物理量次元インデクシングに基づく故障木解析の知識マネジメント*

村上 存^{*1}, 菊地 洋輔^{*2}Knowledge Management for Fault Tree Analysis Based on
Quantity Dimension IndexingTamotsu MURAKAMI^{*3} and Yosuke KIKUCHI^{*3} Department of Mechanical Engineering, The University of Tokyo,
7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-8656 Japan

In this paper, the authors propose computerized support for fault tree analysis (FTA) based on a new design knowledge management approach called quantity dimension indexing. When a designer finds or encounters a problem during a product design and development process, an effective way of ensuring the security and safety of the product is to identify all the possible causes of the problem by FTA and fix them. Although FTA is an effective method, it is not easy for a designer to construct a complete fault tree without any misunderstanding or oversight. A promising approach for supporting FTA is to utilize a computerized knowledge management method. Although many knowledge management techniques for literal expression have been developed, they are not necessarily suitable for managing the engineering design knowledge of physical phenomena. To solve this problem, the authors propose a new design knowledge management approach called quantity dimension indexing and computerized support for FTA such as the verification of consistency of a fault tree and fault tree construction advice. By analyzing fault tree examples based on actual design activities in a company, the possible feasibility and future promise of the proposed approach are indicated.

Key Words: Reliability Engineering, Safety Engineering, Design Engineering, Knowledge Engineering, Quantity Dimension Indexing, Fault Tree Analysis, Knowledge Management

1. 結 言

故障木解析 (Fault Tree Analysis, FTA) とは, 故障事象を, その原因となる下位の事象の論理和, 論理積に展開し, 木構造として解析する手法である⁽¹⁾. 製品の設計開発段階において, 発生, 判明した不具合を FTA により系統的, 網羅的に分析し確実な対策を施すことは, 製品の信頼性を高め安全, 安心を達成する有効な方法の一つである⁽²⁾.

FTA は, 物理現象に関する幅広い知識や深い専門性, 不具合に関する豊富な経験などが必要とされ, また大規模, 複雑な故障木は人間の力だけで漏れや抜けなく作成することは困難である. 企業においても, 若手技術者は正確な故障木を作成する知識や経験が不足しが

ちであり, 一方で熟練技術者は, ある故障に関して自身の経験から簡単に特定の原因と結び付けてしまい, 他の可能性への展開を省略するという傾向がみられることがある.

このような問題を解決するために, 情報技術を用いて設計知識・ノウハウを記述, 蓄積, 活用する知識マネジメント技術が期待されている. 知識マネジメントにおいては, 新たな設計問題に関連する知識を確実に参照したり, 知識同士の類似性を評価して適宜クラスタリングするなど, 知識群全体の体系, 整合性を維持したりするための, 知識のインデクシング (indexing, 索引付け) が重要な役割を果たす.

本稿では, 筆者らが提案する物理量次元インデクシングに基づく FTA のコンピュータ支援技術について報告する. FTA のコンピュータ支援の研究には, 故障木を作成した後の定量的な確率評価などを対象としたものが多い^{(3)~(5)}. それに対して本研究は, さまざまな物理現象を考慮して, 故障木を作成するプロセスを支援することを対象としている.

* 原稿受付 2009 年 1 月 15 日.

^{*1} 正員, フェロー, 東京大学大学院工学系研究科 (〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1).^{*2} 三菱電機 (株) (〒661-8661 尼崎市塚口本町 8-1-1).

E-mail: murakami@mech.t.u-tokyo.ac.jp

2. 設計知識の物理量次元インデクシング

2・1 物理量表現による知識のインデクシング

従来の知識マネジメント技術の多くが用いている語句表現アプローチ^{(6)~(9)}では、ある設計者が「部品が高温になった場合は...」と設計知識を記述、蓄積し、別の設計者が「部品が熱くなった」「過熱した」「オーバーヒートした」などと記述して知識を検索した場合、これらは本質的には同じ物理現象であるが語句表現が異なるため、相互に関連しうることの判定には類語辞書や概念辞書など、周到的な事前整備が不可欠である。あらゆる物理現象に対応できるようにそのような事前整備を行なっておくことは難しい。一方、両記述が温度[K]という物理量に関するものであることを SI 単位⁽¹⁰⁾で索引付けすれば、両者が対応しうることの判定は容易である。このように、物理量に基づく表現が工学における概念の共有や伝達のための語彙として有効である可能性は、関連する研究⁽¹¹⁾でも指摘されている。本研究ではこれらの考察を展開し、物理量表現に基づく設計知識のインデクシングと知識マネジメントを着想した。

2・2 物理量次元インデクシング 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[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 基本単位のべき数で構成される 7 次元ベクトル

$$\mathbf{a} = [a_m \ a_{kg} \ a_s \ a_A \ a_K \ a_{mol} \ a_{cd}] \quad (1)$$

で表現できる。例えば力[N]=[kg・m/s²]=[m¹・kg¹・s⁻²]は[1 1 -2 0 0 0]と表現される。本研究ではこれを物理量次元ベクトル (quantity dimension vector) と呼ぶ。物理量次元インデクシングにおいては、この次元ベクトルにより物理量の種類の識別や比較を行なう。

物理量次元ベクトル表現は SI 単位系の性質を継承し、設計問題に現れるさまざまな物理量を表現できる網羅性や、個人、製品、組織、技術分野、国・地域や言語、時代などの相違に影響されにくい客観性や普遍性を有するため、物理現象に関する設計知識の網羅的、客観的、普遍的なインデクシングの基盤となりうる。このことは、物理現象を扱う知識マネジメントにおける、語句表現アプローチに対する物理量表現アプローチの、ある側面での優位性を示唆していると考えられる。本研究では、この物理量次元インデクシングを FTA に適用する。

3. 故障木の物理量次元インデクシング

3・1 故障木

故障木は、FTA において故障事象を、その原因となる下位の事象の論理和、論理積の木構造に展開するものである。二つの部材間に正常値より大きい応力が発生する故障事象とその故障木を図 1 (a)(c)に示す。ここで、事象「接触の有効面積が小さい」は、「見かけの面積が小さい」と「見かけの面積は十分だが接触していない無効面積が大きい」(図 1 (b))の二つの原因に展開されている。

Fig. 1 Fault event and fault tree

3・2 故障物理量

本研究では、ある物理量の値が正常値より大きい (小さい) ために故障が生じている場合、その物理量を故障物理量 (fault quantity) と呼ぶ。また、故障物理量の値が正常値より大きい (小さい) ことを、定性物理⁽¹²⁾におけるのと同様に記号 '+' ('-) で表し、(定性的) 故障値 (fault value) と呼ぶ。ここで、故障物理量の記述構文を次のように定める。まず物理量は単位の定義式で [N/m²] のように表現する。'@'演算子により、物理量に説明の文字列を [N/m²]@'接触応力' のように付与できる。物理量の数式の演算結果は物理量であるので、([m²]@'面積' - [m²]@'無効面積')@'有効面積' のように数式に説明文字列を付与できる。':@'演算子で物理量に故障値を付与し、[N/m²]@'応力':+ のように故障物理量を表現する。これは、「応力[N/m²]が正常値より大きい」ことを表す。

物理量としては、例えばひずみ[m/m]のように計算の結果無次元となるのではなく、歯車の歯数など初めから無次元で与えられるものがある。それを記述するために本研究では、無次元を表す単位記号 "-" を独自に定義して使用する。

本研究で用いる故障物理量に関する演算子と記述構文を付録に示す。

3・3 故障木の物理量次元インデクシング 以上の構文、演算子により図1(c)の故障木を図2(a)のように記述することにより、物理量次元インデクシングされた故障木の表現を得る(単位の定義式から物理量の次元ベクトルが得られる)。

3・4 故障木のXML表現 本研究では、インターネット環境において設計知識やFTAの共有を行なうために、故障木や設計知識をXML(eXtensible Markup Language)により記述する。表1、表2に、本研究で故障木や物理量次元インデクシングの記述に使用するXMLタグを示す。例えば、図2(a)の故障木はXMLにより図2(b)のように記述される。

(a) Fault tree with quantity dimension indexing

```

<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>
    </ftree>
    <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>
</ftree>

```

(b) XML representation

Fig. 2 Fault tree with fault quantity dimension indexing

Table 1 XML tags for fault tree representation

XML tag	Description
<ftree>...</ftree>	Fault tree.
<node>...</node>	Node of fault tree.
<or>...</or>	Logical disjunction of subfault trees.
<and>...</and>	Logical conjunction of subfault trees.

Table 2 XML tags for quantity dimension indexing

XML tag	Description
<fq>...</fq>	Fault quantity (a physical quantity relevant to a fault). This tag has an attribute "unit" to define the SI unit of the quantity as an algebraic expression of unit symbols.
<fv>...</fv>	Fault value. This tag has an attribute "val". When the fault is because the magnitude of the quantity is greater (less) than the normal value, the attribute is "+" ("-").

4. 事前の知識蓄積を必要としないFTA支援

本研究では、以上の物理量次元インデクシングされた故障木に対して、FTAの支援を行なう。まず、知識の事前蓄積を必要としないFTA支援について述べる。

4・1 故障物理量の式からの故障木生成

一つ目のFTA支援は故障木の自動生成である。式(2)に示すように、故障物理量 r が p と q_i ($i=1 \sim n$)の加算で定義される場合、 r が正常値より大きい(小さい)原因は p が大きい(小さい)か q_i が大きい(小さい)場合である。同様に、減算、乗算、除算、べき乗算についても、故障物理量の大小から原因への展開を式(3)~(6)のようにまとめることができる。故障物理量がこれらの演算の組合せで定義される場合も、順次これらの展開を繰り返していくことで、原因への展開を行なうことができる。

$$r = p + \sum_{i=1}^n q_i \quad (2)$$

$$(r : \pm) = (p : \pm) \vee \{(q_1 : \pm) \vee \dots (q_n : \pm)\}$$

$$r = p - \sum_{i=1}^n q_i \quad (3)$$

$$(r : \pm) = (p : \pm) \vee \{(q_1 : \mp) \vee \dots (q_n : \mp)\}$$

$$r = p * \prod_{i=1}^n q_i \quad (4)$$

$$(r : \pm) = (p : \pm) \vee \{(q_1 : \pm) \vee \dots (q_n : \pm)\}$$

$$\frac{[N]@Load}{([m^2]@Apparent\ area - [m^2]@Ineffective\ area)@Effective\ area} @Stress; +$$

Fig. 3 Definition algebra of fault quantity

$$r = p / \prod_{i=1}^n q_i \quad (5)$$

$$(r:\pm) = (p:\pm) \vee \{(q_1:\mp) \vee \dots (q_n:\mp)\}$$

$$r = p^q \quad (6)$$

$$(r:\pm) = \begin{cases} (p:\pm) \vee (q:\pm) & (q \geq 0) \\ (p:\mp) \vee (q:\mp) & (q < 0) \end{cases}$$

例えば 3・2 で定めた構文に基づく図 3 の表現は、
「見かけ面積」から「無効面積」を減じたものが「有効面積」であり、「荷重」を「有効面積」で除した「応力」が、正常値より大きい」ことを表している。このように故障物理量の式が得られていれば、そこから自動的に図 2 (a)に相当する故障木が生成できる。

4・2 故障木の物理量次元の必要条件検証 二つ目の FTA 支援は、設計者が作成した故障木の整合性検証である。故障木における故障物理量から原因への展開は、図 2(a)の一つめの OR 展開のように異なる次元の物理量の組合せへの展開と、二つめの OR 展開のように同じ次元の物理量の組合せへの展開がある。前者は下位の物理量の乗除・べき乗算により、後者は下位の物理量の加減算により、上位の物理量が構成される場合と考えられる。本研究では、故障木の展開がこれら 2 種類のいずれかになっていることを、物理量次元の整合性の必要条件とみなす。これら 2 種類のいずれにもなっていない展開は、物理量の次元的不整合を含む、物理量が余剰または欠落している、一つの展開中で両者が混在し整理不足または不必要に複雑になっている、などの可能性があるとして設計者に警告する。

いま、故障物理量 p (その次元ベクトル a) が故障物理量 q_j (その次元ベクトル b_j) ($j=1 \sim n$) の組合せに展開されているとする。

$$a = [a_m \ a_{kg} \ a_s \ a_A \ a_K \ a_{mol} \ a_{cd}]$$

$$b_j = [b_{j,m} \ b_{j,kg} \ b_{j,s} \ b_{j,A} \ b_{j,K} \ b_{j,mol} \ b_{j,cd}] \quad (7)$$

$$(j = 1, \dots, n)$$

故障物理量の展開が加減算型であるかどうかは、

$$a = b_j \quad (j = 1, \dots, n) \quad (8)$$

となっているかどうかにより判定できる。乗除・べき乗算型であるかどうかは、

$$p = \prod_{j=1}^n q_j^{x_j} \leftrightarrow a = \sum_{j=1}^n x_j b_j \quad (j = 1, \dots, n) \quad (9)$$

となっていること、すなわち連立方程式

$$\begin{bmatrix} a_m \\ a_{kg} \\ a_s \\ a_A \\ a_K \\ a_{mol} \\ a_{cd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{1,m} & b_{j,m} & b_{n,m} \\ b_{1,kg} & b_{j,kg} & b_{n,kg} \\ b_{1,s} & b_{j,s} & b_{n,s} \\ b_{1,A} & b_{j,A} & b_{n,A} \\ b_{1,K} & b_{j,K} & b_{n,K} \\ b_{1,mol} & b_{j,mol} & b_{n,mol} \\ b_{1,cd} & b_{j,cd} & b_{n,cd} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_j \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} \quad (10)$$

の解 $x = [x_1 \dots x_j \dots x_n]^T$ (x_j は実数) の存在可能性により判定できる (表 3)。

Table 3 Solution existence and dimensional consistency

Solution existence	Dimensional consistency
Solution x ($\forall x_j \neq 0$) exists (unique or multiple)	Consistent
Only solution x ($\exists x_j = 0$) exists (unique or multiple)	Inconsistent
Solution x does not exist	

例として、設計者が図 4(a)の故障木を作成したとする。本研究の手法により、この故障木は加減算型にも乗除・べき乗算型にもなっていないことが判定される。次元を整合させる方法を検討することによって設計者は、電圧と電流が十分でも通電時間が短ければ発熱量が小さいという可能性に気づき、誤りを修正できる (図 4(b))。

Fig. 4 Fault tree verification by quantity dimension

4・1の故障木自動生成や4・2の次元整合性必定期間の検証は、語句表現に基づく方法での実現は容易ではない。それに対して、物理量次元に基づく本手法では比較的容易に実現することが可能であり、本研究のアプローチの有効性を示すものであると考える。

5. 事前の知識蓄積を用いた FTA 支援

前記4・2に述べた次元整合性の必要条件のみでは、実務レベルの詳細な FTA 支援は行なえない。そこで本研究では、FTA に関する事前の知識蓄積を用いた故障木の検証も合せて行なう。

5・1 故障—原因の展開パターン 物体の電気抵抗は、その材料の比抵抗、物体の断面積と長さにより決定される(図5(a))。従って、「物体の電気抵抗が大きい」という故障は、理論的には図5(b)に示す原因に展開できる。本研究では、このような故障—原因の展開パターンを、FTA に関する知識としてシステムに登録する。通常は故障値を反転した展開パターン(図5(b)の右側)も成立する場合が多いので、登録時に 'inverse' オプションを付加すると、この反転パターンも自動的に生成され登録される。

Fig. 5 Basic fault-cause expansion

Fig. 6 Examples of basic causalities

Table 4 Basic fault-cause pattern table with fault quantity dimension indexing

Fault QD index	Cause QD index	Fault-cause expansion case		Case no.
[-2-130100]:+	or{[-11-20000]:-, and{}}	Fault	[K/W]@\"thermal contact resistance\":+	1
		Cause	or{[Pa]@\"contact pressure\":-}	
[-2-130100]:-	or{[-11-20000]:+, and{}}	Fault	[K/W]@\"thermal contact resistance\":-	2
		Cause	or{[Pa]@\"contact pressure\":+}	
[21-3-2000]:+	or{[31-3-2000]:+, [1000000]:+, [2000000]:-, and{}}	Fault	[ohm]@\"electrical resistance of object\":+	3
		Cause	or{[ohm*m]@\"electrical resistivity of material\":+, [m]@\"length of object\":+, [m^2]@\"cross-sectional area of object\":-}	
[21-3-2000]:-	or{[31-3-2000]:-, [1000000]:-, [2000000]:+, and{}}	Fault	[ohm]@\"electrical resistance of object\":-	4
		Cause	or{[ohm*m]@\"electrical resistivity of material\":-, [m]@\"length of object\":-, [m^2]@\"cross-sectional area of object\":+}	
[31-3-2000]:+	or{[0000100]:+, and{}}	Fault	[ohm*m]@\"electrical resistivity of metal\":+	5
		Cause	or{[K]@\"temperature of metal\":+}	
	or{[0000100]:-, and{}}	Fault	[ohm*m]@\"electrical resistivity of semiconductor\":+	6
		Cause	or{[K]@\"temperature of semiconductor\":-}	
[31-3-2000]:-	or{[0000100]:-, and{}}	Fault	[ohm*m]@\"electrical resistivity of metal\":-	7
		Cause	or{[K]@\"temperature of metal\":-}	
	or{[0000100]:+, and{}}	Fault	[ohm*m]@\"electrical resistivity of semiconductor\":-	8
		Cause	or{[K]@\"temperature of semiconductor\":+}	

QD: Quantity Dimension

また、「金属材料は温度が上がると比抵抗が増す」，「半導体材料は温度が上がると比抵抗が減る」など，物理現象の因果則（図6）も同じ方法で登録し利用できる。ただし，4・2の条件を満たす展開パターンは故障木の枝の一まとまりを表すのに対し，図6の例のように必ずしも満たしていない基本因果則は枝のまとまりでなく個々の枝を表すのみであるという区別を理解して使用する必要がある。

図5(b)の展開パターン1件および図6の因果則3件を，'inverse' オプションを付加してシステムに登録すると，物理量次元インデクシングされた展開パターンが，FTAに関する知識として表4のように蓄積される。

5・2 展開パターンとの比較による故障木の検証
展開パターンとの比較による故障木の検証は，対象の故障木を表す物理量次元インデックスのリストと，各展開パターンを表す物理量次元インデックスのリストの類似度評価に基づき行なわれる。例として，図7(a)の二つのインデックスのリストを考える。二つのリストを比較し，次元，故障値とも等しい排他的な対（図中灰色太線）の数 e_{Ldv} ，それ以外で次元のみ等しい排他的な対（図中灰色細線）の数 e_{Ld} を数え，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（表5）。

(a) Similarity as lists

(b) Similarity as sets

Fig. 7 Similarity of fault quantity dimension index lists

また，例えばいくつかの力の合力の大きさが故障事象となっている場合，元になる力の数が異なっているも本質的には同じ故障-原因パターンと見なしうる。このような場合については，原因を構成する物理量の種類と数の構成をリストとして比較するのではなく，

次元，故障値とも等しいインデックスは1要素としてまとめた集合を作成し（図7(a) → (b)），物理量の種類の構成のみを比較することにより対応できる。図7(b)は，リストの比較の場合と同様な対の数 e_{Sdv} ， e_{Sd} を数え（添字 'L' はリスト，'S' は集合を示す），大きいほうの集合の要素数 n_S に対する割合 r_{Sdv} ， r_{Sd} を求める例である（表5）。

本研究では，以上により求めた r_{Ldv} ， r_{Sdv} ， r_{Ld} ， r_{Sd} をこの順に並べたものを，二つのインデックスの類似度とする（図7については，それぞれ $r_{Ldv}=3/6$ ， $r_{Sdv}=3/5$ ， $r_{Ld}=2/6$ ， $r_{Sd}=1/5$ となる）。

例として，設計者が図8(a)の故障木を作成したと仮定し，前記5・1で蓄積された展開パターンと比較して整合性を検証する場合，まずこの故障木の故障と原因の物理量次元インデックスを作成し（図8(b)），表4中の各展開パターンの故障と原因それぞれとの類似度を前述の方法で計算する。

(a) Fault tree

Fault: [2 1 -3 -2 0 0]:+
Cause: or{ [1 0 0 0 0 0]:-,
[1 0 0 0 0 0]:+,
[2 1 -3 -2 0 0]:+ }

(b) Index

Fig. 8 Fault tree to be verified

Table 5 Rates of index pairs in lists and sets

	Dimension and fault value are equal.	Only dimension is equal.
As list	$r_{Ldv} = e_{Ldv} / n_L$	$r_{Ld} = e_{Ld} / n_L$
As set	$r_{Sdv} = e_{Sdv} / n_S$	$r_{Sd} = e_{Sd} / n_S$

Table 6 Similarity of fault-cause patterns

Case no.	Fault similarity (r_{Ldv} , r_{Sdv} , r_{Ld} , r_{Sd})	Cause similarity (r_{Ldv} , r_{Sdv} , r_{Ld} , r_{Sd})
3	1, 1, 0, 0	1/3, 1/3, 0, 0
4	0, 0, 1, 1	1/3, 1/3, 0, 0
1, 2, 5, 6, 7, 8	0, 0, 0, 0	0, 0, 0, 0

この類似度計算による図8(a)の故障木と表4中の各展開パターンの類似度は表6となり，展開パターン

3 が最も類似するが同一ではないことから、設計者は図8(a)の故障木と展開パターン3 (図5(b)) を比較することにより、次の点に気づくことができると考えられる。

- 図8(a)の故障木では、形状に依存する物体の電気抵抗と、形状に依存しない材料の比抵抗の区別がなされていない。

- 図8(a)の故障木では「リード線の直径」を原因としているが、理論的にはまず「リード線の断面積」とし、その原因の一つとして「直径」を考えるべきである。それにより、図8(a)の故障木では導けない、リード線の見かけの直径は十分だが内部に構造欠陥があり有効断面積が十分でないような可能性も導くことができる。

以上の展開パターンとの比較による故障木の検証は、4・2 の必要条件を形式的には満たすが内容自体は誤っている展開 (例えば図8(a)) を検出したり、逆に次元による厳密な整合性はとれていないが企業において経験的に認められている展開であることを検出することなどに使用できる。

なお、ここでは作成済の故障木の検証を行なうために、設計者が作成した故障木と各展開パターンの故障事象、原因事象それぞれの類似度を計算したが、設計者がこれから故障木を作成する際に、展開したい故障事象と表4中の展開パターンの故障事象のみを比較すれば、そこから原因事象への展開候補を提示するような、故障木作成時の支援にも使用できる。

6. 企業の FTA への適用による手法の有効性評価

本研究では以上の手法を、インターネット環境における知識共有に適した Java プログラムとして実装し、それを用いて、本研究とは独立にジャトコ(株)の業務において作成された故障木3件を検証した。

本研究で提案する手法のうち、展開パターンの蓄積を用いた故障木の検証は、対象とする故障木の内容をカバーする十分な数と種類の展開パターンが蓄積されていないと、判定結果が必ずしも有効とはいえない。そこでここでは、物理量の次元整合性の必要条件による判定のみを行なった。各故障木について、含まれる展開 (OR/AND ゲート) の総数 n 、うち故障とその原因すべての1階層が物理量次元インデクシングできた展開の数 n_i 、本研究の手法による展開の正誤判定数 n_c, n_w と、人間がその判定を確認した結果の数 $n_{cc}, n_{cw}, n_{ww}, n_{wc}$ を表7に示す。誤った展開を検出する精度 (システムが誤りと判定し実際に誤りである割合)、再現率 (故障木に含まれる誤った展開のうちシステムが誤りと指摘した割合) ⁽¹³⁾ ともに75%を越えており、研究の第一段階としては有望な結果が得られた。

故障木からの不適切な展開の検出例を図9に示す。システムは故障木中から、次元整合性の必要条件を満たしていない図9(a)の展開を検出した。この故障木は、「ベルト車による伝動における損失が大きい」という故障を、「摩擦係数が大きい」、「滑り速度が大きい」、「巻きつけ半径が小さい」、「ベルト張力が大きい」という原因に展開しているが、これを企業のFTA 責任者に提示したところ、やはり整理不足で正しくない展開であるとの意見が得られた。この展開は、例えば図9(b)のように書き直すと、「摩擦力」が「垂直抗力」と「摩擦係数」に展開されているなど、現象の原理に即した分かりやすいものとなり、また本研究による次元整合性の必要条件も満たすようになる。

なお、インデクシングできた展開の割合が約40～80%とばらついた理由の一つは、故障木に現れる物理量以外の記述である。物理量次元インデクシングでは、「コネクタが抜けかけている」など、物理量以外の記述についてはインデクシングは行なえない。それについての対応は今後の課題である。

Table 7 Numbers and rates of expansions in fault trees

Fault tree	All n	Indexable n_i < n_i/n >	QDI judgment	Final judgment by human	QDI judgment	Final judgment by human	Alarm performance
			Correct by dimensional consistency n_c	Correct n_{cc} Incorrect n_{cw}	Incorrect $n_w (=n_i - n_c)$	Incorrect n_{ww} Correct n_{wc}	Precision n_{ww}/n_w Recall $n_{ww}/(n_{cw} + n_{ww})$
Oil temperature	69	61 <88%>	32	32 0	29	28 1	97% <28/29> 100% <28/28>
Sensor malfunction	27	13 <48%>	9	9 0	4	3 1	75% <3/4> 100% <3/3>
Grounding failure	19	8 <42%>	7	7 0	1	1 0	100% <1/1> 100% <1/1>

QDI: Quantity Dimension Indexing

Fig. 9 Verification example of FTA in company

7. 議 論

本論文で提案した物理量次元インデクシングを高度化し、実務レベルの設計開発問題に適用可能とするための課題などについて考察する。

7.1 物理量の定義構造の考慮 本論文において、物理量の次元に基づく識別、比較は、基本的には次元が一致するかしないかの二値的な判定によって行っている。しかし、例えば長さ[m]、歪[ ] = [m/m]、効率[ ] = [J/J]の各物理量は、結果としての次元を比較すれば、長さと歪は一致せず、歪と効率は一致する。一方、設計知識としては、長さと歪は関連があり、歪と効率は直接的な関連は小さいと考えることもできる。そこで、物理量の識別、比較において、物理量の最終的な次元だけでなく、定義構造が表現されている場合にはその内容を考慮することが考えられる。それにより、歪の定義に長さが含まれることが考慮され、長さと歪の関連性を評価できる。

7.2 物理量の定量的な大きさ 例えば強電系の設計問題に関する知識を検索する場合には、同じ電流や電圧に関する設計知識であっても、強電系の内容が弱電系の内容より高い優先順位で提示されることが望ましい。そのためには、物理量の識別、比較において、物理量の定量的な大きさの情報を利用する必要がある。具体的な設計事例を知識化して記述する場合には物理量の具体的な数値が記述できる。それ以外の場合には、

例えば物理量の大きさのオーダー (10^x の x) をインデックスとして使用することなどが考えられる。

7.3 語句表現アプローチとの相補的な統合 物理量次元インデクシングでは、「コネクタが抜けかけている」など、物理量以外の記述についてはインデクシングは行なえない。実務レベルの設計開発問題における FTA 全体を対象とするためには、語句表現アプローチとの相補的な統合を行なう必要があると考えている。ただし、例えば「部品が片当たりしている」という記述は、それ自体は物理量に言及していないが、表現したい内容は実際には「接触面積が小さい」など、物理量で記述すべきものである場合がある。設計者自身も、物理量次元インデクシングの概念を理解して、それに適した故障木の記述に努めることが望まれる。

8. 結 論

本研究では、設計知識マネジメントの手法の一つとして、物理現象に関する設計知識の網羅的、客観的、普遍的なインデクシングの基盤となりうる、物理量次元インデクシングの概念および方法を提案した。

物理量次元インデクシングを FTA に適用することにより、故障木の生成や整合性検証のコンピュータ支援を行なう方法を提案した。

提案した FTA 支援を、インターネット環境における知識共有に適した、故障木の XML 表現と Java 言語による処理プログラムとして実装し、企業の設計開発活動で作成された故障木 3 件に適用した。その結果、物理量の次元整合性の必要条件検証によって、誤り検出の精度、再現率共に 75% を超える値を実現できたことを示し、手法の有効性、可能性を検証した。

本論文では、企業で作成された故障木について物理量の次元整合性の必要条件検証を行なったが、実際の FTA においては、FTA に関して蓄積された知識との比較による検証が必要である。それについては、企業との協力により、企業において用いられている FTA に関する知識を収集して適用し、本研究の有効性を検証する必要がある。これらについては、今後の課題である。

謝 辞

本論文の内容については、ジャトコ株式会社品質企画管理部の平岡洋二氏に多大なるご協力をいただいた。ここに謝意を表する。

付 録

本研究において故障物理量の定義に用いる演算子の一覧を表 A.1 に示す。

Table A.1 Operators for quantity dimension indexing

Operator	Description
$+$, $-$, $*$, $/$, $^{\wedge}$	Algebraic operators.
'@'	An operator to assign a description string to a quantity.
'#'	An operator to assign a numerical magnitude to a quantity.
'.'	An operator to assign a qualitative fault value to a fault quantity.

本研究で定義した故障物理量の記述構文を以下に示す。

```

FaultQuantity ::= Quantity '@' FaultValue
FaultValue ::= '+' | '-'
Quantity ::= '(' Quantity ')'
Quantity ::= Quantity '+' Quantity
Quantity ::= Quantity '-' Quantity
Quantity ::= Quantity '*' Quantity
Quantity ::= Quantity '/' Quantity
Quantity ::= Quantity '^' Number
Quantity ::= Quantity '@' QuantityName
Quantity ::= QuantityMagnitude '#' Quantity
Quantity ::= '[' UnitExpression ']'
QuantityName ::= String
QuantityMagnitude ::= Number
UnitExpression ::= '(' UnitExpression ')'
UnitExpression ::= UnitExpression '*' UnitExpression
UnitExpression ::= UnitExpression '/' UnitExpression
UnitExpression ::= '1' '/' UnitExpression
UnitExpression ::= UnitExpression '^' Number
UnitExpression ::= UnitSymbol
UnitSymbol ::= String

```

さまざまな物理量⁽¹⁴⁾とその次元ベクトルの例を表A.2に示す。

Table A.2 Dimension vectors of various quantities

Dim. vector	Unit	Description
[0 0 0 0 0 0]	rad (m/m)	plane angle, angle
	sr (m ² /m ²)	solid angle
	m/m	strain
[0 0 0 0 0 1]	cd	luminous intensity
	lm	luminous flux
[0 0 0 0 1 0]	mol	amount of substance
[0 0 0 1 0 0]	K	thermodynamic temperature
[0 0 0 0 -1 0 0]	K ⁻¹	linear expansion coefficient
[0 0 0 1 0 0 0]	A	electric current, magnetomotive force
[0 0 1 0 0 0 0]	s	time
[0 0 1 0 0 0 1]	lm*s	quantity of light
[0 0 -1 0 0 0 0]	rad/s	angular velocity
	Hz	frequency
	s ⁻¹	rotational frequency
	Bq	activity
[0 0 1 1 0 0 0]	C	electric charge, quantity of electricity
[0 1 0 0 0 0 0]	kg	mass
[0 -1 0 0 0 1 0]	mol/kg	molarity of solute substance

Table A.2 Dimension vectors of various quantities (cont.)

Dim. vector	Unit	Description
[0 1 0 0 0 -1 0]	kg/mol	molar mass
[0 1 -1 0 0 0 0]	kg/s	mass flow rate
	N*s/m	mechanical impedance
[0 -1 1 1 0 0 0]	C/kg	exposure
[0 1 -2 0 0 0 0]	N/m	surface tension
[0 1 -2 -1 0 0 0]	T	magnetic flux density, magnetic induction
[0 1 -3 0 0 0 0]	W/sr/m ²	spectral concentration of radiant energy density
	W/m ²	radiant exitance, sound intensity
[0 1 -3 0 -1 0 0]	W/m ² /K	coefficient of heat transfer
[1 0 0 0 0 0 0]	m	length, wavelength
[-1 0 0 1 0 0 0]	A/m	linear current density, magnetic field strength
[1 0 -1 0 0 0 0]	m/s	velocity
[1 0 1 1 0 0 0]	C*m	electric dipole moment
[1 0 -2 0 0 0 0]	m/s ²	acceleration
[-1 1 0 0 0 0 0]	kg/m	linear density
[1 1 -1 0 0 0 0]	kg*m/s	momentum
[-1 1 -1 0 0 0 0]	Pa*s	viscosity
[1 1 -2 0 0 0 0]	N	force
[-1 1 -2 0 0 0 0]	Pa	pressure, stress
[1 1 -2 -1 0 0 0]	Wb/m	magnetic vector potential
[1 1 -2 -2 0 0 0]	H/m	permeability
[1 1 -3 0 -1 0 0]	W/m/K	thermal conductivity
[1 1 -3 -1 0 0 0]	V/m	electric field strength
[2 0 0 0 0 0 0]	m ²	area
	cd/m ²	luminance
	lm/m ²	luminous exitance
[-2 0 0 0 0 0 1]	lx	illuminance
	A*m ²	electromagnetic moment
[-2 0 0 1 0 0 0]	A/m ²	current density
[2 0 -1 0 0 0 0]	m ² /s	kinematic viscosity, diffusion coefficient
[-2 0 1 0 0 0 1]	lx*s	light exposure
[-2 0 1 1 0 0 0]	C/m ²	surface density of charge, electric flux density, electric polarization
	J/kg	specific internal energy, specific enthalpy, specific latent heat
	Gy	specific energy imparted, absorbed dose
[2 0 -2 0 0 0 0]	Sv	dose equivalent
	J/kg/K	specific heat capacity, specific entropy
[2 1 0 0 0 0 0]	kg*m ²	moment of inertia
[2 1 -1 0 0 0 0]	kg*m/s*m	moment of momentum
[-2 1 -1 0 0 0 0]	Pa*s/m	specific acoustic impedance
[2 1 -2 0 0 0 0]	N*m	moment of force
	J	work, energy, heat
[2 1 -2 0 0 -1 0]	J/mol	molar internal energy
[2 1 -2 0 -1 0 0]	J/K	heat capacity, entropy
[2 1 -2 0 -1 -1 0]	J/mol/K	molar heat capacity, molar entropy
	Wb	magnetic flux
[2 1 -2 -1 0 0 0]	H ⁻¹	reluctance
[-2 -1 2 2 0 0 0]	H	self-inductance, permeance
[2 1 -3 0 0 0 0]	W	power, heat flow rate, radiant energy flux, sound power
	V*A	apparent power
	W/sr	radiant intensity

Table A.2 Dimension vectors of various quantities (cont.)

Dim. vector	Unit	Description
[-2 -1 3 0 0 0 1]	lm/W	luminous efficacy
[-2 -1 3 0 1 0 0]	K/W	thermal resistance
[2 1 -3 -1 0 0 0]	V	electric potential
[-2 -1 3 2 0 0 0]	S	conductance, admittance, susceptance
[2 1 -3 -2 0 0 0]	ohm	resistance, impedance, reactance
[-2 -1 4 2 0 0 0]	F	capacitance
[3 0 0 0 0 0 0]	m ³	volume
[-3 0 0 0 0 1 0]	mol/m ³	concentration of substance
[3 0 0 0 0 -1 0]	m ³ /mol	molar volume
[3 0 -1 0 0 0 0]	m ³ /s	volume flow rate, volume velocity
[-3 0 1 1 0 0 0]	C/m ³	volume density of charge
[-3 1 0 0 0 0 0]	kg/m ³	density (mass density)
[3 1 -2 -1 0 0 0]	Wb*m	magnetic dipole moment
[-3 -1 3 2 0 0 0]	S/m	conductivity
[3 1 -3 -2 0 0 0]	ohm*m	resistivity
[-3 -1 4 2 0 0 0]	F/m	permittivity
[-4 1 -1 0 0 0 0]	Pa*s/m ³	acoustic impedance

文 献

- (1) Ericson, C. A., Fault Tree Analysis - A History, *Proceedings of the 17th International System Safety Conference*, (1999), pp.87-96.
- (2) Ooki, Y., Murakami, Y., Fujiwara, S. and Kimura, T., P-FTA - D-QFD Method for the Short Development Process and High Quality Production, *Nissan Technical Review* (in Japanese), No.44 (1999), pp.50-53.
- (3) Elliot, M. S., Computer-Assisted Fault-Tree Construction Using a Knowledge-Based Approach, *IEEE Transactions on Reliability*, Vol.43, No.1 (1994), pp.112-120.
- (4) Geymayr, J. A. B. and Ebecken, N. F. F., Fault-Tree Analysis: A Knowledge-Engineering Approach, *IEEE Transactions on Reliability*, Vol.44, No.1 (1995), pp.37-45.
- (5) Vemuri, K. K., Dugan, J. B. and Sullivan, K. J., Automatic Synthesis of Fault Trees for Computer-Based Systems, *IEEE Transactions on Reliability*, Vol.48, No.4 (1999), pp.394-402.
- (6) Szykman, S., Sriram, R. D., Bochenek, C., Racz, J. W. and Senfaute, J., Design Repositories: Engineering Design's New Knowledge Base, *IEEE Intelligent Systems*, Vol.15, No.3 (2000), pp.48-55.
- (7) Hirtz, J., Stone, R. B., McAdams, D. A., Szykman, S. and Wood, K. L., A Functional Basis for Engineering Design: Reconciling and Evolving Previous Efforts, *Research in Engineering Design*, Vol.13, No.2 (2002), pp.65-82.
- (8) Kitamura, Y., Kashiwase, M., Fuse, M. and Mizoguchi, R., Deployment of an Ontological Framework of Functional Design Knowledge, *Advanced Engineering Informatics*, Vol.18, No.2 (2004), pp.115-127.
- (9) Ahmed, S., Encouraging Reuse of Design Knowledge: A Method to Index Knowledge, *Design Studies*, Vol.26, No.6 (2005), pp.565-592.
- (10) Bureau International des Poids et Mesures, *SI brochure, 8th ed.*, (2006), pp.94-180.
- (11) Gruber, T. R. and Olsen, G. R., An Ontology for Engineering Mathematics, Fourth International Conference on Principles of Knowledge Representation and Reasoning, (1994), pp.1-18.
- (12) Bhaskar, R. and Nigam, A., Qualitative Physics Using Dimensional Analysis, *Artificial Intelligence*, Vol.45, (1999), pp.73-111.
- (13) Tokunaga, T., *Information Retrieval and Language Processing* (in Japanese), (1999), University of Tokyo Press.
- (14) Kataoka, N., *Symbols and Graphic Symbols Handbook* (in Japanese), (1993), Keigaku- Shuppan.