プロセス

設計における FTA の課題を解決するため、物理量次元インデクシングによる支援手法を用いた新たな支援プロセスを以下に提案する。支援プロセスは、FTA の有効な特徴である ‘設計者が思考することを妨げないように’、コンピュータによる FT 図の自動生成ではない構成とする。すなわち、前述の支援手法の手順をもつ支援プロセスを検討する。

- ・コンピュータの整合性検証による FT 図の間違いの抽出
- ・コンピュータによるデータベースから展開候補の提示

FT 図作成支援プロセスのコンセプトから検討したコンピュータの支援プロセスを図 3・5 に示す。本プロセスでは、新規に作成した FT 図に、まず物理量次元インデクシングをコンピュータが物理量次元を絞込み、ユーザーがそれを選択して、各事象の物理量次元インデクシングを確定する。

各事象の物理量次元インデクシングの整合性検証によって事象展開の論理性を判定し、その結果を色で表示する。この表示は、グローバルな設計者がすぐに判別できるように、信号色（青色、赤色）を用いた。青色は上位事象と下位事象の物理次元が必要条件（上位と下位が同じ物理量次元であるか、上位と下位が計算で一致するか）を満たしていることを示し、赤色は満たさないことを示す。ここで注意すべきことは、本表示が論理的には必要条件であり、十分条件ではないことである。すなわち、赤色は間違いであるが、青色は必要条件を満たしているが十分条件ではない。

また、データベースとの事象展開の一致度も表示することとしている。過去に展開した事象との一致からも、正確性を把握する一助となる。ここでも、データベースとの一致度の表示は信号（青色、赤色、黄色）であり、‘青色：一致、赤色：一致するものはなし、黄色：一致はしないが類似するもの’である。これは整合性検証で間違いと判定されても、データベースとの一致度の表示をすることで、過去に作成したものとの比較から設計者が判断する支援プロセスとした。

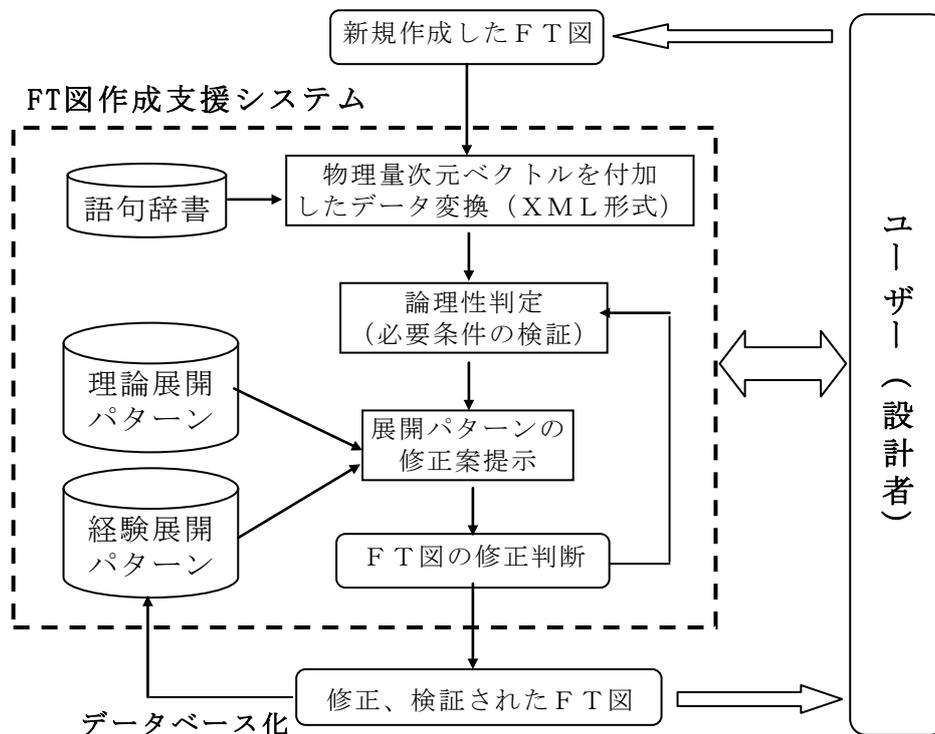


図 3・5 FT 作成支援手法のプロセス

間違っただ箇所では、データベースから事象展開と類似した展開パターンを検索する。ここでは、前研究（〔村上, 2008〕を参照）で定義した物理量次元による類似度を用いる。つまり、修正箇所とデータベースに登録されている展開パターンの物理量次元との類似度を算出し、その類似度の高い順から展開パターンをユーザーに提示する。これは物理量次元の類似度から計算しても、類似度がもっとも高いものが、事象展開に適切であるとは限らない。間違っただ事象展開では物理量次元の必要条件を満たしていないので、類似度の値は正確ではないと言える。このため、検索結果を類似度の高い順にコンピュータで表示し、ユーザーである設計者の判定に委ねることが、適切な事象を展開できると考えた。このやり方を筆者はインターネットの検索エンジンからヒントを得たが、表示方法等に工夫が必要とも考えている。この支援プロセスによって、ユーザーは、提示された展開候補の中から正しいと判断される展開パターンを選び、事象展開を修正することができる。

データベースは、過去の設計情報を活用する観点から、2つのデータベースを用いる。一つは過去作成した FT 図の展開パターン（経験的展開パターン）であり、もう一つは物理式・方程式のような教科書に掲載されている展開パターン（理論的展開パターン）のデータベースである。企業におけるノウハウである過去作成した FT 図を入れるデータベースを作成することで、過去の不具合で解明した FT 図の展開も、ノウハウとして参照が可能とした。また、教科書や論文などの公理や法則の展開パターンも別に参照することができ、理論との整合性も確認できるようにした。さらに、修正が完了した FT 図をデータベースに蓄積することにより、FT 図というノウハウをデータベース化することが可能である。これは、新たなデータベースを構築することなく、実際の設計行為で作成し、論理性の検証ができた FT 図を登録することで、FT 図のデータベースの構築が順次可能であることを意味している〔平岡, 2009〕。

3. 1. 3 システム系故障の FT 図作成支援方法

システム系課題の FT 図の作成支援方法について述べる。システム系設計の FT 図作成は、ブロック図を設計者に書かせて、それをもとにした指導が可能である。システム設計者は、設計の思考法としてブロック図をもとに検討しているため、この方法がシステム系の設計者の思考整理に最も有効であることから、ブロック図をベースとしたシステム系課題の FT 図作成支援を採用した〔平岡, 2011a、及び 2012a〕。

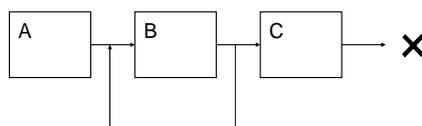


図 3.6 ブロック図

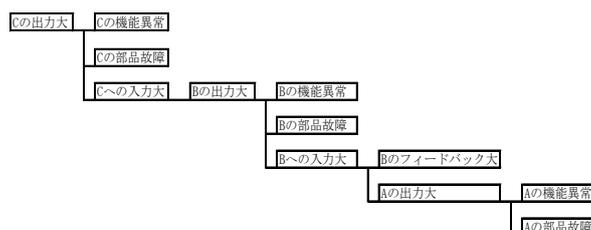


図 3.7 図 3.6 ブロック図からの FT 図

例えば、図 3.6 のような入出力関係を示したブロック図があり、「ブロック C の出力が大きすぎる」という課題の FT 図を作成するとする。この場合の FT 図作成における基本的な考え方は、「C の出力が大」の下位事象は「C の機能故障」「C への入力が大」であり、「C への入力が大」の下位事象は「B の出力が大」・・・、というように、ブロック図の入出力の順番に従って展開していく(図 3.7 参照)。これにより、ブロック図をもとにした、抜けのない FT 図を作成することが可能であると考えている。

ブロック図はシステムを俯瞰でき、さらに機械設計者、制御設計者、システム設計者の思考を共有できるツールと考えている。機械設計者はものを主体とした思考方法で、メカニズムを細かく考える傾向が強い。企業でも、機械設計者には、部品に対する力学的な見方から、抜けのない思考を要求している。しかしながら、制御設計者は複雑なプログラムを階層的な思考で理解するため、ブロック図やフォローチャートを作成することで、システムをブロック単位で

考え、個々の部品を思考することは少ない。一方、システム設計者は機械設計者出身が多く、システム問題を考える際に、部品単位にシステムを検討する傾向があり、システム課題の検討が難しい場合がある。その際に、システムの俯瞰を目的に、システムをモデル化したブロック図を描かせ、システムの故障要因を FT 図に作成するように指導し、設計者の思考整理を行っている。また、ブロック図と FT 図は制御設計者だけでなく、機械設計者、システム設計者にも直感的に理解できるので、設計間のコミュニケーションにも役立つ。したがって、ブロック図は、システムの俯瞰による思考整理の効果と各設計者間のコミュニケーションに有効であると考えている。

3. 1. 4 制御系故障の FT 図作成支援方法

制御系故障も同様にブロック図をもととした FT 図作成の支援を行っている。制御系故障のブロック図は、各ブロックの入出力の他に、ブロック内に関係式や条件分岐 (if 文) が含まれる。制御のブロック図にある関係式、条件分岐を設計機能として扱うことで、システム系故障と同様にブロック図をもとにした FT 図展開支援が可能であると考えており、現在研究中である。

制御開発ではモデルベース開発として、モデルをブロック図で作成して、オートコーディングするプロセスを採っている。この際に、制御ブロック図を FT 図に変換することで、設計要因、設計パラメータ分析が可能となると考えるが、制御要因をすべて出すと項目が膨大となるので、要因絞込み、検証の自動化などの後処理まで検討する必要がある。この領域の設計知識マネジメントは、今後の研究課題と考えている。

3. 2 FTA 支援システム設計

3. 2. 1 システム要求と目標値

ここでは、第 2 章にて定義した企業における FTA の課題、企業内の FT 図作成の手順から FTAid における FT 図作成支援の開発目標値とシステム要求を検討する。まず、第 2 章にて検討した FTA の課題は以下であり、これから目標値を明確にする。

【FTA の課題】

- ・ 設計者による FT 図の精度ばらつき低減と作成効率の向上の両立
- ・ 製品システムの複雑化に伴う FT 図に対する仕組みの構築

システム開発の目標は、FT 図の解析精度向上と作成工数削減である。FT 図解析精度は FT 図の社内評価基準以上が必要であるが、すべてを社内評価基準以

上とするのは、本システムでは設計者の判断によるところが大きいので、難しいと考え、解析精度向上と作成工数削減の両立を目標とし、工数削減のみを数値目標とした。作成工数削減は、FTAid の効果と使いやすさを表した指標であり、システム開発目標として適切である。

さらに、工数削減の数値予測を行い、FTAid の工数削減の数値目標とした。FT 図の作成は膨大なため、上司、支援者の確認、修正指示が約 3 回以上は入ることが、ライン設計からのヒアリングでも明らかであった。そこで、システム開発によって FT 図作成時間と上司のフィードバック回数を半減させることが可能であると推定した〔平岡, 2010〕。今回のシステム開発インパクトも考え、システムによる FT 図作成工数の 50% 減を目標とした。したがって、システム開発の目標値は下記とする。

- ・ FTA 支援システム (FTAid) を使うことで、FT 図作成工数▲50%低減
- ・ 工数削減と解析精度向上を両立させる

ジャトコでの実際の FT 図作成手順から、システムの要求を以下に検討する。まず、ジャトコでの FT 図作成手順を図 3・8 に示す。設計者は必要な資料を揃えると同時に、現存のファイルサーバー内にある Microsoft 社の Excel フォーマットの FT 図から、作成したい FT 図に頂上事象が類似した FT 図を選択する。その後、参照した FT 図をもとに、Excel ソフトウェアにて修正、編集を行い、1 次案を作成している。また、設計者は作成した FT 図をプリントして確認する場合もあるが、実務での FT 図は大きいので、PC 上にて拡大、縮小を繰り返して確認している。その後、上司、または FTA 支援グループに送付して、フィードバックをもらっているが、ここでも何回も修正を繰り返す場合が多い。

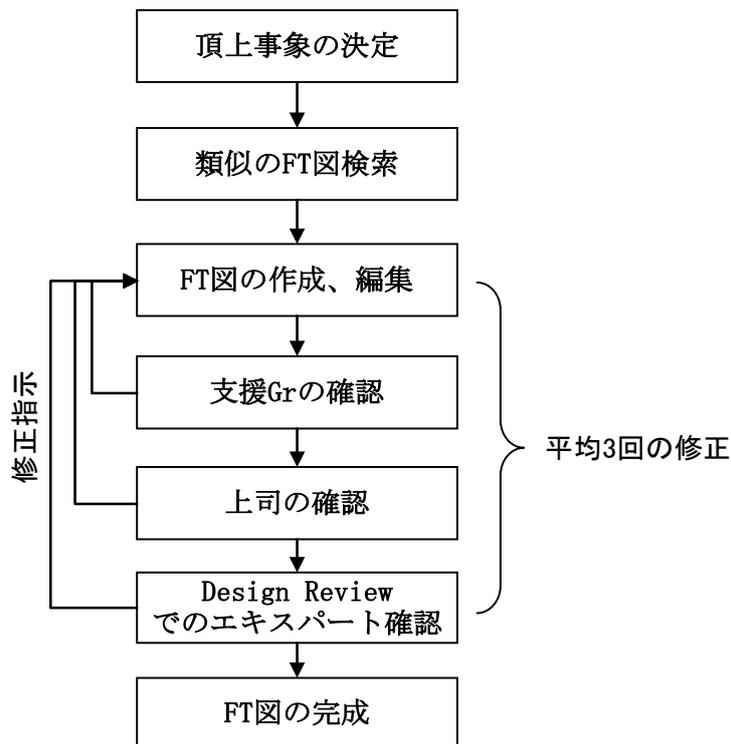


図 3・8 実際の設計における FT 図作成手順

実際の設計における FT 図作成から、システムに要求したい項目を検討すると、下記のようなになる。

【実際の設計における FT 図作成手順からの要求】

- ・実務の FT 図は膨大なため、設計者が FT 図を PC 上で確認しやすいこと
- ・既存の FT 図のインポートが可能なこと (Microsoft 社の Excel フォーム)
- ・フィードバックの回数を減らすため、PC での間違いを指摘できること

したがって、これらと前章に挙げた支援手法から、FTAid に対する要件を以下の項目とする。

【システムの要件】

- ・ユーザーは設計者とする
- ・FTA 支援システム (FTAid) で、FT 図展開の間違いが指摘できること
- ・間違いの修正案が指摘でき、FT 図が膨大でも編集が容易なこと
- ・市販ソフトウェアとの連携、インターネットに対応ができること

3. 2. 2 FTA 支援システム構成

FTAid の目標値、システムの要件、及び FT 図作成支援手法から、物理量次元インデクシングによる支援、ブロック図による支援のシステム動作を検討する。図 3・9 に本システムでのユーザー動作とシステムの動作を示す。実際のシステム動作について、図 3・9 の①～⑦の詳細を以下に述べる。

①. Excel 形式の FT 図インポート (XML 形式)

FTAid におけるデータ形式は、物理量次元インデクシングのデータ形式や今後の発展性を考慮し、XML 形式 (詳細のタグは③で述べる) としている。過去の開発にて作成した多数の FT 図があるので、設計の財産である FT 図をインポートすることが必要である。この FT 図は忙しい設計者にとって、参考とするために必須である。また、現状でも Excel にて FT 図を作成しているため、設計者にとって Excel で作成した FT 図を FTAid にインポートできるような段階的な措置も必要であった。そこで、社内にある FT 図を集約、分析し、図 3・10 のようなパターンでも自動で変換できるようにした [古川、2011]。

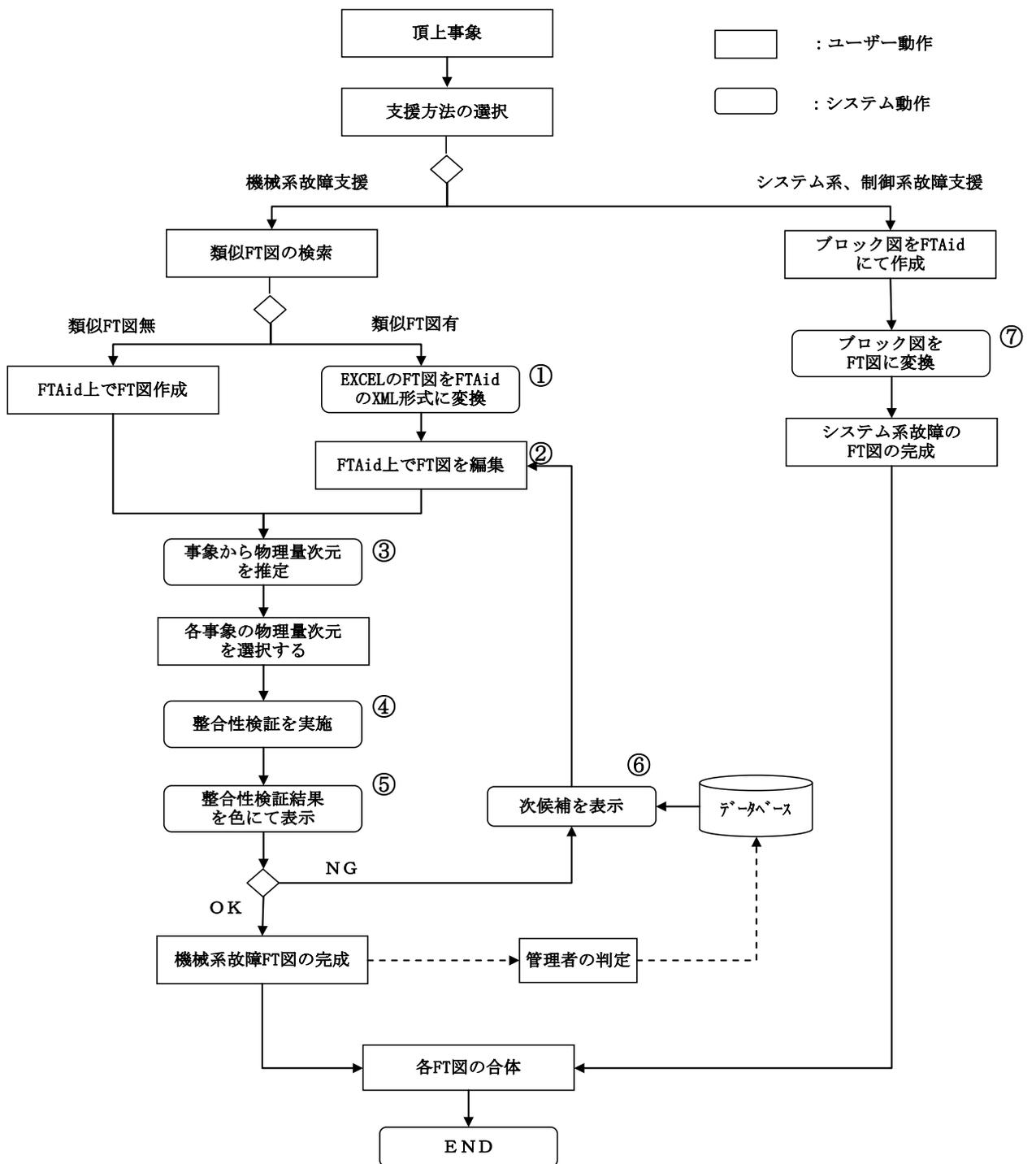


図 3・9 FTA 支援システムのシステム動作

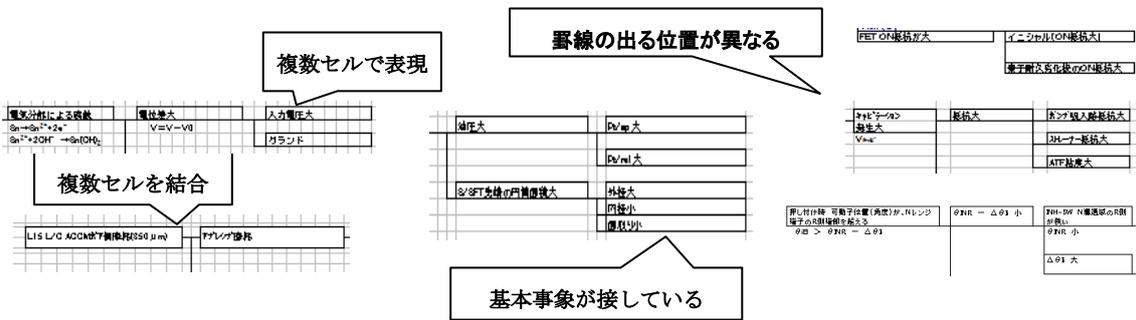


図 3・10 FTAid インポート機能の Excel 事例

②. FTAid での FT 図の編集

従来、設計者は FT 図の作成を Excel にて行っていたため、Excel と同等以上の操作性、すなわち使いやすさを要求されるので、Excel で通常使われる操作が可能であることとした。すなわち、コピー、ペースト、切り取り、UNDO/REDO などの操作をクリック、ドラッグアンドドロップで可能にした。また、Excel よりもツリー構造を見やすく、操作性を向上させるために、自由に折りたたみができるような表示方法を取った (図 3・11) [古川, 2010]。

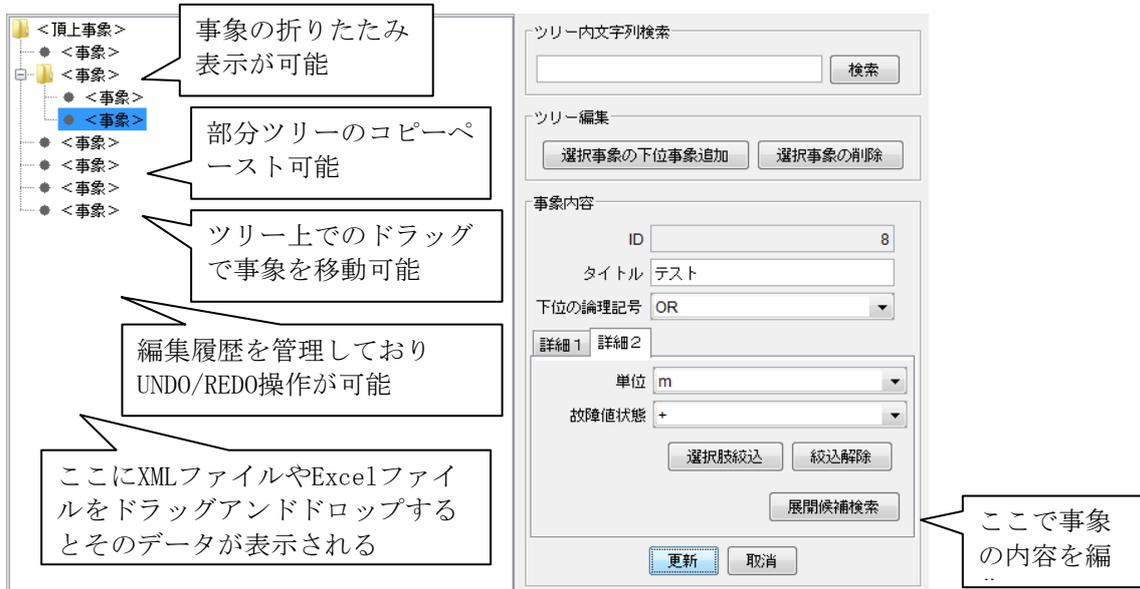


図 3・11 FTA 支援システム (FTAid) における編集

③. FT 図の事象から物理量次元インデクシング（物理量次元を付加させる）

i) FT 図の XML 表現 [村上, 2009]

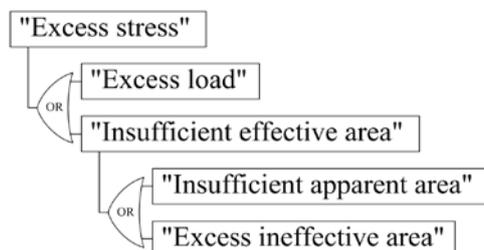
本研究ではシステム要件の中でもあるように、インターネット環境でも設計知識である FT 図を共有するため、FT 図や設計知識を XML (eXtensible Markup Language) 形式による記述を採用している。表 3・1、表 3・2 に FT 図や物理量次元インデクシングの記述に用いる XML タグの定義を示す。図 3・13(a)の FT 図が XML 形式によって、図 3・13 (b) のように記述される事例を示す。

表3・1 FT図の XML タグ

XML タグ	内容項目
<ftree> ... </ftree>	FT 図
<node> ... </node>	FT 図のノード.
<or> ... </or>	論理的 OR (論理和)
<and> ... </and>	論理的 AND (論理積)

表3・2 物理量次元インデクシングのXML タグ

XML タグ	記述内容
<fq> ... </fq>	故障物理量（故障に関係する物理量） ：物理量次元としての SI 単位を定義している “unit” を属性としてもつ.
<fv> ... </fv>	故障値 ：“val” の属性をもち、故障の特性値が大きい 場合は “+”、小さい場合は “-” の属性をもつ



(a) FT 図の事例

図 3・12(a) 物理量次元インデクシングを用いた FT 図

```

<ftree>
  <node>
    <fv val="+">Excess</fv> <fq unit="N/m^2">stress</fq>
  </node>
  <or>
    <ftree>
      <node>
        <fv val="+">Excess</fv> <fq unit="N">load</fq>
      </node>
    </ftree>
    <ftree>
      <node>
        <fv val="-">Insufficient</fv>
        <fq unit="m^2">effective area</fq>
      </node>
    <or>
      <ftree>
        <node>
          <fv val="-">Insufficient</fv>
          <fq unit="m^2">apparent area</fq>
        </node>
      </ftree>
    <ftree>
      <node>
        <fv val="+">Excess</fv>
        <fq unit="m^2">ineffective area</fq>
      </node>
    </ftree>
  </or>
</ftree>

```

(b) XML による FT 図の記述

図 3・12(b) 物理量次元インデクシングを用いた FT 図

ii) FT 図事象の物理量次元を推定

FT 図に物理量次元インデクシングを応用するためには、各事象に対して物理量次元を付加させる必要がある。コンピュータによって、各事象を分析して物理量次元を自動で付加するためには、日本語分析（文節分析など）のソフトウェアを使う必要がある [村上, 2010]、ソフトウェアの使用権などの問題もあるため、企業での使用はすぐには困難であると判断し、簡易式の日本語分析から物理量次元を推定し、設計者に候補から選択してもらう方式を採用した。これは、各事象の文字列がまず部位、故障物理量（物理量を表す名称）、故障値の順にほぼなっており、日本語の並びを応用して、コンピュータが故障物理量を認識し、物理量次元を推定するシステムとした。例えば、‘ブラケット部材の応力が大きい’では、まず‘ブラケット部材’が部位、‘応力’が物理量を表す故障物理量、‘大きい’が故障値である。これを応用して物理量を推定し、物理量次元の候補を挙げて、選択してもらうように

した〔古川, 2010〕。

iii) 無次元の対応

物理量次元における課題は、無次元をどのように区別し、表示するかである。当初は、[]のようなアンダーバーでの区分とすることにしたが、支援プロセスの中でのデータベースからの次候補を検索する際に、無次元の区別ができないことが判明した。そこで、無次元の起源を表示する方式を検討した。例えば、摩擦係数は無次元であるが、その定義は摩擦力[N]と垂直抗力[N]の比率であるとの物理的な定義がある。したがって、摩擦係数を[N/N]とする無次元の定義を物理量次元で表示する。また、歪みも無次元であり、上述の定義から[m/m]であり、摩擦係数と歪みを区別することが可能である。これによって、無次元の物理量表現も区別が可能となり、以下のデータベースからの次候補検索に役立つ〔吉永, 2011〕。

④. 物理量次元による整合性検証〔村上, 2008〕

物理量次元インデクシングにおける整合性検証の処理方法は、ひとつの展開ゲート（図 3.1 の事例では〈応力大〉に対する〈荷重大〉と〈有効面積小〉、〈有効面積小〉に対して〈見かけの面積小〉と〈無効面積小〉）ごとに行い、コンピュータ内ではそれぞれの事象に付けた物理量次元インデクシングのベクトルを計算することによって、判定を行っている。上位事象の物理量次元ベクトルを \mathbf{a} 、下位事象の物理量次元ベクトルを \mathbf{b}_j とすると、

$$\mathbf{a} = [a_m \ a_{kg} \ a_s \ a_A \ a_K \ a_{mol} \ a_{cd}] \quad (3.2)$$

$$\mathbf{b}_j = [b_{j,m} \ b_{j,kg} \ b_{j,s} \ b_{j,A} \ b_{j,K} \ b_{j,mol} \ b_{j,cd}] \quad (j=1, 2, \dots, n) \quad (3.3)$$

この場合、上位事象と下位事象の整合性がある（MECE である）必要条件は下記の 2 つである。

- i) 上位事象と下位事象が同じ物理量をもち、上位の物理量が下位の物理量による加減演算で算出できることである。図 3.1 の事例では〈有効面積小〉に対して〈見かけの面積小〉と〈無効面積小〉が、これに当たる。すなわち、物理量次元では上位と下位の物理量次元が同じ場合であり下記のベクトル式が成り立つことを判定している。

$$\mathbf{a} = \mathbf{b}_j \quad (j=1, 2, \dots, n). \quad (3.4)$$

- ii) 上位事象の物理量が下位事象によって表すことができることであり、上位の物理量が下位の物理量による乗除演算およびべき乗演算にて算出できることである。図 3.1 の事例では〈応力大〉に対して〈荷重大〉と〈有効面積小〉が、これに当たる。すなわち、物理量次元ベクトルでは、下記の行列式の解 \mathbf{x}_j が存在するかである。

$$a = \sum_{j=1}^n x_j \mathbf{b}_j \quad (j = 1, 2, \dots, n) \quad (3.5)$$

$$\begin{bmatrix} a_m \\ a_{\text{kg}} \\ a_s \\ a_A \\ a_K \\ a_{\text{mol}} \\ a_{\text{cd}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{1,m} & b_{2,m} & & b_{j,m} & & b_{n,m} \\ b_{1,\text{kg}} & b_{2,\text{kg}} & & b_{j,\text{kg}} & & b_{n,\text{kg}} \\ b_{1,s} & b_{2,s} & & b_{j,s} & & b_{n,s} \\ b_{1,A} & b_{2,A} & \cdots & b_{j,A} & \cdots & b_{n,A} \\ b_{1,K} & b_{2,K} & & b_{j,K} & & b_{n,K} \\ b_{1,\text{mol}} & b_{2,\text{mol}} & & b_{j,\text{mol}} & & b_{n,\text{mol}} \\ b_{1,\text{cd}} & b_{2,\text{cd}} & & b_{j,\text{cd}} & & b_{n,\text{cd}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_j \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

上記のように、整合性検証を行うことで、FT 図の事象展開が必要条件を満たすかどうかをコンピュータで計算し、必要条件の確認を行う。

⑤. 整合性検証結果の表示

FT 図の間違いをひと目で認識できるようにするため、物理量次元による整合性検証の結果を信号色によって、表示させる方式を採用した。FT 図の膨大な展開図で間違いを即座に認識するためには、色による表示、特に信号色（青、赤、黄）は世界共通であるので有効である。そこで、整合性検証の結果である間違い箇所を赤色、必要条件を満足している箇所は青色、不整合の可能性のあるものを黄色で表示することとした。さらに、判定ができないものは黒色または灰色とした。但し、色弱の人にも認識できるように、黄色は実際にはオレンジ色としている（図 3.13）。

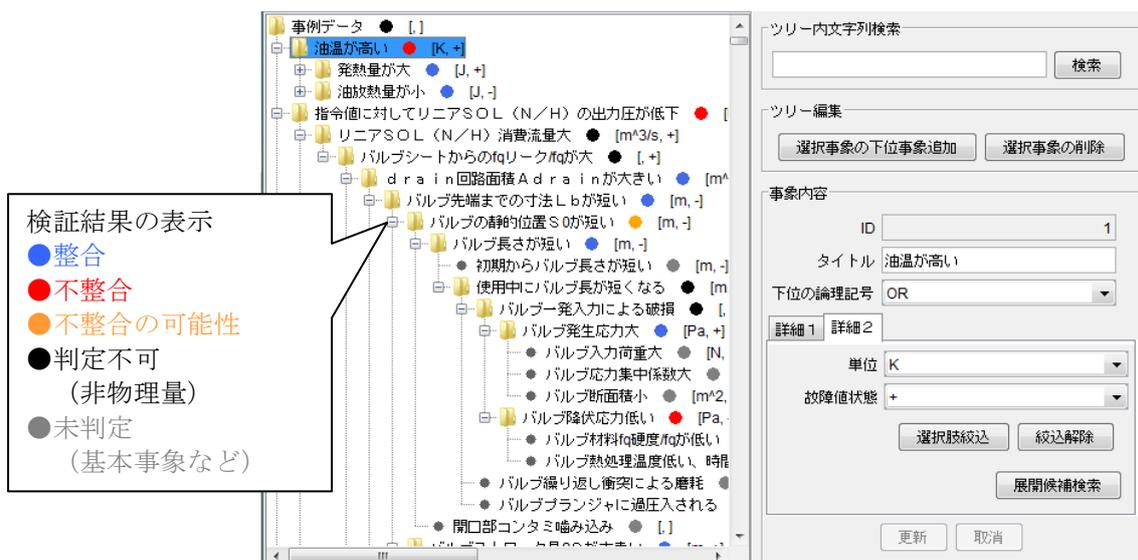
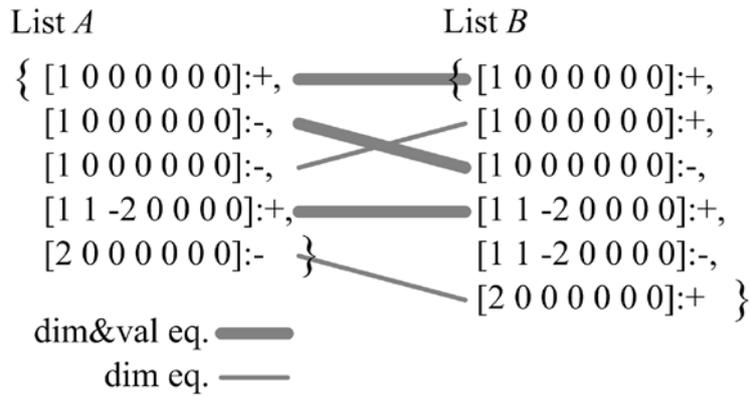


図 3・13 FTAid における整合性検証の表示方法〔古川, 2011〕

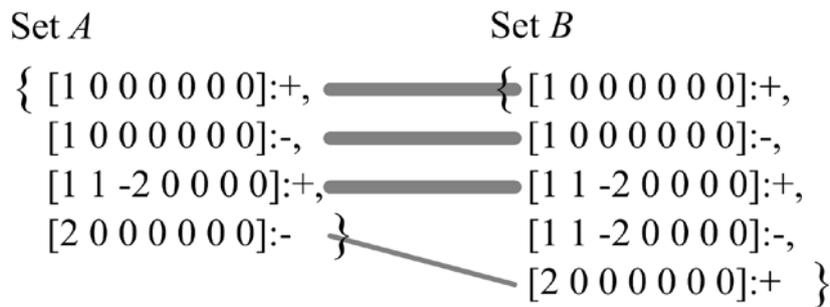
⑥. データベースから次候補の表示

間違った FT 図の展開の修正案である次候補をデータベースから表示するためには、データベースとの間で類似している度合いの指標をもって、検索する必要がある。そこで、物理量次元インデクシングから類似度を定義し、それを指標に順番を付けて次候補を順番に表示し、設計者に選択してもらう方式を採用した。これは、インターネットの検索エンジンをイメージして、コンピュータが次候補を類似度の高い順に提示するやり方である。

データベースの展開パターンと FT 図の対象展開パターンの比較によって、以下のように類似度を定義する〔村上, 2009〕。類似度の指標は、物理量次元インデクスの次元と故障値を比較して、数値化を行う。図 3・14 (a) のように、物理量次元と故障値 (図では、“+” または “-”) とともに等しい排他的な対 (図中の灰色太線) の数 e_{Ldv} 、それ以外では物理量次元のみ等しい排他的な対 (図中の灰色細線) の数 e_{Ld} 数え、長いほうのリストの要素数 n_L に対する割合 r_{Ldv} 、 r_{Ld} を計算する。



(a) 物理量次元インデックスリストとしての類似度



(b) 物理量次元インデックスの集合としての類似度

図 3・14 物理量次元インデックスのリスト事例

また、前述のように、物理量の種類と数をリストとして比較するのではなく、物理量次元、故障値ともに等しい物理量次元インデックスは、1 要素としてまとめた集合を作成し (図 3・14(a)→(b))、物理量の種類、構成のみを比較する。図 3・14 (b) は、リスト比較の場合と同じ対をなす数 e_{Sdv} 、 e_{Sdv} を数え (添字 “L” はリスト、“S” は集合を示す)、大きいほうの要素数 n_S に対する割合 r_{Sdv} 、 r_{Sd} を求める。これは、対象とする故障事象では同じ事象によって、複数で構成される (力、面積など) 場合があり、数は違うが種類、構成が同じなので、本質的には類似している展開パターンと判断できる。したがって、割合 r_{Ldv} 、 r_{Ld} 、 r_{Sdv} 、 r_{Sd} の大きい順にデータベースから次候補を検索し、ユーザーに展開パターンをコンピュータが提示する。

⑦. ブロック図の作成及び FT 図変換 [古川,2012]

ブロック図はあるシステムを構成する機能間の関係を表したもので、システム設計に用いる代表的なツールである。FT 図を作成しようとするシステムのブロック図は、機能（ブロック）、変数、コネクタの要素で構成され、機能（ブロック）には機能を表す名前と変数及び関係式があるとした。図 3・15 のブロック図のように、機能 A には入力 A0 と出力 A1 があり、それぞれに単位、関係式が入力可能となっている。また、機能 B の入力 B0 と機能 A の出力 A1 が接続される。これをコネクタと呼んでいる。これらは自由にコンピュータ上に記述でき、さらに、図 3・15 のようにシステムでは、ブロック図の出力に故障があると考えられるので、出力と故障値を選択し、FT 図を変換する。これは、3・1・3 に示したように、後ろから入出力と機能問題をたどることで、ブロック図を FT 図に変換している。システム故障には本方式が有効であるが、制御系故障については、今後の研究課題である。

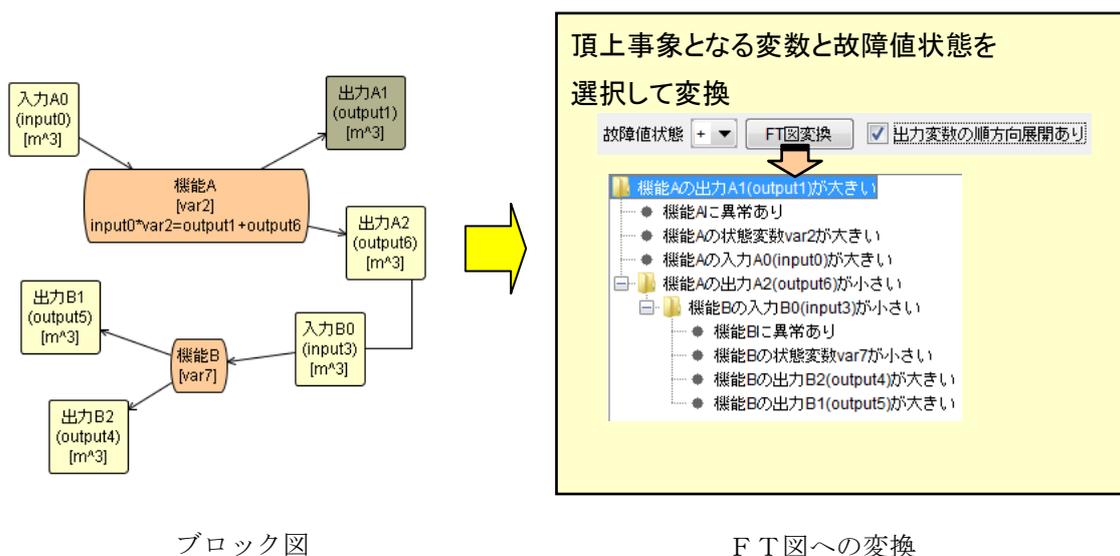


図 3・15 ブロック図から FT 図変換

3. 3 故障現象と FTA 支援システム

実際の製品開発で想定される故障現象に、FTA 支援システムの支援機能が対応可能かを考察する。

故障現象の中には、故障メカニズムが学術的、数学的に解明されているものと現象論的に解明されているが、未だ十分にメカニズムが解明できていないものがある。前者は数学的にも解明されているため、故障に関する予測可能な方程式をもつ。材料力学的な考え方で作成する破損などの故障現象（図 3・16）が、代表事例である。後者はメカニズムが十分に解明されていないが、現象解明は進んでおり、故障要因のパラメータは抽出できているものがある。この場合、方程式は係数で合わせ込んでいるため、係数の次元はパラメータ次元の逆算で規定されている。この事例としては、トライポロジーの摩耗（図 3・17）がある。図 3・17 の左側の FT 図では、摩耗を現象的に捉えて、摩耗要因による方程式を設定している。図 3・17 の右側の FT 図では、故障モード分類と経験則による要因パラメータを抽出している。

また、化学反応は化学式や構造式で表されるので、メカニズムによる方程式とはなっていない。腐食、潤滑（添加剤）、劣化、燃焼はメカニズムが化学反応であるため、化学式の単位系はすべての項で mol または g であり、物理量次元による整合性検証が有効でないと予測される。

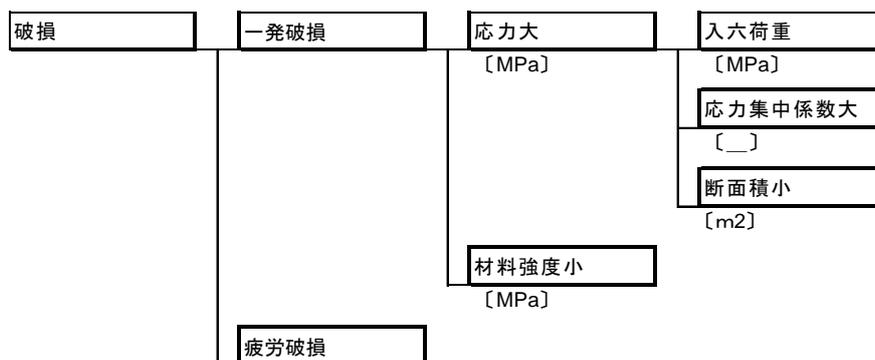


図 3.16 破損の FT 図事例

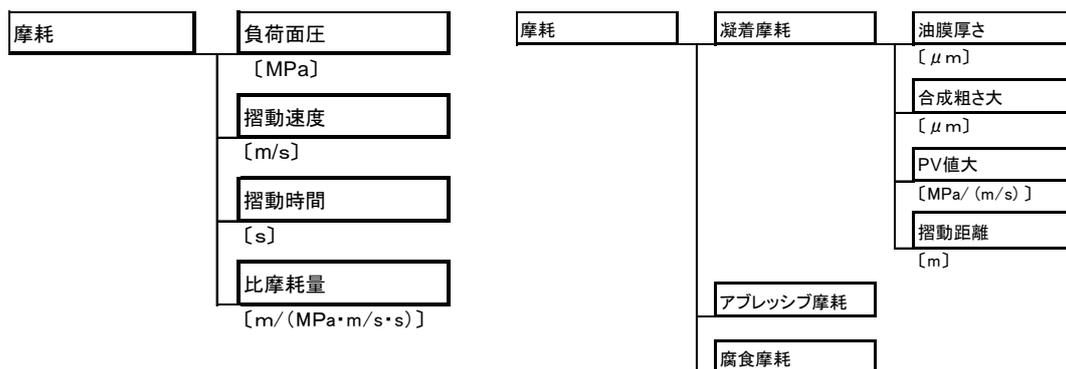


図 3.17 摩耗の FT 図事例

また、システム問題である流体系（油圧問題など）、電気系（回路問題など）、熱力学系（温度問題など）にも物理量次元インデクシングが対応可能であり、合わせてブロック図が有効である（図 3.18）。これは物理的に流体、電気、熱によってつながりをもっているため、物理量次元の整合性検証およびブロック図が使用可能である。部品の配置などのつながりをブロック図に表現することで、システム構成を考慮し、物理的にも整合性がある FT 図の作成支援が可能である。

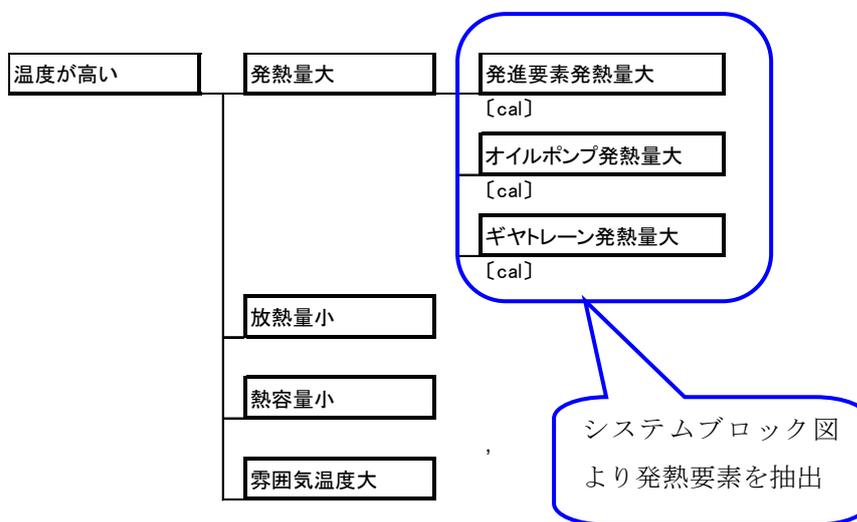


図 3.18 温度が高いの FT 図事例

さらに、制御では、設計者が制御プログラムを作成する際には、式、定数などには物理的な制約がないため、制御系には物理量次元の整合性検証、データベースの検索が使えないと考えている。ただ、制御プログラムが論理構造を有するので、ブロック図による支援ができると考えているが、さらなる応用研究が必要である。一方で、制御問題では制御対象の多くが、物理的な運動を伴う要素が含まれる。たとえば、制御システムのアクチュエータであるモーターや電磁ソレノイドは、物理的な制約を受ける。したがって、本来は制御信号に物理量の目的関数が含まれると考えられるので、今後の研究では制御信号も物理的な制約を設けて、物理量次元の応用（整合性検証、データベース検索）が可能と推定されている [小川, 2012]。

これらから、表 3.3 に代表的な故障事例に対して、メカニズム解明の有無、物理量次元インデクシングによる整合性検証及びデータベース検索、ブロック図による支援の有効性を整理した。本考察から故障現象の中で、化学反応を伴う故障現象以外のほとんどが FTA 支援システムで、物理量次元インデクシングによる整合性検証、データベース検索、ブロック図のいずれかが対応可能である。すなわち、メカニズムが解明されていれば、物理量次元インデクシングによる整合性検証が有効であり、メカニズムが解明されていなくても経験則での展開と物理量の単位をデータベースに入力すれば、FT 図の作成に有効な支援が可能であることを示している。これらは、想定される故障現象に FTA 支援システムが、十分に使用可能であることを意味している。

表 3.3 故障現象と FTAid 支援機能の対応

故障現象		メカニズム解明	物理量次元の 整合性検証	物理量次元による データベース検索	ブロック図
機械系	干渉	○	○	○	—
	変形	○	○	○	—
	ずれ	○	○	○	—
	破損	○	○	○	—
	固着	○	○	○	—
	摩耗	△	×	○	—
振動系	摩擦伝達不良	○	○	○	—
	振動	△	×	○	△
	ノイズ	△	×	○	△
化学系	腐食	×	×	×	×
	潤滑(添加剤)	×	×	×	×
電気系	ショート	○	○	○	○
	断線	○	○	○	○
	接触不良	○	○	○	○
	素子破損	○	○	○	△
	素子劣化	△	×	×	×
流体系	漏れ	○	○	○	○
	圧力異常	○	○	○	○
	圧力応答性	○	○	○	○
	流体振動	△	×	○	○
	キャビテーション	△	×	○	△
熱力学系	温度大	○	○	○	○
	熱伝導	○	○	○	○
	燃焼	△	×	×	×
制御系	ロジック	—	—	×	○
	定数	—	—	×	△
	制御干渉	—	—	×	△
システム系	システム不良	—	△	△	○
		○: 解明 △: 一部解明 ×: 未解明 —: 対象外	○: 対応可能 △: 一部対応可能 ×: 対応未 —: 対象外		

3. 4 FTA 支援システムの開発

3. 4. 1 研究体制と開発マネジメント

FTA 支援システム（システム名称：FTAid）開発は、研究マネジメントと検証を担うジャトコ、理論構築と試作ソフト製作を担当した東京大学、及び実用ソフト設計と製作を行った産業技術総合研究所（以下、産総研と呼ぶ）による産学官の研究開発体制によって行った。これは、製品設計に FTA を用いていたジャトコの FT 図作成ノウハウと東京大学の設計知識マネジメントの研究成果である物理量次元インデクシング法を結びつけることによって、FT 図支援手法の骨格を作った。また、製造業における IT 支援研究の実績がある IT のプラットフォーム技術を有する産総研との連携により、実際の設計者にも有効に使えるソフトウェアを製作した。システム開発は、第 2 章で定義した課題の目標と第 3 章で決めたシステムの要件をもとに、産学官連携の体制（図 3・16）にて行った。今回は、産官学が、互いの得意分野を担当した日本でも珍しい枠組みでの研究開発体制でもある。

FTA支援システム（FTAid） 開発体制

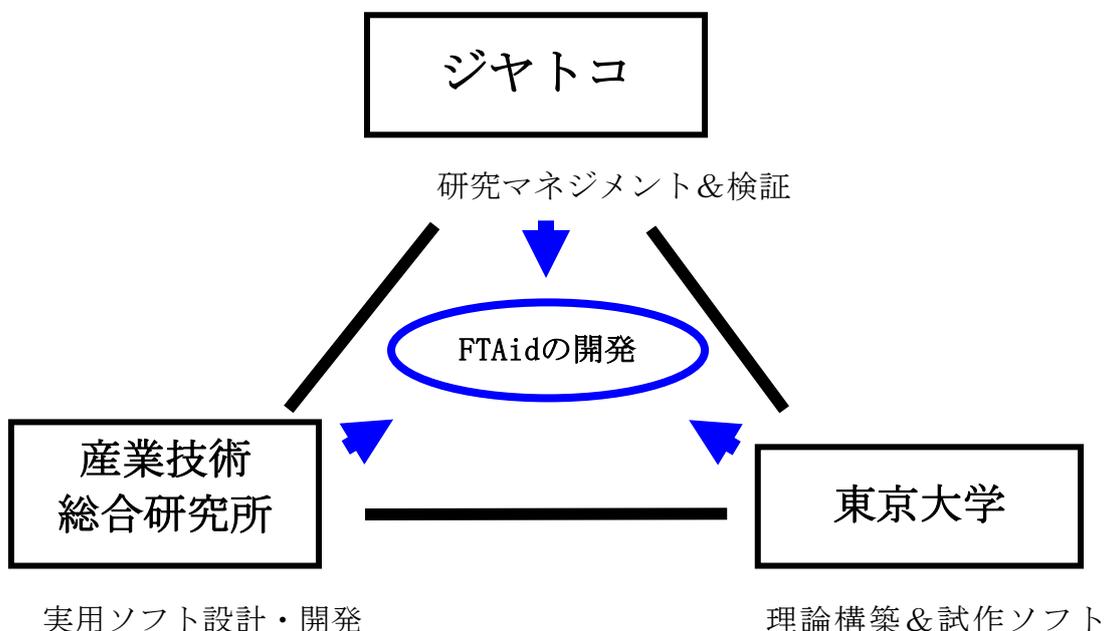


図3・19 FTA支援システム開発体制

3. 4. 2 FTA 支援システムのソフトウェア開発

企業における使用を想定し、短期間のソフトウェア開発を行うため、東京大学で試作した JAVA でのプログラムも生かすこと、及び製造業における IT 技術の適応経験がある産総研に研究への参加を依頼した。この開発では、産総研での研究開発の成果であった MZ-Platform 開発環境〔澤田, 2004〕を基盤とした開発を採用した。MZ-Platform は JAVA によるコーディングを行う必要がなく、図形などによる指示によって、プログラミングなしに JAVA 環境でのソフトウェア開発が可能となるものであり、短期間のソフトウェア開発要求に適合した。システム開発では、ソフトウェア設計者と企業の設計部署と論議を重ね、前述のシステム要件、システム構成を決定し、効率的なソフトウェア開発を実現した。また、ソフトウェア開発ではシステム要求による変更の優先度を付けることで、共同研究体制のベクトルを合せ、短期間（初期バージョンリリースまで、研究開始から 1 年以内）の開発を実現した。

第4章
企業の設計活動での
FTA支援手法の実証

4. 企業の設計活動での FTA 支援システムの実証

本章では、FTAid のシステム動作及び構成から、システムの効果を予測し、実際の設計現場でのシステムの評価検証、及び効果分析から、課題について述べる。

4. 1 FTA 支援システムの考察

以下に FTAid のシステム構成、動作から、支援方法の有効性と課題を考察し、検証する仮説を明確にする。

i) 物理量次元インデクシングによる支援

FT 図の事象が物理量で表現される機械系故障には、抜けのない設計に本支援手法は有効であると予測できる。特に、規模の大きい FT 図を作成する場合には、事象の要素数が多くなることから、物理量による整合性検証が役立つと推定している。但し、システム設計者が部品の組み合わせや配置を決めることで生じるシステム系故障、制御設計者がロジック、プログラムをコーディングすることによる制御系故障では、物理量次元の整合性検証が一致しない場合があることが考えられる。また、材料学、化学系では物理量の表現であっても、特性感度が要因とされる場合が多い。例えば、材料強度[Pa]では材料成分、 casting であれば単、及び熱処理の温度履歴、ガス濃度などの特性感度や工程特性を展開する場合があります、これも物理量次元の整合性が一致しないと推定される。さらに、FT 図の事象が故障モードなどの物理量でない言語表現である場合は、当然ながら有効ではない。これら言語表現の割合、FT 図における位置付けが、課題と考えられる。

ii) ブロック図による支援

ブロック図による支援では、まずは基準となるブロック図が正確であることが前提である。正しいブロック図に沿って、コンピュータが FT 図を作成できると考えられるが、設計者が複雑なブロック図を用いて正確に FT 図を作成するのは難しいと予測している。これは、設計者がシステム構成をブロック図に作成するのは容易であるが、FT 図に複雑なシステムのサブシステム間の問題を漏れなく抽出することは難しいと推定している。

iii) FTAid を用いた作成工数と解析精度

FTAid を用いることで、FT 図の編集、間違い探し、データベースの参照などの作業効率は格段に上がったと推定されるため、FT 図の作成工数は大幅に

削減できると予測しているが、システムが設計者の判断を優先しているため、設計者の力量によって、FT 図の解析精度が左右されると考えられる。

したがって、これらの仮説を検証するため、以下のような検証方法を採用した。

4. 2 FTA 支援システムの検証方法

FTAid (FTA 支援システム) の検証評価は、実際の企業 (ジヤトコ) における設計部門の設計者が作成した FT 図、本システムを使用した FT 図及び工数記録をもとに検証を行った。但し、設計者が作成した FT 図は、企業では設計ノウハウが入っているため、秘匿性が高く、公開できない。このため、FT 図の詳細は記述できないため、FT 図の展開割合、評価点数、及びその工数を指標に検証を行った。また、FT 図の社内評価手法も企業ノウハウのため、データの記述を最小限にとどめている。さらに、FT 図評価の公正を確保するため、一人の評価者として社内基準をもとに、部署、名前、FTAid の使用有無を隠して評価を行った。

今回、前述の仮説検証のため、以下の 3 点の検証を行った。

- ①、FTAid の物理量次元インデクシングによる支援の検証
- ②、FTAid によるシステム系 FT 図支援の検証
- ③、FTAid の妥当性検証とその効果解析

①は機械系故障に対して、物理量次元インデクシングの整合性検証が有効であるかを確認する。また、システム系故障、制御系故障では物理量次元インデクシングが難しいこと、材料系、化学系の事象にも難しいことを検証し、課題を明確にする。②はブロック図からの FT 図作成において、設計者とコンピュータが作成した各 FT 図を分析することで、支援方法の効果と課題を抽出する。③では、企業の中では対策効果を数値化することが重要であるため、FT 図作成の工数と解析精度を評価点とし、工数削減効果とそれぞれの課題を明確にする。

4. 3 物理量次元インデクシングによる支援の検証と解析

実際の設計活動（ジヤトコ）で、設計者が作成した 8 個の FT 図事例を用いて、ソフトウェアによる事象の整合性検証（物理量次元インデクシングによる次元の整合性を検証する処理）の有効性評価を実施した。その結果を表 4・1 と図 4・1 に示す。なお、使用した FT 図は、作成者であるジヤトコの設計者（チーフエンジニア）および協力メーカーが完成と考えていたものである。

表 4・1 検証に使用した FT 図

故障分類	FT 図名称	ゲート数	基本事象数	事例符号
機械系故障	油圧部品の油圧低下	16	31	A
	PT 部品 A の疲労破損	32	50	B
	PT 部品 B の破損	65	138	C
	PT 部品 C の抜け	37	60	D
	PT 部品 D の滑り	24	38	E
システム系故障	油温が高い	56	78	F
制御系故障	センサーの異常判定	21	29	G
	地絡故障誤判定	17	28	H

本ソフトウェアによる判定は、社内 FTA 指導者の判定をもとにして、以下の様に有効性を定義した。

<ソフトウェアの判定が有効である事象展開>

- ・ ソフトウェアが正しいと判定し、かつ社内の FTA 指導者も正しいと判定した事象展開
- ・ ソフトウェアが間違いと判定し、かつ社内の FTA 指導者も間違いと判定した事象展開

図 4・1 から、機械系故障の 5 事例では、FT 図の事象展開のうち 76%~95%は、本ソフトウェアの有効な判定ができたことを確認した。また、本ソフトウェアで間違いであると指摘できた割合は、4%~22%であり、設計者が完成と考えていた FT 図にもかかわらず、間違い箇所を指摘できており、物理量次元インデクシングを用いた整合性検証による効果である。これらは、実際の製品開発の中でも機械系故障には、設計者が陥りやすい間違い問題であり、物理量次元インデクシングを用いた整合性検証の有効性を示すものである。

しかしながら、物理量次元インデクシング処理ができない語句表現（故障名、故障モードなどの展開）が 5%~19%の割合で存在していた。これは故障モードなどの語句表現であり（後に事例をもとに考察する）、物理量でない事象表現であった。語句表現は語句検索で対応するが、故障モード表現などの統一やデータベース構築が課題と考える。

また、システム系故障である‘油温が高い’の FT 図は、熱力学に現れる物理量が多くあり、物理量次元インデクシングによる整合性検証の効果はあると見られた。但し、システム系故障には部品構成による故障があるので、物理量次元インデクシングとブロック図による併用が望ましいと考える。また、システム系故障でも熱力学、流体力学のメカニズムには有効であることが言えるが、動力学である振動系については検証ができていない。これは FT 図作成課題でもあり、今後の課題であると考えている。

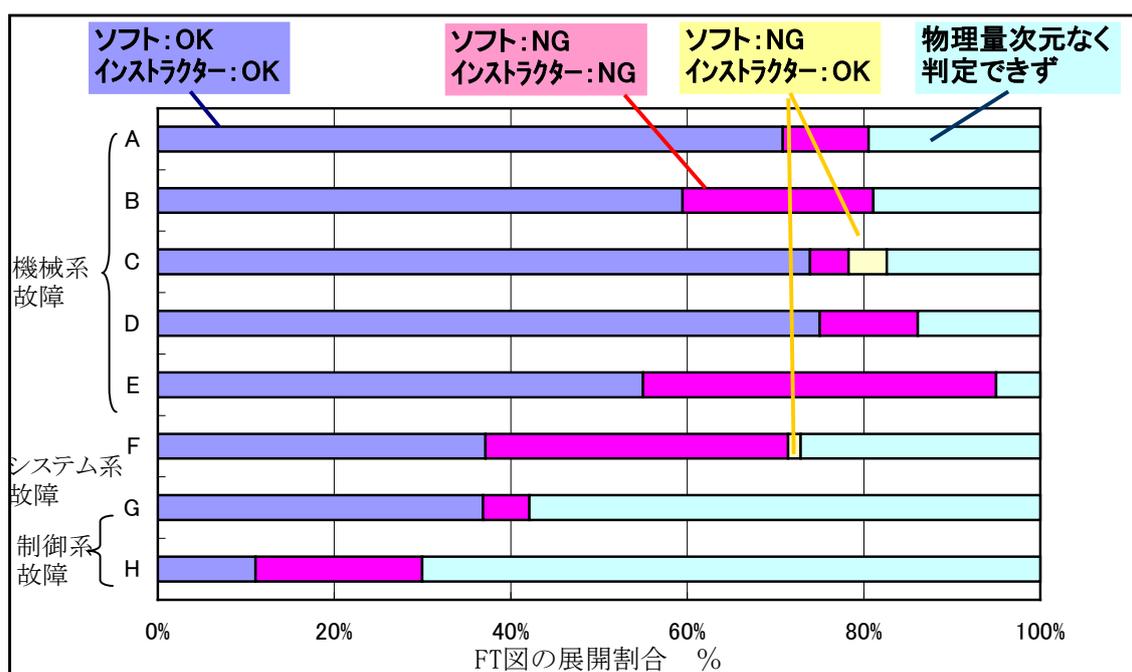


図 4・1 FTA 支援システムによる整合性検証判定結果

次に制御系故障では、物理量次元がないものが 58~70%もあったため、物理量次元インデクシングの整合性検証が有効でなかった。これは制御では機械系故障やシステム系故障とは異なり、信号のやり取りが多いため、このような結果となったものと推定している。

これらの結果から FTAid の効果があった事例、FTAid と FTA の指導者の判定が異なった事例、及び整合性検証が判定できなかった事例を以下に示し、本手法の効果と課題をさらに具体的に考察する。

i) FTA 支援システム、FTA 指導者が共に NG とした事例

図 4・2 は、ジャトロコ的设计者(課長層)が作成した油圧系部品の FT 図を FTAid の物理量次元インデクシングにて、事象の整合性検証を実施し、FTAid 側で NG (FTAid では●と表示) と判定されたものが左側である。これは、设计者が不具合の要因として、無意識に要因としても変更ができないと判断して省いたものと推測できるが、正しい展開ではない。また、理論的な展開パターンによって、運動方程式のパターンから質量とストロークが候補して挙げられた。これによって、修正した結果を整合性検証した結果、整合性検証では OK (FTAid では●と表示) となった。一般的な技術問題を運動方程式などの定式で考えるように、设计者には指導しているが、コンピュータによる支援でもこれを実現できたことは大きな成果であり、物理量次元インデクシングの有効性を示すものである。

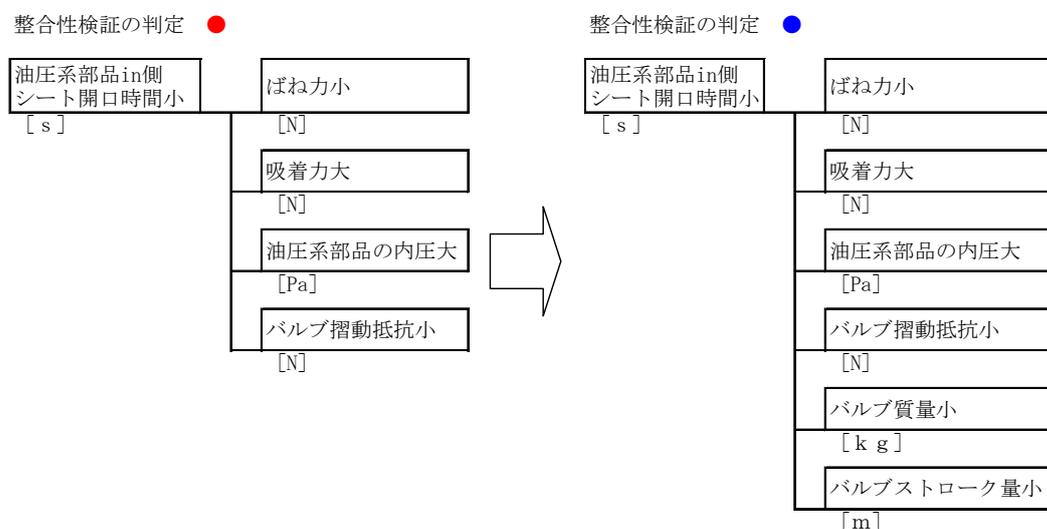


図 4・2 FTA 支援システムによる効果確認事例 1

図 4・3 も、FTAid 側で NG と判定されたもので、経験的展開パターンから抜けを指摘できた事例である。油圧部品の設計者は、油圧部品に供給される油圧が正常であるとして前提に置き、問題の要因を考えている内容であった。これも物理量次元の整合性検証にて間違いが確認でき、経験的な展開パターンのデー

データベースからの修正案の提示で修正が可能となった。

これらの事例から、設計者の陥りやすい思考パターンである‘無意識に前提条件を設定する’があり、経験的な前提条件を置き、要因を省く傾向が分かる。このような場合に物理量次元インデクシングが有効であり、設計者に FT 図の展開及び要因を見直す機会を与えることができる。検証結果として、FT 図における抜けを防止することで、FT 図の解析品質の向上が可能である。

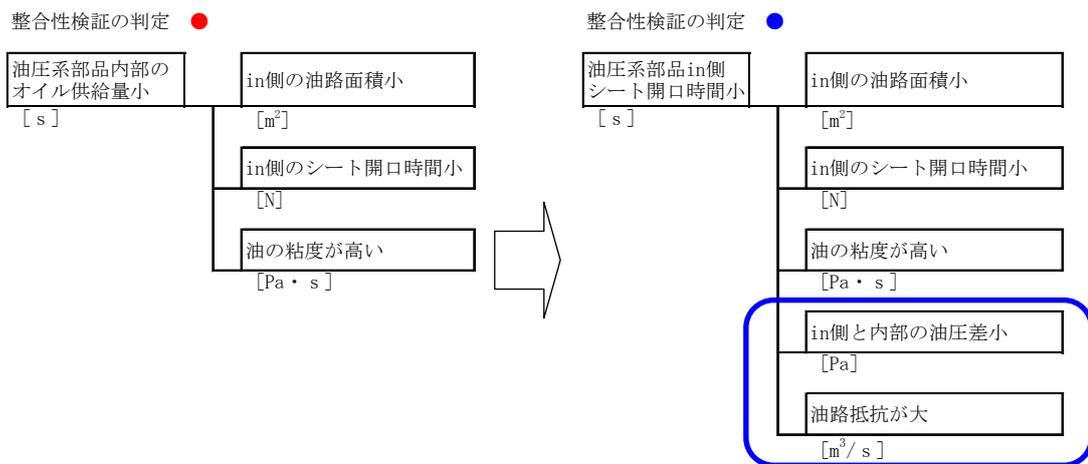


図 4・3 FTA 支援システムによる効果確認事例 2

ii) FTAid での指摘は NG であったが、FTA の指導者が OK とした事例

図 4・4 は、FTAid では NG であったが、FTA の指導者が OK (NG ではない) であり、判定異なった事例である。これはオイルの粘度、動粘度に関する事象を展開した際に、温度がその要因として出てきたものである。オイルの粘度、動粘度の特性では、温度による高い感度があることが知られており、物理量次元による表記では一致しない。すなわち、分子レベルの FT 図展開では粘度と温度の物理メカニズムがあり、物理量次元の必要条件が合う可能性はあるが、製品設計では物質特性の温度があるとして良いと考えている。したがって、4.1 で考察したように、物質特性、材料特性及び化学的な特性に、物量量次元インデクシングによる整合性検証が適応できない場合がある。これはデータベース (経験的展開パターン) との一致をコンピュータが見て、判断することで対応したいと考えているが、物質特性、材料特性及び化学的な特性の整合性検証の課題と考えている。

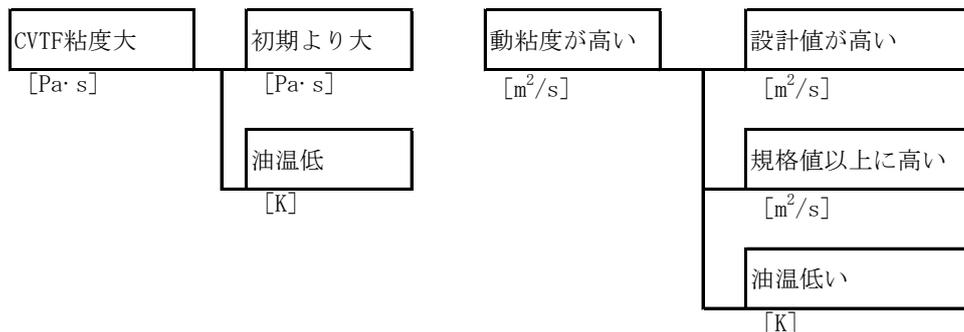


図 4.4 FTA 支援システム:NG、FTA の指導者 : OK とした事例

iii) 整合性検証の判定できなかった事例

図 4.5 には、コンピュータで判定ができなかった事例を挙げた。ここでの事例は、事象展開に物理量の表現でなかったことで、整合性検証ができなかった。図 4.6 の材料引張り強さの展開では、その物性値である硬さ、ショットピーニングなどの工程条件が展開されている。前述の ii) のように材料特性である材料引張り強さは物理量であるが、その要因展開としては工程条件、ばらつきが抽出される。この領域は物理量次元インデクシングでは難しいと同時に、製品設計の限界であり、材料技術者、工程設計者に任せる領域でもあるとも考えている。製品設計の領域では材料強度までで止めておき、その先の展開は材料技術者、工程技術者が担当したほうが正確に要因を抽出できる。したがって、ここでの問題は、材料特性課題であり、前述の ii) と同様に語句表現の問題である。

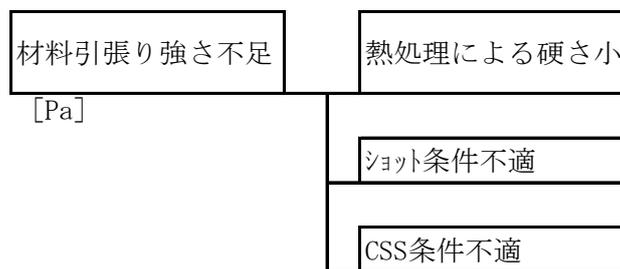


図 4.5 物理量次元が付加できない事例 (ハード系)

さらに、図 4.6 では制御系の誤検知の問題があった。誤検知は図にあるような、不等式が成立することで、誤検知の判定が行われる。誤検知自体が物理量

ではなく、故障のひとつのモードである。また、不等式はソフトウェア設計者が設計し、その値である AD 値 (AD 変換後の値)、Duty 率 (ON-OFF パルスの比率)、Vcc (出力電圧) らは、別々の物理量となっている。制御におけるソフトウェアの中でのロジックでは、物理量で表せるものがない場合があり、特性値で表現する場合がある。これは事例にも挙げた AD 値、Duty 率、Vcc は、不等式で比較するロジックを作成しているのに、共に同じ物理量であるべきであるが、それらを特性値として扱いソフトウェアに組み込んでいる。ソフトウェアの中で扱う値、関数は自由に設定できるため、それらを FT 図に表すと矛盾が出るかもしれないと推定される。このために、4.1 で考察したように、整合性検証の判定がでない、または物理量次元の整合性がないことがあるため、制御、ソフトウェアの FT 図作成の課題でもある。但し、現代制御理論でも制御する信号が何の物理量を制御するかが問題となることがあり、信号の対象要素まで踏み込むことが必要であるとの意見がある [小川, 2012]。制御系故障において物理量を考える必要があり、ここでの有効性は確認できなかったが、今後の制御系 FTA の課題である。

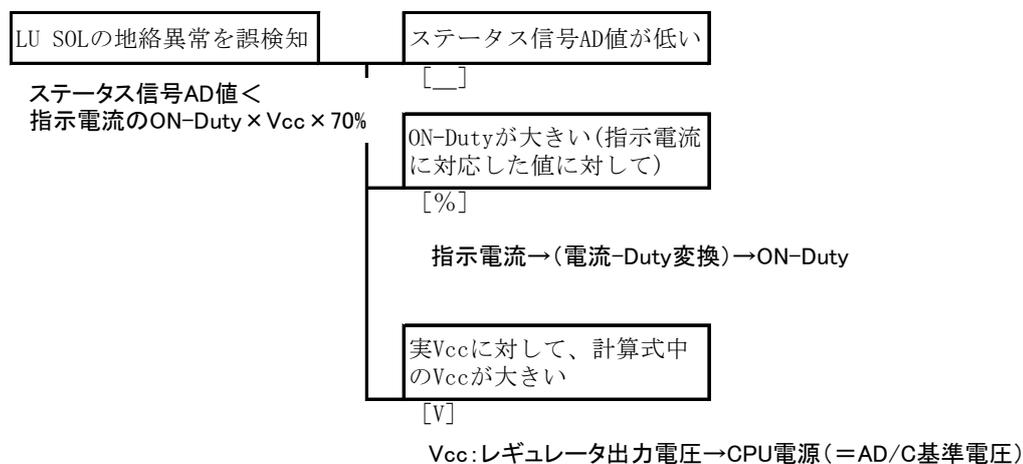


図 4・6 物理量次元が付加できない事例 (制御系)

これらの検証結果から物理量次元インデクシングによる FT 図作成支援には物質特性や材料特性、故障モード表現などの語句表現課題はあるが、ハード系 FT 図では約 80% に有効であることが検証できた。また、制御、ソフトウェア系には FT 図の作成課題はあるが、物理量次元インデクシングの整合性検証の応用領域はソフトウェアのロジック設計にもあると考えられる。

4. 4 ブロック図による支援の検証と解析

システム系故障の FT 図に対して、ブロック図に基づく FT 図作成支援の有効性を検証するため、ジャトコのシステム課題の FT 図を用いて検証評価を行った [平岡, 2012a]。

ここでは、4.1 に考察した ‘設計者がブロック図から FT 図を作成する場合の問題に対する支援の有効性’ を検証する。検証評価に使用したブロック図を図 4.7 に示す。ブロック図で示されたシステムにおける、「CPU への入力信号電圧が低い」という課題について、ソフトウェアによって展開した FT 図を図 4.8 に、ジャトコのベテラン設計者が作成した FT 図を図 4.9 に示す。設計者とソフトウェアによる FT 図の展開に差異があった事象の中で、同じ事象であるが表現が異なる展開は、ソフトウェアが作成した事象数が 14 個 (図 4.8 の A 項目 : 2、3、4、21、22 行、B 項目 : 9 行、C 項目 : 11、12、13、15 行、D 項目 : 25、26、27、28 行) に対して、設計者のものが 4 個 (図 4.9 の A 項目 : 17 行、B 項目 : 16 行、C 項目 : 8 行、D 項目 : 14 行) で大幅に少なかった。これは、設計者が異なる言葉でまとめて表現した事象をソフトウェアでは、ブロック図に従って詳細に展開していたためである。例えば、設計者が ‘差動増幅器入力差電圧が低い’ と表現した事象を、ソフトウェアでは、‘差動増幅器への入力電圧 A 小’ と ‘差動増幅器への入力電圧 B 大’ のように電圧の差の要因となる事象まで展開している。

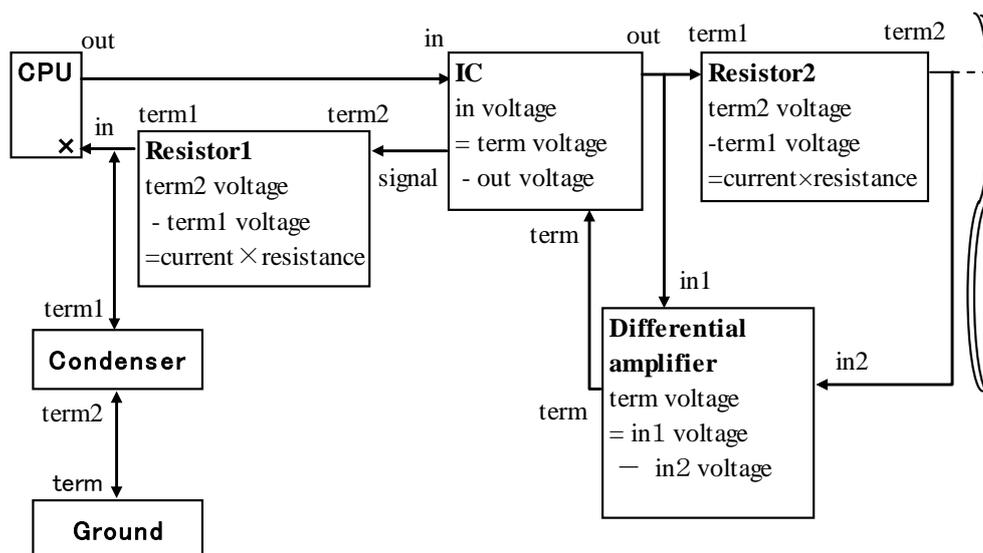


図 4.7 システム系故障のブロック図

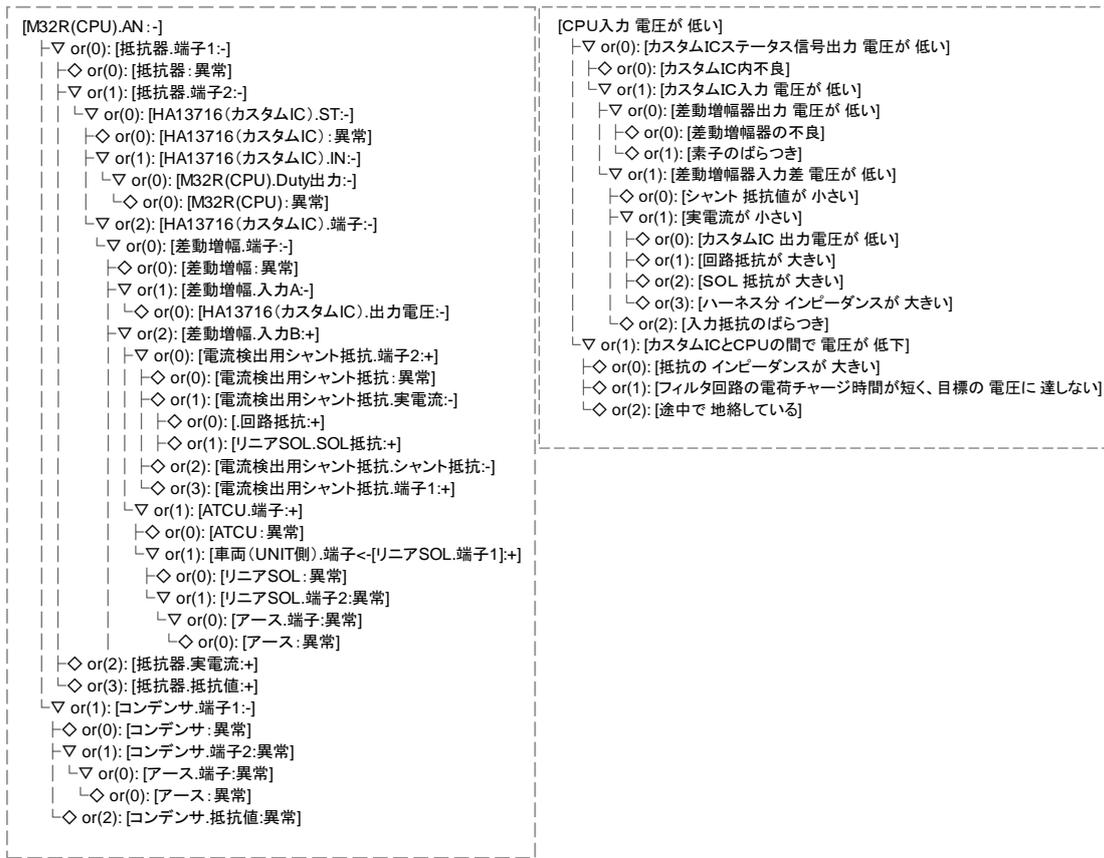


図 4・8 ソフトウェアが作成した FT 図

図 4・9 設計者が作成した FT 図

また、”ソフトウェアでは展開にあったが、設計者の展開にはなかった事象”が3個（図4・8の9、17、24行）であった。これは、設計者が要因として可能性が低いと考えたため、FT図から省略、または抜けていた事象であった。

以上から、ブロック図にもとづくFT図展開は、設計者の展開に比べて事象の抜けがなく、人間によるまとめた表現や省略の防止に役立つことが検証され、本方法によるシステム系FT図の作成支援方法の有効性が確認できた。

”ソフトウェアでは展開されていないが、設計者では展開されている”事象が4個（図4・9の7、14、17、18行）であった。これは、参照したブロック図にその表記がないために、ソフトウェアでは展開できなかった事象であった。本ソフトウェアでは参照するブロック図に従った展開しかできないが、設計者は自身の知見からブロック図に表記がなくとも、事象の展開ができるためである。これはブロック図の検討範囲、粒度（細かさ）の問題であり、ブロック図作成支援の研究課題である。

4. 5 妥当性検証と効果解析

i) FTAid の使用による作成時間と FT 図評価の調査

ジャトロコにおける実際の設計業務の中で、FTAid を使ったことによる効果分析を提示し、考察を行う。図 4・10 は、実際の設計業務を行っている設計者に FTAid を配布し、実際に作成した FT 図と作成工数を集約し、整理したものを示す [平岡, 2011]。回収した FT 図を社内の採点基準 (100 点満点での減点法、合格点:60 点) により、FT 図のみを社内の FTA の指導者 1 名にて、作成者の名前を隠して、ランダムに採点した結果を縦軸とし、横軸に作成工数の時間を取ったものである。これより、全体的に作成工数が下がり、評価点が高くなっていることが分かり、目標であった作成工数と解析精度の両立が確認できた。特に、作成工数のばらつきは大幅に小さくなっており、FTAid を用いた効率化効果が出ているものと考えられるが、FT 図の作成工数ばらつきと合格点以下の FT 図の要因についても以下に考察する。

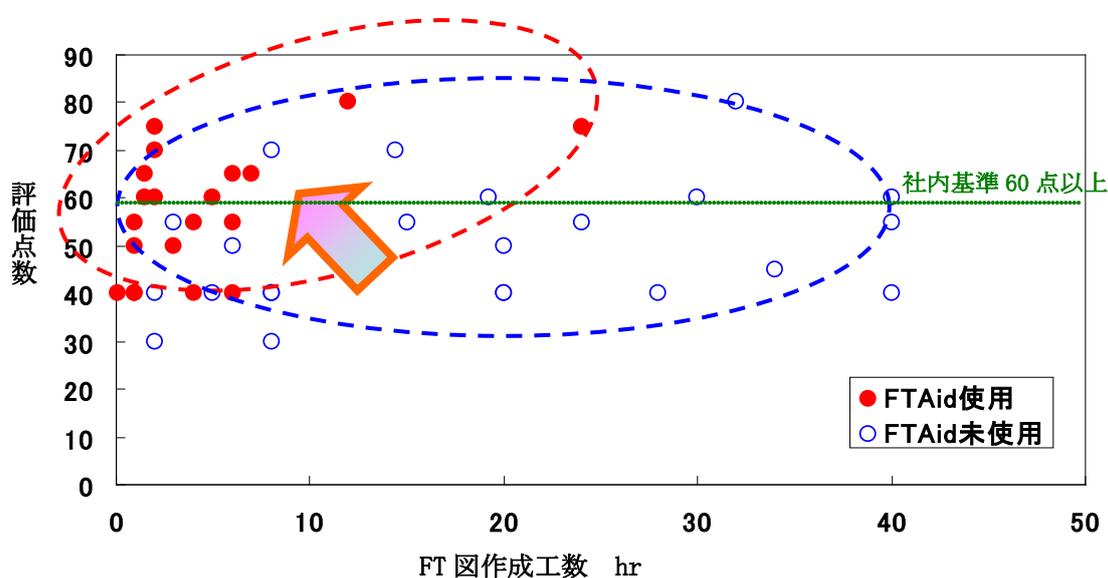


図 4・10 実際の設計業務における FTA 支援システムの効果確認

ii) FT 図の作成工数と評価結果のばらつき要因分析

上記の結果から効果解析として、FT 図の作成工数と解析結果品質の要因分析を行い、FTAid の効果を明確にする。まずは、分析要因として下記にツリー図を作成し、FT 図の作成工数と評価点の要因を抽出した (図 4・11)。その結果から、FT 図の作成工数と評価結果がばらつく要因の仮説を立てた。

- ①、設計者の FT 図作成スキルの差
- ②、参照する FT 図の差
- ③、作成する FT 図の難易度による差
- ④、FTAid 使用習熟度による差

この中で、最も感度の高い要因として、①の FT 図作成のスキル (社内のスキルランク : P. 41 表 2・1 参照) による分析を行い、実際の事例からも要因分析の検証を行い、FTAid の支援法の課題を明確にする。



図 4・11 FT 図評価点と作成時間の要因分析

まず、図 4・12 にはスキルランク保持者と FT 図の作成工数の関係を示す [平岡, 2012b]。これから、B ランク、C ランク共に FTAid による使用工数の効果は平均値 62~72%得られており、標準偏差からも C ランク取得者のばらつき低減の効果が大きい。本結果から、開発目標であった FT 図作成工数 50%削減に対して、平均値 62~72%の削減を達成したことを確認できた。

標準偏差の結果から FT 図作成時に、C ランク取得者が FTAid を使うことで、迷わずに FT 図の作成ができたことが検証できた。逆に、FTAid を使用しない場合は、FT 図作成に大幅に時間をかける人のばらつきが C ランク取得者には多いことが分かる。これは、C ランク取得の FTA 教育だけでは FTA の理解にばらつきがあり、FTAid を使うことで迷わずに FT 図を作成できることが検証された。

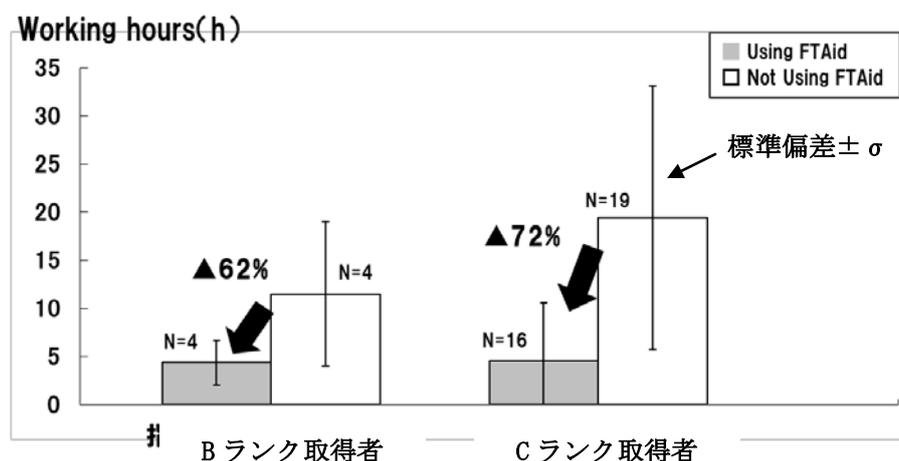


図 4・12 FT 図作成時間とスキルランクの関係

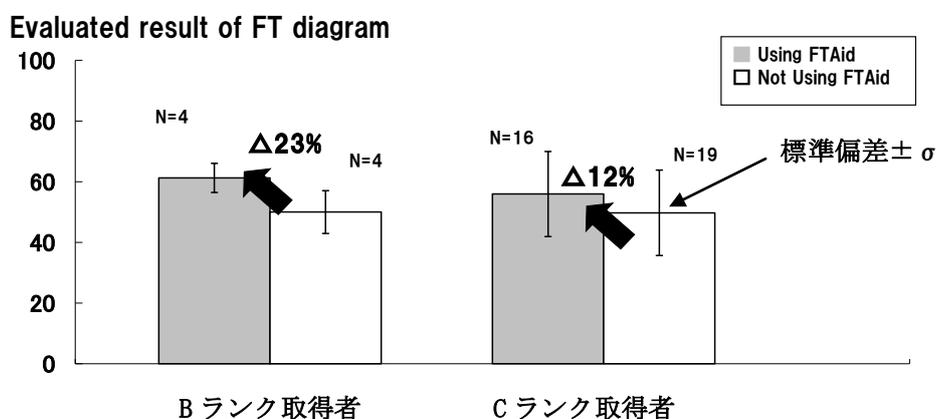


図 4・13 FT 図評価点とスキルランクの関係

図 4・13 では、FT 図の評価点も両ランク取得者共に、12～23%の FTAid による評価点の効果はあった。図 4・12、4・13 からも、FT 図の作成工数削減(50%削減)と精度向上の両立を確認し、目標の達成ができた。さらに、B、C ランクによる FT 図評価点のばらつき(標準偏差)の差はほとんどないことが分かり、基準点 60 点に満たない FT 図が統計的には約半分ある。ここで、FTAid を使用しても評価点が基準点を満たない要因を以下に分析する。

ii) FTAid 使用でも基準点に満たない事例の分析

図 4・14 に、FTA 支援システムを使用しても基準点以下の FT 図に対して、評価項目の未実施率（10 事例の平均）を示す。FT 図の評価項目とは、FT 図作成のガイドラインで規定している展開方法の項目を表したものである（企業ノウハウのために詳細は記述しない）。また、未実施率とは、FT 図構成から評価項目であるガイドラインに従った展開をすべきの展開数に対して、ガイドラインに従った展開ができていない展開数の比率を 10 事例平均した値である。

すなわち、FT 図の得点が基準点に満たない要因が評価項目のどこにあるかを表したグラフである。これらから、基準点に満たない FT 図には、故障モードの記述がないものが最も多く、その後に故障モードに従った展開がない、及び検討条件不足であることが分かった。

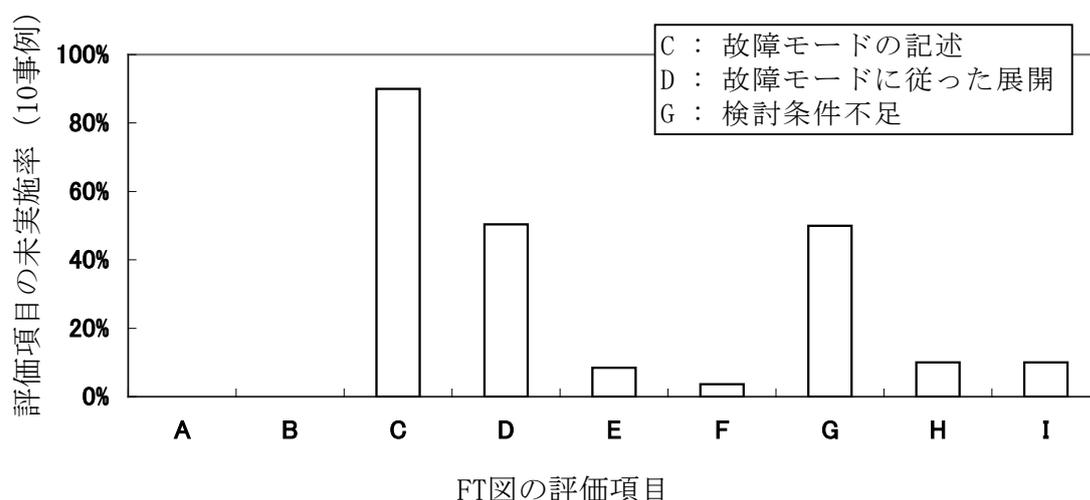


図 4・14 FTA 支援システム使用での低得点要因分析

故障モードは物理量ではなく、故障を分類した語句表現であり、FTAid の物理量次元による整合性検証とその検索では支援ができない。FTAid のシステムには FT 図のデータベースから語句検索も可能であるが、故障モードの検索を使用していないか、故障モードのデータベースが不十分であると考えられる。また、この故障モードのデータベースを使用するためには、その現象と工学的な理解が不可欠である。基準点に満たない事例は 90% が C ランクの作成であり、技術力不足で故障モードの展開を挙げられなかったか、またデータベースの検索ができなかったかと推定できる。したがって、故障モードのデータベース構築不足と工学的な知識不足が原因と考えられ、システム構築と設計者教育の課題がある。

また、故障モードに従った展開とは、故障モードのを展開する際に、工学的な知識、その要因のパラメータで展開することである。これには物理量次元による整合性検とデータベース検索が有効であるが、FTAid を十分に使用できていないか、またはデータベースの構築が不十分であるかが考えられる。前者はFTAid の使用教育の問題と故障モードと工学知識の教育に課題がある。、後者はデータベース構築の量な問題である。

さらに、検討条件不足とは FT 図ガイドラインでは設計検討上の条件に前提条件を置かずに、FT 図の展開をするように要求している。本展開が十分でなかったものも多かった。これは、FT 図のガイドラインの理解不足と工学知識不足の原因に加えて、故障を論理的に考えるトレーニング不足もあり、設計者教育及びFTA 教育の課題と考えている。以下に事例をもとに、さらに問題点を分析する。

iii) FT 図事例分析

①、FT 図事例 1 (評価点 : 40)

図 4・15 に、C ランク取得者が作成した代表的な評価の低い FT 図の事例を示す。本事例は、'シャフト圧入時にバリが発生する'の要因を分析したものである。この展開ではバリの発生するメカニズムを明確にしなかったため、思い付いた要因を書いたのみとなっているため、評価点が低くなった。第 3 階層の事象展開では、'バリが発生するメカニズム'である故障モードを表現できていない。すなわち、バリが発生するためには、摩擦力と材料の塑性変形が関与しているため、そのメカニズムを階層的に表現する必要がある。また、その展開パターンが現状のFTAid のデータベースにはバリ発生 FT 図はないので、工学的なメカニズムが考え付かなかったと推定する。これを防止するためには、故障モードとその展開パターンをデータベースに構築することと同時に、設計者の新しい問題での故障分析能力の向上が必要である。



図 4・15 FTA 支援システム使用による FT 図事例 1

②、FT 図事例 2 (評価点 : 55)

図 4・16 にも、C ランク取得者が作成した FT 図事例を示す。本事例は電磁石を使ったアクチュエータの磁力減少を題材にした FT 図である。これも磁力が減少するメカニズムである故障モード、展開パターンが見出せずに要因をならべており、温度大の事象も熱力学に沿った展開ができていないため、評価点が基準点に満たなかった。この事例は電磁石という社内では特殊な部品のため、作成者が悩みながら作成したので、時間がかかり、FT 図の構成が崩れたとも考えられる。ここでも、故障モードとその展開ができていない。この事例からは、新しい部品でも工学知識 (電磁気学、熱力学) を応用し、故障モードとその展開ができる設計者の力量を養うことが課題であると言える。



図 4・16 FTA 支援システム (FTAid) 使用による FT 図事例 3

①、②の事例は C ランクの者が作成したもので、図 3・8 (P. 60) にある FT 図作成手順 (プロセス) を踏んでいない。これらは上司、エキスパートの確認及び修正指示を数回繰り返すことで FT 図の完成となる。完成までに時間と修正工数が大幅にかかることが予想される。FTAid は FT 図作成ガイドラインの理解、工学的な知識を有する設計者には有効であるが、経験の浅い設計者 (C ランク取得者) には未だ課題がある。

したがって、FTAid を使用しても基準点に満たない FT 図の事例から、メカニズムを表す故障モードとその展開パターンができるかどうか、FT 図の解析精度に大きく影響している。FTAid が物理量次元インデクシングを応用していることは周知されており、物理量の要因に落とし込みを行っているが、故障モードの抽出方法とその展開が十分にできていない。このため、抜けが生じやすい FT 図となり、評価点が低くなった。現在の FTAid では、すべての故障モードを整理し、データベースとして登録はしていないので、参照が十分にできていな

い。また、展開パターンもローカルに登録し、リレーショナルデータベース化になっていないので、展開パターンを量的にも十分に蓄積できていない。このことが、FTAid を使っても、正確な故障モードとその展開ができない理由のひとつである。

また、新しい部品、システムに対応するためには、故障モードとその展開を物理学、工学知識を組み合わせる表現することが必要である。これには、設計者が新しい問題に対応できる分析力を養うことが重要であり、現在の設計教育（大学教育を含めて）には、さらなる改善が必要である。したがって、FTAid の効果はシステム開発目標を達成することができたが、以下にさらなる改善課題を明確にできた。

- ・故障モードとその展開パターンのデータベースの充実
- ・設計者のメカニズムを考える分析力向上を目的とした教育の改善

4. 6 FTA 支援システム検証まとめ

本論文から設計知識マネジメントに FTA を応用することの有効性、並びにその課題を明確にすることができた。さらに、個々の設計者が行う FT 図の解析精度と作成効率にあり、これらを解決する FTA 支援システム (FTAid) を提案し、システムの効果検証ができた。これは、知識再利用を主とする従来の知識マネジメントとは異なり、物理量次元インデクシングによる検証機能と検索システム構築を有する新たな手法の研究成果であり、設計知識マネジメントに新しい領域を開いたと言える。

今回、FTAid の評価検証から当初の設定目標は達成できたが、データベースに登録ができていない故障モードとその展開パターン、及びメカニズム検討ができる分析力向上を目的とした設計者教育の改善が必要であることが分かった。FTAid のシステム構築課題はあるが、設計者の分析力向上 (FTA の質向上) には本研究結果からも工学知識の体系的な理解と論理的な思考能力の向上が不可欠である。製造業における設計者の育成として、工学知識を用いた論理的な思考トレーニングを設計教育 (大学教育、企業内教育) の課題として、今後研究に取り組む必要がある。

第5章 結 論

5. 結 論

- ①、設計における FTA の課題を製品設計におけるプロセスの考察と実際の FTA の改善活動の成果と問題点から、以下のように定義した。
 - ・ 設計者による FT 図の精度ばらつき低減と作成効率の向上の両立
 - ・ 製品システムの複雑化に伴う FT 図に対する仕組みの構築従来のマニュアル化、FTA の企業内教育及び簡易的データベース構築では十分ではなかったため、設計知識マネジメントの応用研究による上記の課題解決が必要であった。

- ②、製品設計の中で、設計者の思考を支援できる FTAid (FT 図作成支援システム) を産学官連携によって開発した。産学官連携では各組織が得意とする分野を担当することで、①の課題解決が可能な FTAid の提案を行った。また、実際の設計者が使用可能で、システム検証も評価が可能なソフトウェアを製作できた。

- ③、開発した FTAid は実際の企業における設計部署での効果分析から、下記の開発目標であった FT 図作成工数は、62～72%削減で目標を達成した。さらに、解析精度は社内 FT 図の評価点数で 12～23%の向上することができ、工数削減と解析精度向上を両立させることが検証できた。①にて課題に挙げた目標を達成できた。
 - 【開発目標】
 - ・ FTAid を使うことで、FT 図作成工数の 50%削減
 - ・ 工数削減と解析精度向上を両立させる

- ④、FTAid のシステム課題を実務の設計での使用から考察を行った結果、物理量次元が付加できない故障モードの分類整理と展開パターン支援、語句による支援が必要なこと、設計教育のさらなる改善が必要なことを明確にした。さらに、ソフトウェア設計における FT 図作成支援の可能性を示した。

第6章

研究課題と今後の発展性

6. 研究課題と今後の発展性

6. 1 研究課題

本研究における残った課題は以下の点である。

- ・物理量次元インデクシングができない語句表現（故障モード）の支援手法
- ・制御系故障の物理量次元インデクシングとブロック図による支援方法
- ・システム系故障における振動系などの動力学問題の支援方法
- ・設計教育のさらなる改善（新たな問題に対応できる力量向上）

上記課題はあるが、FTAid は一定の効果が確認できたので、実際の設計業務で多く使うことで、さらなる改善点が抽出できると考えている。今後、設計者ができるだけ使える環境と改善できる仕組みづくりが大きな課題である。

また、ジャトコはAT・CVTの専門メーカーであり、同時に多くの協力部品サプライヤーからの部品供給を受けている。協力サプライヤーでのFTAに関する同様なプラットフォームができれば、FT図による技術情報の共有が可能となる。現在、ジャトコの協力部品サプライヤーに試験的にFTAidを配布、及びFTA教育を実施しており、その効果確認を実施中である。今後、ジャトコ製品の品質向上を目的に拡大し、協力部品サプライヤーでの効果確認を図っていく。

さらに、ジャトコの海外拠点からも、FTA教育、FTAid（FTA支援システム）を要求する声が多く寄せられている。そこで、グローバル化のためには、論理的なFT図による思考が重要であるので、本システム（改善活動でのマニュアル化、FTA教育、データベース構築及びFTAidの仕組み）の拡大が有効である。それには、本システムの言語を英語化することが必要であり、FT図の英語表現統一化、物理量次元の英語表現からの推定対応及び英語版の市販ソフトウェア対応の開発課題があり、早期に検討を行いたいと考えている。

6. 2 今後の発展性

ISO26262 の機能安全規格では FTA の安全分析を行うことは規定されており、不安全事象を頂上事象に入れて分析を行うことになっているが、現在の安全分析では故障を前提とする事象の分析が主流となっている。すなわち、FMAE にて各要素の故障を起こした時のシステムへの影響を検討し、影響の大きい事象は FTA によって故障確率を求めることで、冗長系システムへの変更を判断していた。しかしながら、現在のソフトウェアによる複雑系システムでは故障ではなくても、不安全な事象が起きることが多く報告されている。Nancy Levson (MIT) は安全解析と信頼性とは異なることを提唱し、名古屋空港で起きた墜落事故ではシステムの故障ではなく、自動操縦システムとパイロットの相互干渉によって起きたことが言われ、システム故障解析の限界を示した [Levson, 2011]。

したがって、故障を前提しない分析手法が、複雑系システム開発の安全検討にも必要であると考えているが、FTA で行うと膨大な事象検討が必要であり、事象整理及び検証に時間と費用がかかると予測される。今回、開発した FTAid を改良することで、帰納法的なシステム安全分析である FTA ができ、その検証ができる物理モデルシミュレーションとの連携によって、安全解析が可能となると考えているので、今後研究を進めていきたいと考えている (図 6・1)。

さらに、これらからシステム設計時に、FTA と物理モデルシミュレーション (1 DCAE : [大富, 2011]) を組み合わせることで、大規模システム開発のプロセスとツールの改善ができる可能性がある (図 6・2)。次世代のシステム設計の研究課題として取り組みを行いたい。

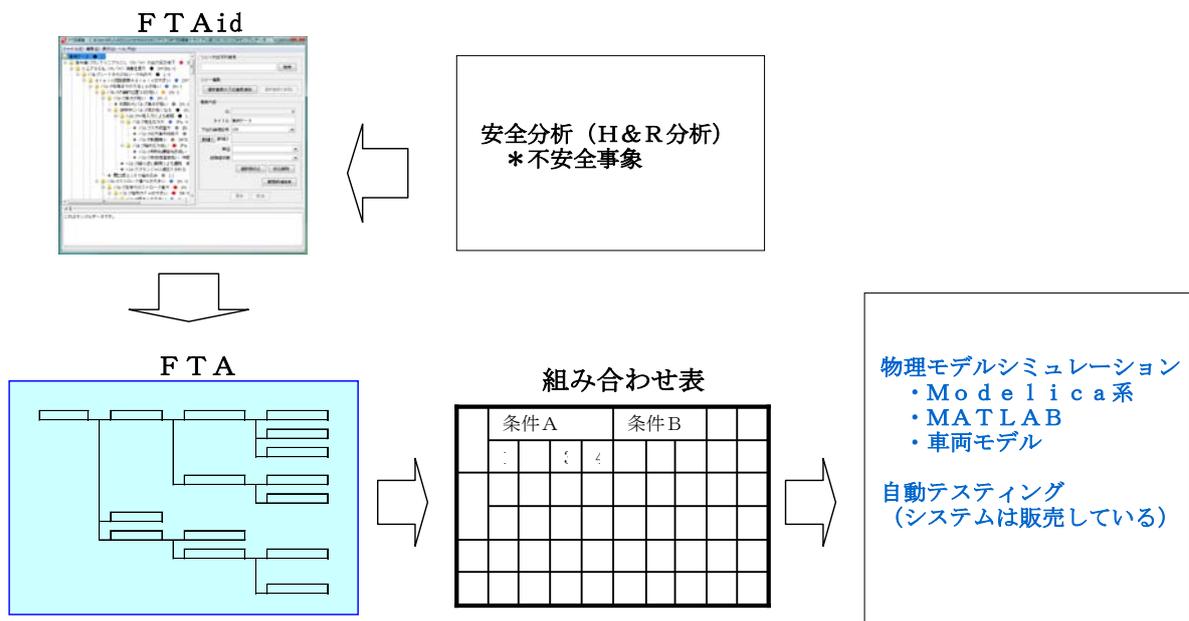


図 6・1 システム検証での FTA 活用研究

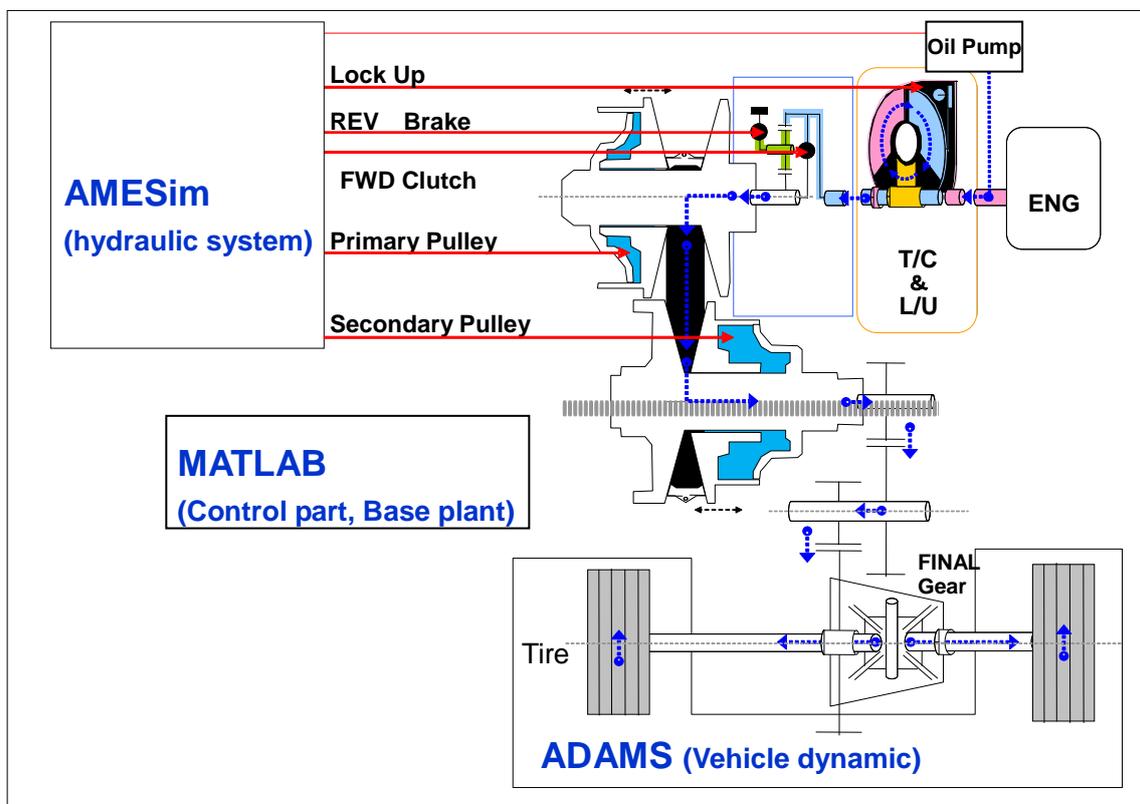


図 6・2 CVT の物理モデルシミュレーション [勝,2012]

謝辞

本論文は日産自動車、ジャトコで約25年間にCVT開発、エンジン開発(内2年)、品質技術を担当することで、設計、実験、開発を学んだ経験をもとに、纏めることができました。会社、大学、研究所、及び学会の多くの関係者に、深く感謝の意を表します。

本論文テーマは、筆者が品質技術を担当した間に、東京大学の村上研究室の学生さんの学会での発表を聞いたことを機会に、村上 存教授との交流が始まり、共同研究に至ったものです。村上先生には共同研究の中でのご教示、ご助言だけでなく、博士論文のご指導、さらには多くのご支援をも頂きました。深く感謝の意を表します。博士論文の事前審査では、東京大学 中尾政之教授、青山和浩教授、泉聡志准教授、柳澤秀吉講師には貴重なご指摘、ご助言を頂き、論文を完成させることができました。ここに、厚くお礼を申し上げます。

日産自動車 元技師長 大城義之氏には、設計プロセス、ツール、特にFTAの考え方、使い方を長年ご教示、ご指導を頂きました。氏の教えを本論文にも多く活用させて頂いており、深く感謝の意を表します。

ジャトコ元CTO 土井利政氏には、東京大学、産業技術総合研究所との共同研究に対して終始にわたりご支援を頂き、さらに学位論文を纏めることを薦めて頂きました。氏のご助言がなければ、この論文は決してなかったと思います。深く感謝の意を表します。

また、土井氏とともに研究活動にご支援を頂いたジャトコの竹内徹氏には、論文の草稿にも多くの暖かいご助言を頂き、深く感謝します。

FTAの改善活動では、日産自動車の木村徹氏には、多くのFTAに関するご助言を頂きました。また、一緒にFTAの社内教育、OJTを企画、実施したジャトコの門脇弘氏と多くのことを共に経験したことで、FTAの理解が深まりました。両氏のご協力に、深く感謝します。

FTA支援研究では東京大学 村上 存教授と村上研究室の卒業生の方々、産業技術総合研究所 グループリーダー 澤田 浩之氏、古川慈之氏、徳永 仁史氏、ジャトコの山本克成氏には、支援手法研究からソフトウェア開発、検証作業にわたり、お世話になりました。この共同研究グループのご努力によって、ソフトウェア開発からプレス発表までに至ったことは大きな喜びでした。ここに、厚くお礼を申し上げます。

最後に、いつも影ながら応援してくれた父と母、また惜しみない支援と力を与えてくれた私の家族 明子、恵美、大輝に感謝したい。

参考文献

【査読付発表論文】

- 〔村上,2008〕 Murakami, T., Kikuchi, Y. and Hiraoka, Y., “Quantity Dimension Indexing for Design Knowledge Management”, Proc. of ASME 2008 IDETC&CIE Conference (DETC2008- 49737) (CD-ROM), 2008, pp.1-10.
- 〔平岡,2011a〕 Hiraoka, Y. and Yamamoto, K., “Application of Knowledge Management Based on Quantity Dimension Indexing on the Product Design Activity”, Journal of JSME C ed., Vol.77、 No.784、 2011、 pp4672-4681.
- 〔平岡,2012a〕 Hiraoka. Y., Yamamoto. K., Murakami . T., Furukawa. Y., Tokunaga.H., and Sawada. H., “Method of Computer-Aided FTA in Reliability Design and Development -Using Knowledge Management based on Quantity Dimension Indexing and Block Diagrams -”, SAE Technical paper 2012-01-0203, Journal of Commercial Vehicles, 5(1), 2012, pp.72-82.

【一般講演発表論文】

- 〔平岡,2009〕 Hiraoka. Y., Murakami, T. , etc., “Development of the support tool for fault tree analysis (FTA)-Application of knowledge management based on Quantity Dimension Indexing”, The 39th Symposium on Reliability and Maintainability, 2009.
- 〔平岡,2010〕 Yamamoto, K., Hiraoka, Y., ”Application of Knowledge Management based on Quantity Dimension Indexing in the product design activity - Development of the support tool for FTA and the case study in JATCO - , 日本機械学会 第 20 回設計工学・システム部門講演会, 2010.
- 〔平岡,2011b〕 Hiraoka, Y., Yamamoto, K., ”Development of Computer-aided Fault Tree Analysis System for Reliability Design - The Verification and Validation of Computer-aided Fault Tree Analysis System in design process-“, 日本機械学会 第 21 回設計工学・システム部門講演会, 2011.
- 〔平岡,2012b〕 Yamamoto, K., Hiraoka, Y. , ”Development of the support software created an FT diagram (FTAid) -Effect and problem of using FTAid in design process-“, 日本機械学会 第 22 回設計工学・システム部門講演会, 2010.
- 〔平岡,2012c〕 Hiraoka. Y., etc., “製品設計におけると FTA その支援システムの開発 -Fault Tree Analysis 支援システムの実用性評価及び今後の発展性-”, 第 10 回クリティカルソフトウェアワークショップ (JAXA、IPA 主催) 一般講演, <http://sec.ipa.go.jp/events/2012/20120927.html>, 2012.

【参考文献】

- [石井,2008] Ishii, K., Iino, K., “設計の科学 価値づくり設計“, 養賢堂, 2008.
- [市川, 1996] Ichikawa, T. “認知心理学 4 思考”, 東京大学出版会, 1996.
- [大城,1999] Ooki, Y., Murakami, Y., etc., “P・FTA－D・QFD method for the short development process and high quality production”, Nissan Technical Review, No.44, 1999, pp.50-55.
- [大富,2011] 大富浩一, “1 DCAE の背景と経緯”, 1 DCAE 公開シンポジウム, 主催: 日本計算工学会, 2011.
- [小川,2012] Ogawa, K., “物理量次元 に着目することの大切さ”, <http://researchmap.jp/joazydxuy-51292/>
- [岡本,1994] 岡本順三, 中山景次, 佐藤昌夫, “トライポロジー入門”, 幸書房, 1994.
- [大山,2007] Ooyama, A, etc., “Introduction of IT Technology into D&D Process of JAXA’s Rocket Engine Valves for Reliability Improvement”, Proc. Of Design & Systems Conference ’07 (JSME), 2007, pp.201-205.
- [鹿島,2011] 鹿島矯, 木村廣隆, 小泉英明, 今村誠, “知識の構造化による設計不具合防止システムの運用と評価”, 人工知能学会論文集, 26(5), pp.607-620, 2011.
- [久米,1999] 久米 均, “設計開発の品質マネジメント”, 日科技連出版社, 1999.
- [Cross, 2008] ナイジェル.クロス, “エンジニアリングデザイン—製品設計のための考え方”, 培風館, 2008.
- [来村,1999a] Kitamura, Y. and Mizoguchi, R. , “An Ontology of Faults - Articulation and Organization -”, The Journal of JSAI, Vol.14, No.5, 1999, pp.828-837.
- [来村,1999b] Kitamura, Y. , etc., “Fault Diagnosis Based on Ontological Consideration of Faults – Exhaustive Fault Hypotheses Generation”, The Journal of JSAI, Vol.14 No.5, 1999, pp.838-847.
- [勝,2012] 勝 生水, 平岡 洋二, 山本 雅弘, ” CVT のシステム開発における1D-CAE 活用事例とモデルを用いた教育の考察”, 日本機械学 (No.12-12) Dynamics and Design Conference 2012 USB 論文集 (2012.9.18-21, 横浜)
- [黒川,2007] Kurokawa, R., Mamiya, S., “設計ノウハウナレッジシステムの実務運用について“, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.119-07, pp.1111-1232, 2007

- [澤田,2004] Sawada, H., Matsuki, N., Tokunaga, H., Furukawa, Y.,
 “A Manufacturing Software Development and Operation Framework ‘MZ Platform’ and its applications in Industry”, Proc of Advanced Engineering Design, 0093.pdf (CD-ROM), 2004.
- [塩見,1983] 塩見 弘, 島岡 淳, 石山 敬幸, “FMEA・FTA の活用”, 日科
 技連出版社, 1983.
- [白勢,1999] 白勢 国夫, 木村吉文, 金田貢, “PM 分析の進め方 -不良・故
 障をゼロにする新手法-“, 日本プラントメンテナンス協会, 1990.
- [田村,2002] Tamura, Y., etc., “不具合に関する設計知識の運用に関する
 研究 -不具合に至る因果連鎖の知識構造の構築-“, The Journal of Quality,
 Vol.32 (1), 2002, pp.122-135.
- [中尾,1999] Nakao, S, Hatamura, Y., Hatori, K., ”設計のナレッジマネ
 ジメント 創造設計原理と TRIZ”, 日刊工業新聞社, 1999.
- [中村,2003] 中村芳樹, 吉澤郁夫, 橋本公一, 大崎政雄, “TRIZ の理論とその
 展開“, 産能大学出版部
- [西村,2011] 西村 秀和, “モデルベースシステムズエンジニアリングと SysML
 への期待“, 日本設計工学会誌, 第 5 号, 第 46 卷 (2011), pp.241-246
- [日本機械,2007] 日本機械学会編, ”機械工学便覧 デザイン編 設計工学“,
 日本機械学会, 2007.
- [野中,1996] Nonaka, Y., Takeuchi, H., “知識創造企業”, 東洋経済
 新聞社, 1996.
- [野中,1999] Nonaka, Y., Konno, N., “知識経営すすめ -ナレッジマネジ
 メントとその時代-“, ちくま新書, 1999.
- [田村,2005] Tamura, Y., etc., “ 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-“, The Journal
 of Quality, Vol.35 (2), 2005, pp.95-113.
- [畑村,2000] 畑村 洋太郎, “失敗学のすすめ”, 講談社, 2000.
- [Homes, 2012] Homes, Qi., “ Review and Assessment of the ISO 26262 Draft
 RoadVehicle – Function Safety”, SAE Technical paper 2012-01-0025 SAE
 International doi:[10.4271/2012-01-0025](https://doi.org/10.4271/2012-01-0025), 2012.
- [古川,2011] 古川慈之, 澤田浩之, 徳永仁史, “高信頼性設計のための Fault Tree
 Analysis 支援システムの開発 (MZ Platform を用いた研究成果活用基盤
 としての実装)”, 日本機械学会第 21 回設計工学・システム部門講演
 会論文集 2010、2011.

- [古川,2011] 古川慈之, 澤田浩之, 徳永仁史, “高信頼性設計のための Fault Tree Analysis 支援システムの開発 (ブロック図から FT 形式への変換)”, 日本機械学会第22回設計工学・システム部門講演会論文集 3210, 2012.
- [真壁,1985] 真壁 肇, “信頼性工学入門”, 日本規格協会, 1985.
- [溝口,2004] 溝口 理一郎, “オントロジー工学”, オーム社, 2004.
- [宮村,1997] Miyamura, T., “Effective Use of FTA to Join Design Technology Information and Make it Organization Reusable Knowledge”, The Journal of Quality, Vol.27 (2), 1997, pp.69-77.
- [村上,2006] Sueyoshi, T, Murakami, T, “物理量次元空間に基づく設計知識のインデクシンとその応用”, Design シンポジウム 2006 講演論文集, 2006, pp273-280
- [村上,2009] Murakami, T., Kikuchi, Y., “Knowledge Management for Fault Tree Analysis Based on Quantity Dimension Indexing “, Journal of JSME C ed. , VoL.75, No.756(2009), pp2171-2180.
- [吉永,2009] Yoshinaga, R, Murakami, T.. “Knowledge Management for Reliability Design Using Quantity Dimension Indexing (Automatic Indexing Using Term-Quantity Dictionary,)”, 日本機械学会第20回設計工学・システム部門講演会論文集 2201、2010.
- [吉川,1979] Yoshikawa, H., “一般設計学序説”, 精密機械, 45 (8) 20–26, 1979.
- [吉村,2000] Yoshimua, T. and Tada, N., “Function and Feature of FTA System at Toyota Motor Corporation”, The9th Symposium of Application Case with JUSE-QCAS.
- [渡辺,2007] 渡辺健介, “世界一やさしい問題解決の授業”, ダイヤモンド社, 2008.
- [ISO26262,2011] ISO26262 1-10, “Road Vehicles –Function Safety”, 2011.
- [Osborn,2008] Osborn, A.著, 豊田晃訳, “創造力を生かす”, 創元社, 大阪, pp. 268–277, 2008.
- [Levson, 2011] Leveson, N., “Engineering a Safety World -Systems Thinking Applied to Safety- “, The MIT Press, 2011.
- [Levson, 1991] Leveson. N、Shimeall, J, T. , “Safety Verifaction of ADA Programs Using Software Fault Trees “, IEEE Software(July 1999), pp.48-59.
- [Rasiel,2006] Rasiel, E.M. and Friga, P.N.著, 嶋本恵美, 上浦倫人訳, “マッキンゼー式世界最強の問題解決テクニク”, ソフトバンククリエイティブ, 東京, 2006.
- [Suh,2001] Nam P. Suh., “Axiomatic Design” , Oxford University Press, 2001

【出願特許】

- ・ 特願 2011-211325 「FT 図作成支援装置及び FT 図作成支援プログラム」
- ・ 特願 2011-211326 「FT 図作成支援装置及び FT 図作成支援プログラム」
- ・ 特願 2012-060548 「FT 図データ管理システム, FT 図データ管理システムに用いられるクライアント及びサーバ, 並びに FT 図データ管理方法」
- ・ 特願 2012-060551 「FT 図データ管理システム, FT 図データ管理システムに用いられるクライアント及びサーバ, 並びに FT 図データ管理方法」
- ・ 特願 2011-229597 「FT 図作成支援装置及び FT 図作成支援方法」

付 録

・FTAidの妥当性検証データリスト

4. 4 FTAidの妥当性検証と効果解析で取得、使用したデータを下記に示す。

FTA No.	基本事象数	ノード数	FTA作成時間	FTAランク	点数	FTAid	備 考
1	39	29	7	B	65	使用	
2	17	27	5	B	60	使用	
3	126	77	4	B	55	使用	
4	14	9	1.5	B	65	使用	
5	428	499	24	C	75	使用	
6	35	22	4	C	40	使用	
7	53	25	2	C	60	使用	
8	35	19	3	C	50	使用	
9	38	29	6	C	55	使用	
10	30	25	2	C	70	使用	
11	7	9	1	C	50	使用	
12	26	18	6	C	65	使用	
13	57	27	2	C	75	使用	
14	40	27	0.125	C	40	使用	
15	30	27	1	C	40	使用	
16	155	158	12	C	80	使用	
17	12	14	1	C	55	使用	
18	39	26	6	C	40	使用	
19	12	9	1	C	40	使用	
20	39	29	15	B	55	未	
21	95	96	8	B	40	未	
22	34	29	3	B	55	未	
23	101	64	20	B	50	未	
24	82	39	8	C	30	未	
25	212	181	28	C	40	未	
26	33	24	30	C	60	未	
27	57	36	2	C	30	未	
28	92	122	14.4	C	69.5	未	
29	66	44	19.2	C	60	未	
30	68	54	39.8	C	60	未	
31	37	14	34.2	C	45	未	
32	69	48	32	C	79.6	未	
33	46	16	8.1	C	70	未	
34	99	71	24	C	55.4	未	
35	63	23	5.1	C	40	未	
36	260	182	40	C	55	未	
37	22	24	8	C	40	未	
38	26	23	6	C	50	未	
39	172	113	40	C	40	未	
40	31	19	2	C	39.6	未	
41	33	21	8	C	40	未	
42	43	35	20	C	40	未	