信頼性ベースの船級基準とその適用方法

技術研究所　宋 玉中、佐々木 千一

1 はじめに

現行の船級規則の枠組みは基本的に規範的(prescriptive)であり、強度に基づいた単一故障モードを想定した、重用部品の寸法決定を主目的とする構造規定である。しかし、実際に起きた損傷は想定した荷重や強度条件以外の要因によるものが多い。例えば主機の損傷で、自航不能に至ったケースでは潤滑トラブルから発生した主軸受又はピン軸受の溶損或いは焼付、或いは粗悪燃料油又はピストン潤滑の不調から発生するピストン頂部の破孔、リング損傷又はライナ異常摩耗といった故障形態が多い。また、軸系の損傷で、自航不能に至った場合は、規則で想定したようなねじりを受ける丸棒のせん断破壊ではなく、シール部の不具合で海水が浸入し、腐食雰囲気で亀裂が生じ伝播して折損に至ったシナリオが多い。すなわち、現行規則で想定した故障モードで起きる損傷が少なく、逆に規則に関連した規定がなく又はあまり重要視されていないところから重大な損傷が起きていることが多い。

さらに、現行規則が基本的に構造規定である故に、(1) 個々の部品に重点を置き、システム全体としての視点が不足していること、(2) 特定の構造･形状に関するもので、故障モード・事故シナリオの明示がないため概念的または構造的に新しい設計には柔軟に対応できないといった不足点が最近認識されるようになった。

このような背景のもと、主要船級協会の中では信頼性･リスクの概念を導入してよりオープンで、システム全体に重点を置いた、多故障モードにも対応できるような信頼性ベースの規則の制定を目指す動きがある。ここでは NK 技術研究所で検討されてきた結果に基づいて信頼性ベース船級基準及びその適用のあり方について述べる。

2 船級規則における信頼性評価の適用範囲

信頼性ベースの規則は、現行の規範的規則に完全に取って代わることが理論上可能であるが、現時点では以下のような理由で信頼性評価は現行規則の補足と見て良い。

(1) 厳密に言えば基本的な構造寸法の決定も信頼性評価の一環としてとらえることができるが、従来の規則は基本的な寸法決定には実績があるので、寸法決定は従来型の規則に基づいた方が合理的であろう。信頼性評価の重点をシステム全体の構成、冗長･予備品のあり方又は狭義的強度以外の故障形態に置くことで、より効率的な評価ができる上、現状よりも高いシステム全体の信頼性が確保できると考えられる。

(2) 信頼性評価は重大な事故の防止を目的とすべきで、対象を故障によって重大な事故につながりかねないような重要な機器･システムに限定してより高度な信頼性評価を実施するのが効率的である。

推進機関の角度から見て船舶の安全を確保するには7ノット以上の推進能力及び操舵機能の維持が重要と考えられる。この意味では主推進及び操舵に係わるすべての機器･システムが信頼性評価の主な対象と考える。

3 船級規則における信頼性評価のレベル及び評価指標

信頼性評価には大別して定性的分析と定量的解析がある。定性的分析の上、定量的信頼性評価を行い、改善効果を数値で把握できる。こうすることによってシステム全体の信頼性をコスト的に効率よく向上させることが可能となる。また、定量的解析ができれば、承認も行いやすいが、データ不十分などで定量的解析ができない場合は定性的解析結果を以って承認することも認めるべきであろう。

なお、舶用機器･システムに対して定量的信頼性評価を行った場合は以下のような判定基準が考えられる。

・ **現状以上の定量的な評価指標**
現在一般的に承認されている機器･システムに対し、定量的な信頼性解析評価を行い、その結果を判定基準として将来同じ機能を果たす機器･システムに対して適用する。
・ **関係者間で合意された目標値**
参考となるようなものがなく、新しい機器･システムに関しては、オーナーと製造者との間に合意ができ、船級協会が承認した評価目標値を判定基準とする。

また、定量的評価の指標として以下のような３つの信頼性特性値が適当と考えられる。
・ **平均故障寿命 MTTF（Mean Time to Failure）**
平均故障寿命は、「非修理アイテムの故障寿命の平均値」と定義されており、平均寿命（Mean Life）とも呼ばれている。実際の舶用機器･システムは予備品との取換えを含め修理可能な場合が多いので、ここでは MTTF を修理系の相隣る故障間の動作時間の平均値である平均故障間隔(Mean Time Between Failures MTBF)と同じ意味で用いる。平均寿命が判れば、想定した任務期間（Mission Time)、或いは舶用機器･システムの場合は定期的検査間隔と比較して、直感的に理解し易い信頼性の指標を得ることができる。
・ **信頼度（Reliability）**
信頼度は、「アイテムが与えられた条件で規定の期間中、要求された機能を果たす確率」と定義されている。信頼度は、その定義に期間という時間要素が入ってくるので、時間の関数となる。したがって信頼度をいう場合はかならずその任務期間をはっきりさせておかなければならない。また、故障率(λ)が一定の系については時刻 t における信頼度は $R=e^{-\lambda t}$ で計算される。
・ **アベイラビリティ（Availability）**
アベイラビリティは、「修理系がある期間中に機能を維持する時間の割合」と定義されている。言い換えれば、使いたい時にものが使える状態にある確率である。この指標は可稼働率の意味で経済的に重要であると同時に緊急時に船舶の操船能力を確保する意味で安全上も重要と言える。なお、信頼度の低いシステムであっても高いアベイラビリティを確保できることを理解することが重要である。アベイラビリティは信頼度と違って、修理を考慮する。興味深いことは、予備品はアベイラビリティを向上させるが、信頼度には影響を与えないことであり、常用冗長(Parallel redundancy)のみ信頼度を向上させることができる。

4 信頼性解析の手順

信頼性解析の第一歩は、定性的か定量的かに関わらず、システム分析 (System Analysis、SA)である[1)]。システム分析では、システムの作動メカニズム、正常か又は故障かについての状態定義を明確にし、システムの分割 (Break Down) 及びサブシステム間の依存関係などを明確にしておく。故障状態の定義は、一見あたりまえで簡単のようであるが、定量的解析に強く影響を与えるので、できるだけ具体的、狭義的に行う必要がある。この作業は、換言すれば、物理的なシステムを如何に正しく論理的なシステムに変換するかということである。この作業に関しては体系化した方法論がないので、システムの設計及び操作を熟知する者と信頼性評価の専門家とが綿密な意思疎通のもと共同して作業を進める必要がある。

システム分析がある程度完了した段階で、より具体的な故障モード影響解析 (Failure Modes and Effects Analysis, FMEA) が行われる。FMEA の主目的は、SA で定義されたシステムの故障状態を生起させるような初期事象(Initiating Events)の抽出であるが、その実行の過程でシステムに対する関係者の理解が深まることも期待される。

システムの故障状態、論理的構成及び初期事象などが明らかになった段階で、必要に応じて種々の定量的計算が行われる。本会では信頼性ブロック図 (Reliability Block Diagram, RBD)をベースにしたシステム全体の信頼度、アベイラビリティの算出或いは予備品の最適化 (Spare Optimal) などを定量的に計算できるソフトウェアパッケージを用いている。RBD は本来名前のとおりシステムを機能的・論理的に表した図であるが、それに種々の高度な計算機能を附加することも可能である。

5 承認審査をサポートするソフトウェアシステム

信頼性ベースの船級基準を適用するには、その複雑さのため、Fig.1 に示すように、規則だけではなく適用に関する詳細な手順を示した実施指針や各種の計算及びデータの管理をサポートするソフトウェアも必要となる。冗長構成を含むシステムの信頼度の計算などはモンテカルロ法 (Monte Carlo method) などのような高度な計算が必要となるので、手計算は不可能である。また、小規模のシステムで FMEA のような定性的解析を行う場合であればシートを使っての手計算でも可能であるが、システム規模が大きくなり膨大なデータを各種計算モデルとともに一元に管理できるようにするにはソフトウェアは欠かせない。

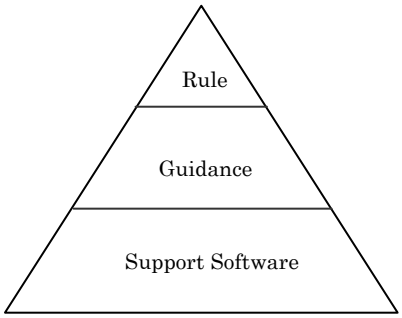

Fig.1 Resources Needed for Application of Reliability-based Classification Criteria

以下、本会が所有するソフトウェアシステムについて紹介する。当該ソフトウェアシステムは、入出力フォームを一部変更した以外は大枠として米国 Relex Software 社が開発した信頼性評価ソフトを採用している。システムには Fig.2 に示すようにデータベースのほか RBD、FMEA、FTA 及び ETA といったモジュールがある。これらのモジュールは有機的に統合されていてデータの相互的利用が可能である。

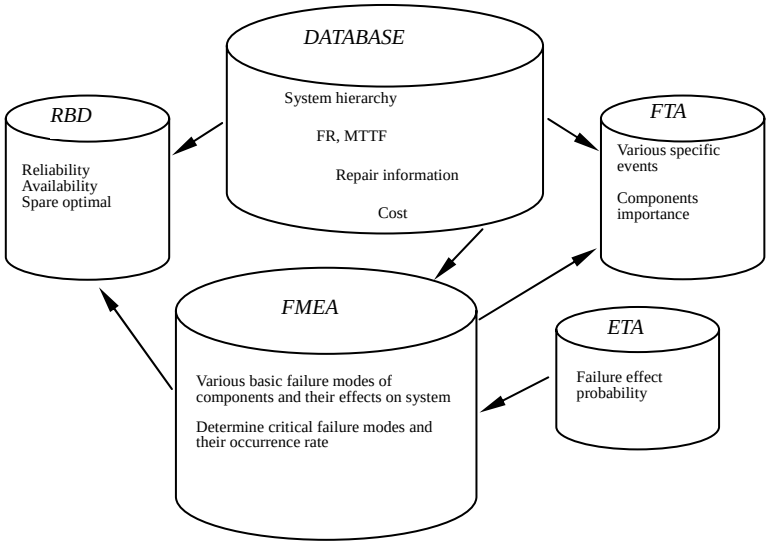

Fig. 2 Configuration of Software System for Reliability Analysis, Arrows indicate Major Data Flows

以下各モジュールについて簡単に紹介する。

(1) データベース

データベースには評価対象となるシステムの階層構造を表現するほか、システムの構成部品(機器)の故障率 (Failure Rate, FR)又は平均故障寿命 (Mean Time to Failure, MTTF)、平均修復時間 (Mean Time to Repair, MTTR) などの基本データが格納され、各種モジュールを用いた解

析に供される。データベースへの入力は Fig.3 に示すようにまず System Tree というウインドー上でシステムを構成するすべての部品・機器番号(Part Number) を入力し、必要に応じて階層を付ける。個々の部品・機器の詳細な情報は General Data というタブのところに入力する。System Tree 上にある Part Number を選択すると、General Data タブはその部品・機器のものに自動的に変わる。RBD 又は FTA といった計算モジュールからデータベースへのアクセスはそれらのモジュール中の項目と System Tree 上の項目の間にリンクを張るだけで必要な情報を得ることができる。

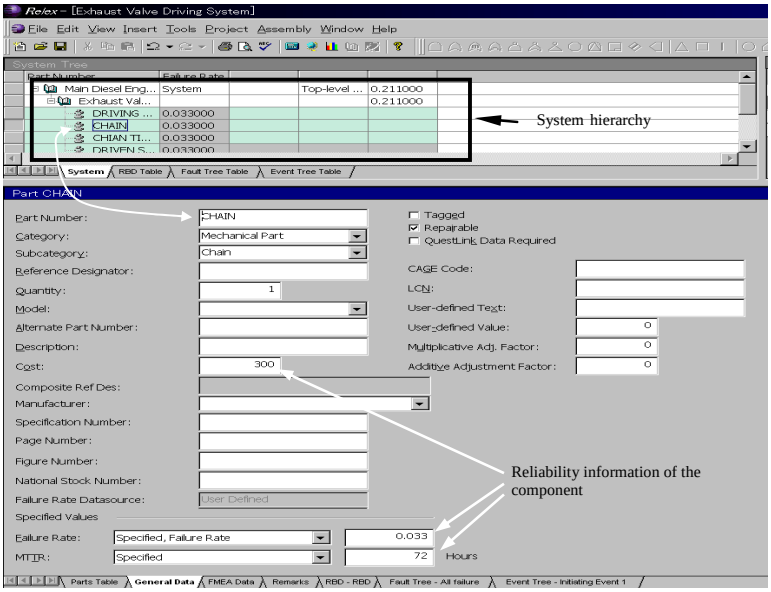

Fig.3 Window for Input into Database

（2）RBD

RBD では、Fig.4 (a)のように 2 つの端子を持った 1 つのブロックを用いて 1 個の部品を表している。部品が正常に機能している場合は、両端子が連結している状態に対応する。逆に両端子が切断している場合は、部品が故障しているものと見なす。複数の部品から構成されるシステムは、Fig.4(b), (c)に示すような直列又は並列の組合せで表現する。この場合でも、両端子が何らかの経路でつながっていれば、システムとして機能している状態を示す。

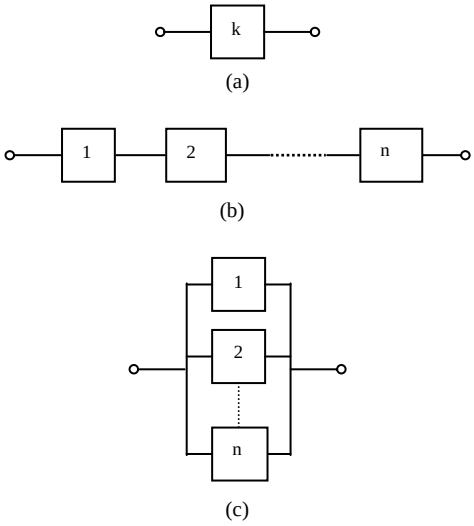

Fig.4 Examples of Reliability Block Diagrams

RBD モジュールは、システム全体の信頼度、アベイラビリティの算出或いは予備品の最適

化などを行う機能を備えている。計算の際、システムの構成によって解析解がある場合はソフトウェアが自動的に解析解を求める。解析解がない場合はモンテカルロ法を用いて数値解を求める。RBD では後述する FMEA 解析の結果を見ながら、システムの論理的な構造を理解した上でシステムの機能モデルを論理的に表現する必要がある。機能ブロックは、おおよそ同一解析レベルとするのが好都合である。また、各機能ブロックが独立に機能し又は故障するのが RBD による計算の前提条件であるため、一つの機能ブロックには、他の機能の品目を入れてはならない。取り合いの部品・機器についてはブール代数(Boolean algebra)の基本法則で整理する必要がある。例えば制御ユニット A が B と D の両方を制御するとした場合、形式上は Fig.5 のような RBD の構成も考えられるが、このまま計算させると 2 個の独立した要素 A があるように計算され、実システムより信頼度が低く計算される。

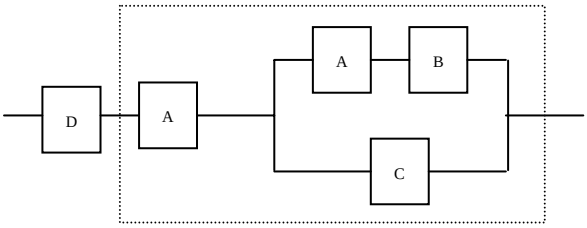

Fig.5 An Erroneous Reliability Block Diagram

そこで、点線で囲んだブロックの信頼度をブール代数を用いて式(1)で表し、

$$\begin{aligned} A\cap[(A\cap B)\cup C] &= A\cap[(A\cup C)\cap(B\cup C)] \\ &= A\cap(B\cup C) \end{aligned} \tag{1}$$

Fig.5 の中の A のような取り合いの部品･機器は、複数箇所で出現していない Fig.6 のように整理しなければならない。

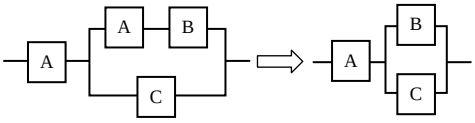

Fig.6 Correction of the Block Enclosed by Dotted Line in Fig.5

また、故障モードによってシステムの論理的構成が変わる場合もある。このような場合には故障モードごとに信頼性ブロック図を作成する必要がある。例えば、Fig.7 のように物理的には直列に接続している 2 個のバルブからなるシステムの論理構成について考えると、

(1) 流れている状態から、故障によって流れなくなる。

(2) 流れていない状態から (2 個のバルブが共に閉)、故障によって流れ出す。

といった 2 つのシステム故障モードが考えられる。

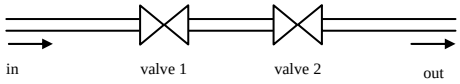

Fig.7 Two Valves Physically Connected in Series

故障モード(1)では、どちらか 1 個のバルブが閉塞となれば故障を引き起すので、2 個のバルブは論理的に直列構成となる。故障モード(2)では、2 個のバルブがともに故障によって開とならなければ故障状態とはならないので、2 個のバルブは論理的に並列構成となる。したがって Fig.8 に示すような 2 つの故障モードを想定した信頼性ブロック図が必要となる。

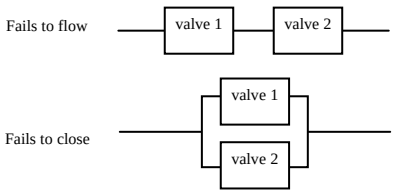

Fig. 8 Different RBDs Needed for Different System Failure Modes

RBD モジュールにおける予備品最適化計算のアルゴリズムは、個々の要素に予備品を追加していき、追加した予備品のコストと、追加によって得られたアベイラビリティの向上による不稼動損失の低減を比較し、損害の低減が予備品コストより大きければ予備品の追加を決定し、そうでなければ追加をしないというものである。

なお、RBD を用いてシステム全体の信頼度やアベイラビリティを計算する場合には、個々の部品・機器の信頼度を System Tree のデータベース上から固定値としての故障率 (specified failure rate) を用いるほか、故障寿命或いは故障間隔の特定の分布が判ればそれを使用することもできる。固定値の故障率を使うのは故障寿命または故障間隔が指数分布(exponential distribution) の場合に限定されるが、他の分布も選択できることによってより多様で実際の故障形態に即したシステム信頼度の計算ができるようになる。指数分布以外の故障分布関数として Normal, Lognormal, Weibull, Rayleigh, Uniform 及び Time Independent が用意されている。

冗長形態としても並列冗長 (parallel redundancy) のほか待機冗長(stand-by redundancy)の選択も可能である。また、 Quantity Required に適当な値 (m)を入力して冗長を構成する要素の総数 (n)との組み合わせで、m 個が正常に作動していれば、システムは正常に作動するように構成する冗長、いわゆる m/n 冗長 (m-out-of-n system)システムの表現もできる。例えば、推進主機の場合には、故障による減筒運転があり得るが、この状態をシステムが機能している最低線と考えてシステムの信頼性を評価するならば、5/6 冗長 (6 気筒機関で 1 気筒カット)のモデルが必要となる。

(3) FMEA

FMEA は、設計の不完全や潜在的な欠点を見出すため、構成要素の故障モードとその上位アイテムへの影響を解析する技法である。その主目的は、考えられるすべての初期事象、すなわち、一次的故障モードを列挙することにある。解析の目的に応じてリスクの高い故障モードだけを選定し、RBD など他の解析方法と組み合わせてシステム全体のリスクをコスト的に効率よく低減させることができる。

故障モード抽出の方法としては、(1) すでに経験した故障データ(historical data)の利用、(2)専門家による What-if 分析、すなわち専門知識と想像力をもって何がどうなったらシステムがどうなるかを分析して未経験の故障モードを考え出す手法、(3) Table 1 に示すような一般化された故障モード[2] に照らしてチェックする方法等がある。

Table 1 Generic Failure Modes

1	Structural failure (rupture)	18	False actuation
2	Physical binding or jamming	19	Fails to stop
3	Vibration	20	Fails to start
4	Fails to remain (in position)	21	Fails to switch
5	Fails to open	22	Premature operation
6	Fails to close	23	Delayed operation
7	Fails open	24	Erroneous input (increased)
8	Fails closed	25	Erroneous input (decreased)
9	Internal leakage	26	Erroneous output (increased)
10	External leakage	27	Erroneous output (decreased)
11	Fails out of tolerance (high)	28	Loss of input
12	Fails out of tolerance (low)	29	Loss of output
13	Inadvertent operation	30	Shorted (electrical)
14	Intermittent operation	31	Open (electrical)
15	Erratic operation	32	Leakage (electrical)
16	Erroneous indication	33	Other unique failure conditions as applicable to the system characteristics, requirements and operational constraints
17	Restricted flow		

FMEA の本来の順序は、部品またはサブシステムのあらゆる故障モードを検討しそれらの検討対象となるシステムへの影響を調べることで重用な故障モード、システムの弱点及び改改善策を考えていくものである。しかし、実際に同型システムに故障事例があれば上記の順序とは逆にまずシステム故障（FMEA の中の END EFFECT）があって、何が原因かと調査していけば比較的効率よくシステムの弱所、主要故障モードの抽出ができる。これはいわゆる Cause-and-Effect Relationship を用いた Cause Analysis である。その際、原因をどこまで深く掘り探れば良いか、いわゆるどれを Root Cause にするかの問題に直面するが、原則として現実的な対策が取れる程度まで原因を突き止めれば良いと考えられる。

ソフトウェアシステム上は、Fig.9 に示すように System Tree ウィンドー上で Part Number を選び、右側の FMEA ウィンドー上で当該部品・機器の考えられるすべての故障モードを入力する。そして個々の故障モードを選択してその故障モードに関する詳細情報を下の FMEA Data ウィンドー上で入力する。

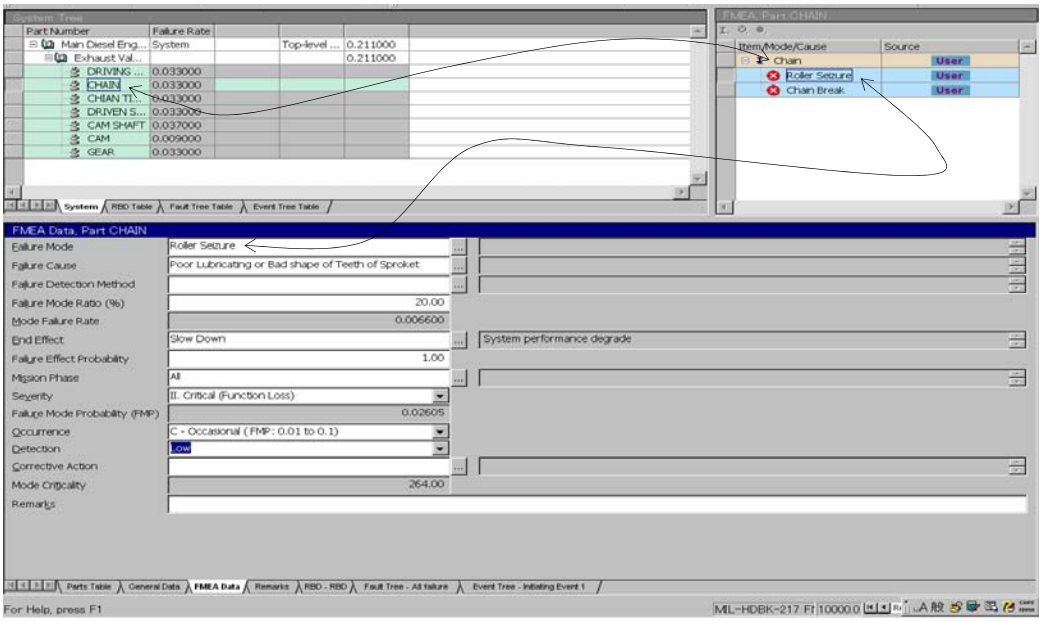

Fig.9 Input Window for FMEA

入力画面に表示されている項目のうち Mode Failure Rate, Failure Mode Probability, Mode Criticality は FMEA モジュールの計算結果であり、計算が終了しなければ表示されない。Mode Failure Rate は式(2)で表される。

$$\begin{aligned} &Mode\ \ Failure\ \ Rate \\ &= Item\ \ Failure\ \ Rate \times Failure\ \ Mode\ \ Ratio \end{aligned} \tag{2}$$

ここで、Item Failure Rate はデータベースの General Data タブで入力した failure rate である。Failure Mode Ratio は当該故障モードが全故障モードに占める割合である。全故障モードを合わせて 100%になるように入力する必要がある。たとえば舶用歯車の損傷を考える場合、歯の折損と歯面のピッチングの比率は 1：3 と言われているので [3)]、この例の場合歯の折損とピッチングに対応する Failure Mode Ratio をそれぞれ 25%、75%と入力する。

Failure Mode Probability は、ある故障モードが想定した期間内 (Mission Time) で起きる確率で、式(3)で表される。

$$\begin{aligned} &Failure\ \ Mode\ \ Pr\,obability \\ &= 1 - exp\left(- Mode\ \ Failure\ \ Rate \times Mission\ \ Time\right) \end{aligned} \tag{3}$$

Mode Criticality は、故障モードの重要性を計る重要な指標の 1 つであり、式(4)で表される。

$$\begin{aligned}&Mode\ \ Criticali\ ty\\&= Failure\ \ Effect\ \ Pr\ obability\ \times Mode\ \ Failure\ \ Rate\ \times\\&\quad OperatingT\ \ ime\end{aligned} \tag{4}$$

式(4)から判るように、Mode Criticality は概念として当該故障モードの起こり易さ(Mode Failure Rate×Operating Time)と、起こったときにシステム全体に影響を及ぼす確率 (Failure Effect Probability) を合わせて考えることである。Failure Effect Probability は FMEA の直接入力項目であり、MIL-STD-1629A に基づいた概念である。これは解析実行者がシステム専門家の意見をもとに判断するもので、定量化の時の目安として次のような推奨値がある。またこの値を正確に推定する必要のある場合には ETA を実施して考察する必要がある。

Failure Effect	**Failure Effect Probability**
Actual loss	1.0
Probable loss	>0.1 to < 1.0
Possible loss	0. to = 0.1
No effect	0

また、Operating Time は式(5)で算出される。

$$\begin{aligned}&Operating\ Time\\&= Total\ Mission\ Time \times Mission\ Phase\ Percent\end{aligned} \tag{5}$$

Operating Time の概念を導入することで、特定の期間内にのみ起きる故障モードをより現実に即した形で評価することが可能となる。例えば舶用機関の total mission は始動と通常運転という 2 つの phase に分けられ、始動時にのみ使われる部品･機器の故障モードを論議する場合は始動という phase の割合を考える必要がある。

FMEA の計算自体は単純で、上記の計算以外にいわゆるリスク評価がある。リスク評価というのは故障の発生頻度(occurrence)と故障が発生した場合の結果の重大さ(severity)とを合わせて考えることである。

Occurrence は通常単位期間内(例えば一年間)に起こりうるであろう好ましくない事象の回数である。ここでは MIL-STD-1629A の考えを踏襲し、想定した期間内の故障確率を用いることにし、以下のような定義を提案する。

Categories	**Definitions**
Category A-Frequent	failure mode probability ≥ 0.2
Category B-Reasonably probable	0.2 > failure mode probability ≥ 0.1
Category C-Occasional	0.1 > failure mode probability ≥ 0.01
Category D-Remote	0.01 > failure mode probability ≥ 0.001
Category E-Extremely unlikely	failure mode probability < 0.001

一方、故障結果の重大さ(severity)については、定量的な定義は難しく、定性的定義であれば各分野において多少差異があるものの、概ね一致している。ここでは、船舶の実情を考慮して次のような定義を提案する[4, 5]。

Categories	**Definitions**
CategoryⅠ-Catastrophic	死亡または重度の後遺症が残るけが或いはシステム全損
CategoryⅡ-Critical	重傷または自航不能を引起すシステムの重大な損傷
CategoryⅢ-Major	中度のけがまたは減速航行を余儀なくされるシステムの損傷
CategoryⅣ-Minor	人的けがなくかつ通常航行に支障を来たさない程の軽微なシステム損傷

このような解析は一見簡単で当たり前であるが、徹底して実行することにより感覚的に見落としやすい部分を見出すことが可能と考えられる。機械部品または機器の場合、その物理的

な大きさによって重視される度合いが変わる傾向があるように思われる。例えば、最近、ディーゼル機関連接棒大端部のボルトの破断によってクランクケースの破損まで発展してしまう、いわゆる機関の足出し事故が数件あった。ボルト破断の原因の殆どは開放検査や整備の後、締め付けが不十分のため過大な変動荷重が生じ金属疲労を起こしたと推定されている。足出し事故では、機関が全損に近いほか、死傷事故にもつながりかねないので、上記のような解析を行えば事故の致命度が限りなく catastrophic に近いことが判る。したがって、たとえ故障発生率がそう高くなくても対策が求められることになるであろう。この意味では、ボルトの重要度は従来から重視されてきたクランク軸にも匹敵すると言えよう。

また、Mode Criticality の評価結果を見て、この項目がある値以上の故障モードだけを抽出して RBD に持っていって計算することも可能であるので、重要な故障に的を絞った、効率的な対策が取れる。

(4) FTA

FTA は信頼性又は安全性上、その発生が好ましくない事象について、論理記号を用いて、その発生の経過を遡って樹形図に展開し、発生経路及び発生原因、発生確率を解析する技法である。まず FTA に含めるべき事象は、単独又は他の事象との組み合わせでトップ事象を引き起す可能性のある全ての初期事象である。FMEA で羅列した初期事象がハードウェア的な故障が主であるのに対して、FTA は操作や操縦またはメンテナンスに起因する初期事象も考慮に入れられるので少し違った角度からシステムを見ることができる。この意味で FTA による展開は、「物」に沿った展開ではなく「シナリオ(scenario)」に沿った展開と言える。「物」に沿った展開ではハードウェア的な故障だけに注目することになりがちであり、シナリオに沿った展開をすれば、ハードウェア的な故障は勿論、各 sub-system または assembly 間のインタフェース又は相互作用による故障、さらに human error を含む操作･操縦などの人為的故障延いては環境の影響も考慮に入れることができる。

トップ事象はできるかぎり具体的に定義しなければならない。これは RBD のところですでに述べたようにトップ事象がどのような故障モードを想定したかによって展開していく論理的な構成が変わる場合があるからである。

本ソフトウェアシステムの FTA モジュールには豊富な種類の論理ゲート(gate)が用意されており、実際のシステムの複雑な論理構成にも対応できる。

定性的 FTA 解析は minimal cut set の抽出である。Minimal cut set とはトップ事象を生起させるもっとも小さな事象の集合である。通常は cut set が小さいほど一般的に生起の確率が高いので、minimal cut set の抽出は原因を調査する上で重要である。システムが大規模になり、FT が複雑になればマニュアル的には cut set の抽出も容易ではなくなり、ソフトウェアによる自動抽出が重要な意味を持つようになる。

定量的解析では各ゲートの生起確率を算出するほか、各事象の重要度 (importance)解析もできる。重要度解析を通じ、システムの弱点を見つけ出したりまたは部品･機器の故障がシステムの機能に如何に影響するかを把握することによって、より的確な信頼性向上の対策を講じることが可能となる。

重要度の尺度 (importance measure) には Birnbaum, Criticality 及び Fussell-Vesely の 3 種類が用意されてある。多くの場合その評価結果が一致するが、Birnbaum は感度を意味する式(6)で定義されているので理解し易く、利用を推奨したい。

$$Importance(i \mid t) = \frac{\partial R_{system}(t)}{\partial R_i(t)} \qquad (6)$$

ここで、$R_{system}(t)$は時刻tにおけるシステム全体の信頼度である。$R_i(t)$は時刻tにおけるi番部品･機器の信頼度である。したがって、上記式左辺の時刻tにおけるi番部品･機器の重要度とは、その部品・機器の信頼度に対するシステム全体の信頼度の感度である。感度の高い部品・機器に対して信頼性改善策を講じればシステム全体の信頼性がより効果的に向上することとなる。

部品・機器の重要度は、その部品・機器のシステム上の位置及びそのときの信頼度と関係し、時間的にも変化するので、実際に計算してみないと感覚的に判断するのは難しい。たと

えば Fig.10 に示すようなシステム構成の場合、C がもっとも重要であることは直感で判るが、F と A, B が同等に重要と考えるかもしれない。しかし、計算してみればその重要度が Table 2 に示すような順番となり F が A, B より重要であることが判る。

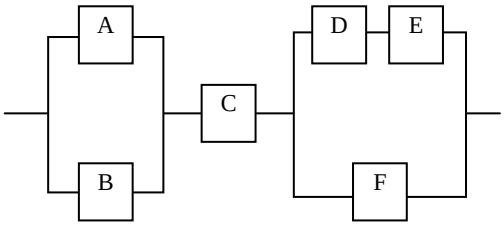

Fig.10 Sample System for Importance Analysis

Table 2 Birnbaum Importance Measure for System Shown in Fig. 10

Component	Importance
C	0.9739
F	0.1625
A	0.0846
B	0.0846
D	0.0772
E	0.0772

6 解析例

(1) 推進機関信頼性の現状

3.の中でも少し触れたが、信頼性評価を行った際の判定基準として、既に認められている同型のシステムが達成した信頼性レベルが考えられる。ただし、信頼性の定量的指標を計算するにもどのような事象をもって故障とするかによって結果が変わってくる。5.(3)のところで舶用推進機関の故障の重大さについてカテゴリー分けしたが、本会では従来から重大な推進機関の故障を「一級損傷」と「二級損傷」に分けてきた。一級損傷とは自航不能に至った故障を言う。二級損傷とは減速航行を余儀なくされた故障を言う。したがって一級損傷というのは Critical 又は Catastrophic の範疇に属し、二級損傷というのは Major の範疇に属する。なお、故障の多くが損傷(damage)を伴うので、これまでには「損傷」と「故障」をあまり区別せずに使ってきたが、理論上は損傷を伴わない故障もあり得るので、これからは損傷自体を論ずる場合を除き「故障」を用いることにする。

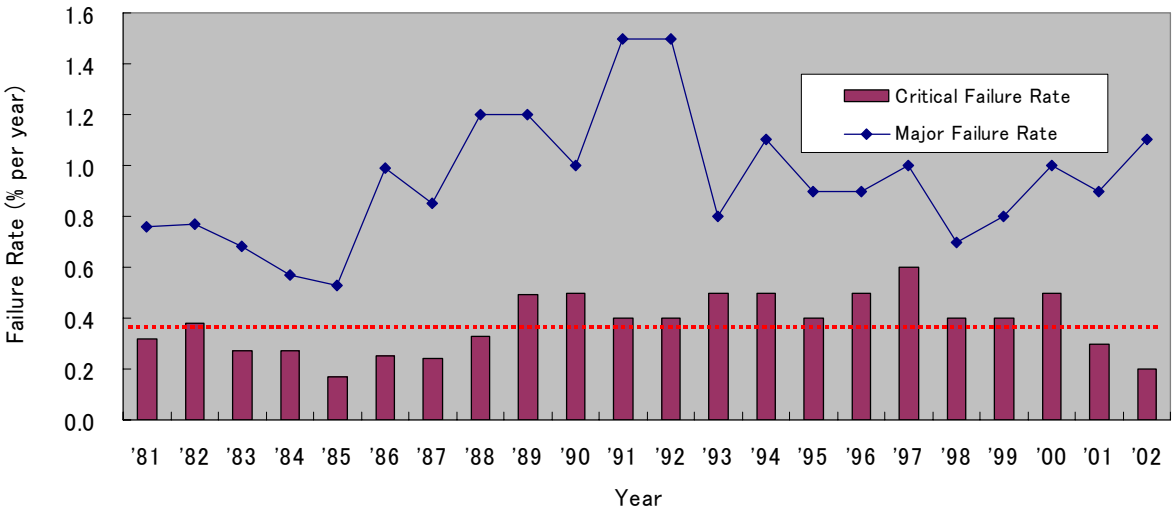

Fig.11 Critical and Major Failure Rate against Year

NK 船級船の機関一級、二級故障率は年によって多少の変動があるものの、Fig.11 に示すように一級は年 0.4%、二級は年 0.9%程度で推移している。

したがって年間故障率で信頼性評価の 1 つの基準を提案するならば一級故障で 0.4%、二級故障で 0.9%が一つの選択と考えられる。

ただし、一級故障に限定して船齢別及び部位別に見てみると Fig.12 に示すような結果が得られた。すなわち、全体の一級故障率でも、部位別の一級故障率でも時間と共にほぼ線形増加し、経年劣化の傾向を示している。故障率が一定でないので、基準としては故障率よりもある期間内における信頼度の方がよいと思われる。そこで、故障率が線形増加なので、故障は形状母数が 2.0 となる 2 母数のワイブル分布で表すことができる。このような故障データを用いて各船齢期間(5 年)における一級機関故障を起こす確率を試算し、Fig.13 に示す。

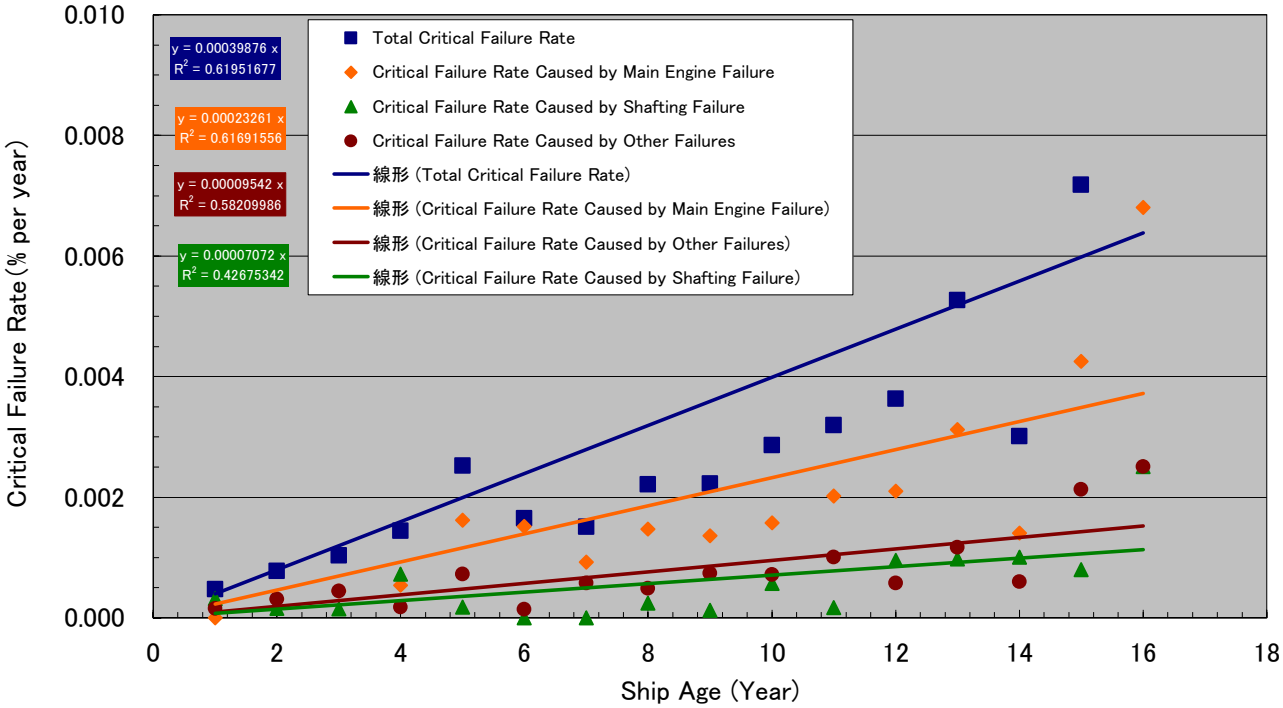

Fig.12 Relationship between Critical Machinery Failure Rate and Ship Age

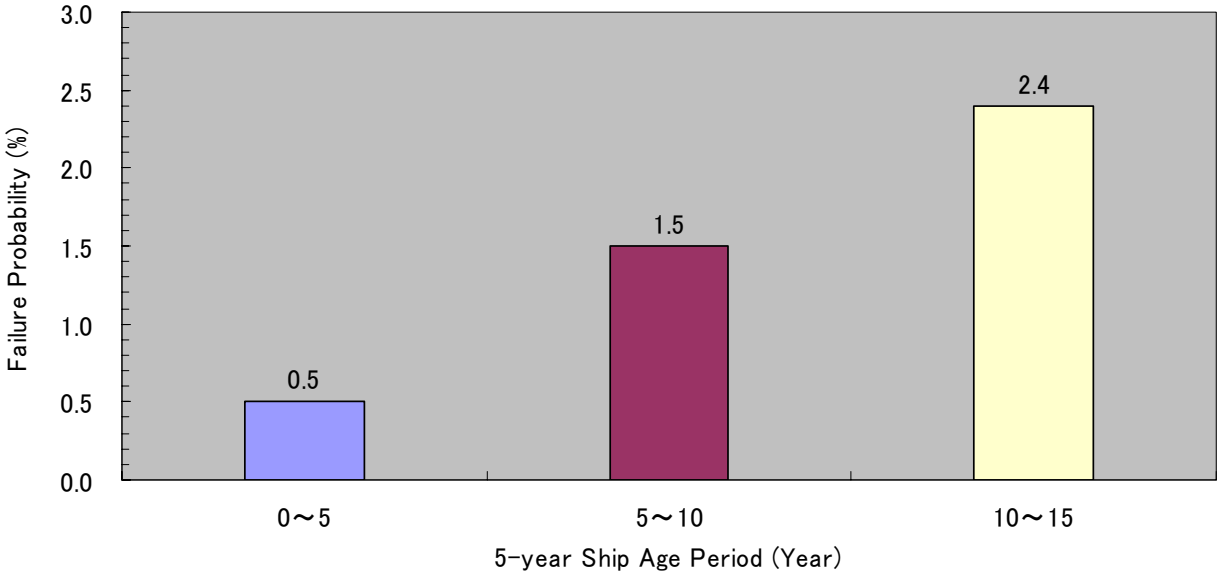

Fig.13 Critical Machinery Failure Probability over Different Five-year Ship Age Period

(2) 推進機関の故障原因解析

これらの重大な機関故障を引起すそもそもの原因は何かを調べるために、FMEA のところで紹介した Cause-and-Effect Relationship を用いて Fig.14 のようにもう少し詳細に展開してみる。

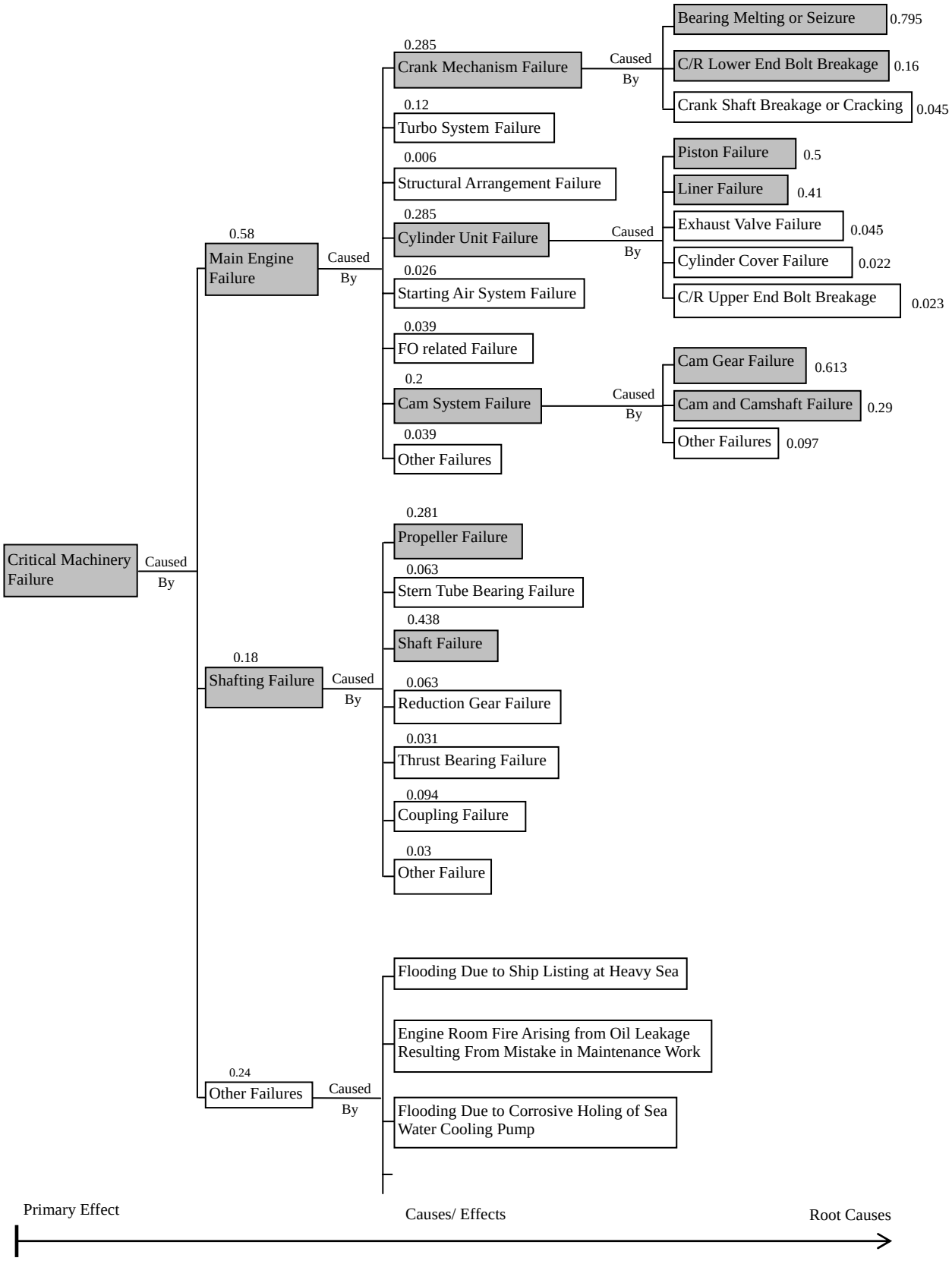

Fig.14 Cause Effect Analysis of Critical Machinery Failure

Fig.14 では、一番左側に Primary Effect として想定するシステム故障を書き、右の原因としての Root Cause に向って段段と Cause を展開していく。途中の部分は Effect であると同時に Cause でもある。どれを Root Cause とするかは前述したように、それに対して合理な対策が取れるようなところが 1 つの選択肢と考えられる。この意味では Fig.14 における展開は Root Cause の抽出にはまだ不十分である。Root Cause について後ほど述べるが、ここでは Fig.14 を用いて機関の一級故障に特に重要な原因の抽出を試みる。図中ボックスの上又は右横に書いてある数値は原因としての割合である。これらの値の大きさからも各原因の重要度について想像がつくが、ここでは式(6)で定義した信頼性重要度の概念を用いて評価してみる。ただし、機関一級故障直下の原因としての Other Failures については例として書いてあるように人為ミスなどを含め多岐に渡っているのでこの解析からは除外した。主機及び軸系の故障を対象に信頼性重要度解析を行った。前述したように重要度解析は FTA を用いる。主機故障の直下にある原因(サブシステムレベル)を例に Fig.15 のような故障の木を構築し重要度を計算してみた。結果を Fig.16 に示す。なお故障木上に示してある数値は 15 年における不信頼度である。

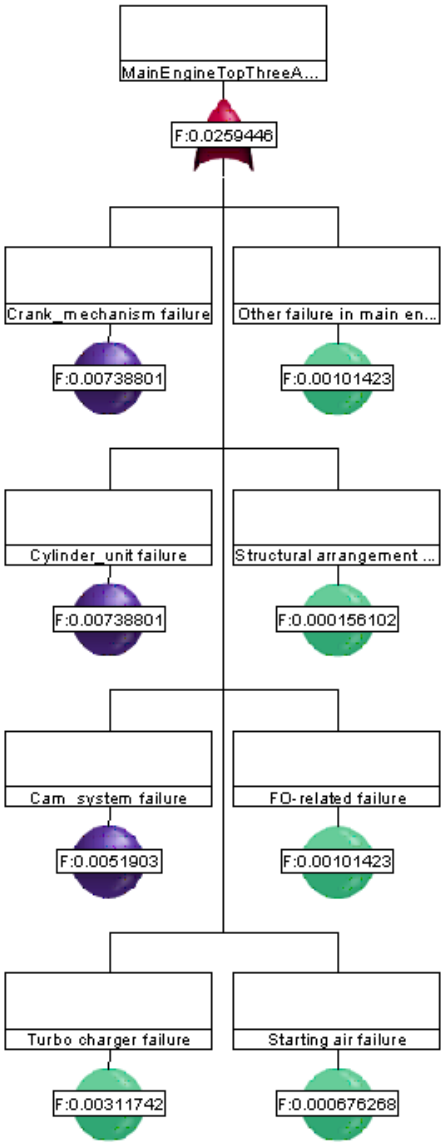

Fig.15　FTA for Critical Main Engine Failure

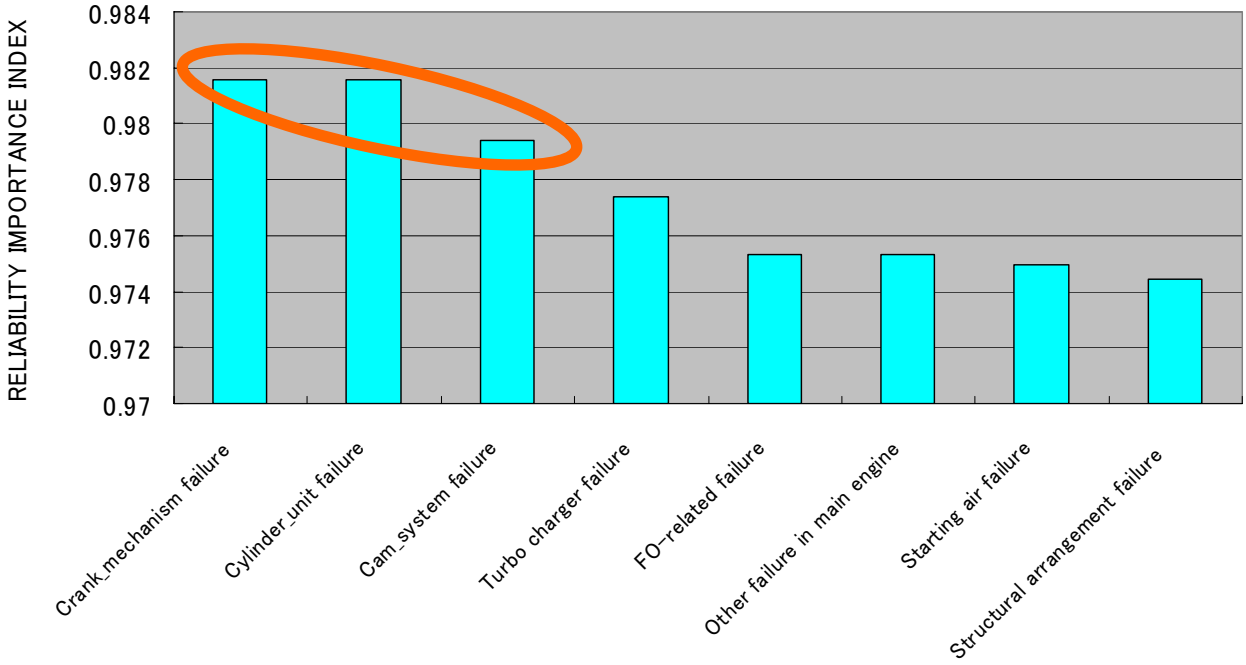

Fig.16 Reliability Importance of Main Engine Subsystems

Fig.16 から判るように一級主機故障を引起す重要なサブシステム故障としてはクランク機構、シリンダユニット及びカムシステムが挙げられる。こられ 3 つのサブシステムに対応するもう一段詳細な（部品レベルにおける）信頼性重要度解析を行って、Fig.17 に示すような結果が得られた。この結果から判るように一級機関故障を引起す主機の主な故障として、主軸受又はピン軸受の溶損･焼付が突出して首位に、頂部破孔などのピストン故障、歯の折損などのカム軸駆動用歯車の故障、異常摩耗などのライナの故障、折損などのカム軸の故障及び連接棒大端部締め付けボルトの折損が続いている。この結果から、軸受のような摺動部品及びピストン、ライナなどの高温に晒される部品の相対的信頼性の低さが改めて数値として明らかになった外、カム駆動用歯車の故障が以外に深刻であることも新たに判った。

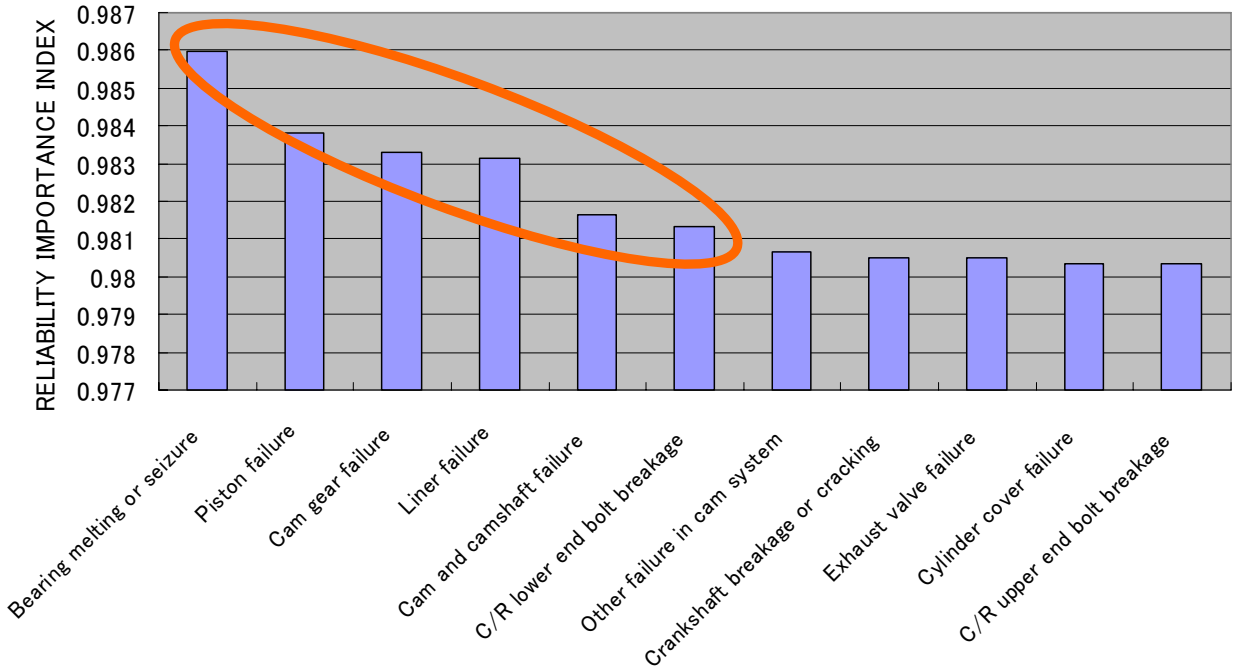

Fig.17 Reliability Importance of Main Engine Components

注目すべき点は、主要原因の第 3 位を占めるカム軸駆動用歯車の強度検討を規則では要求していないことである。

同じ解析を軸系に対して行った結果、Fig.18 に示すような部品の重要度指標が得られた。

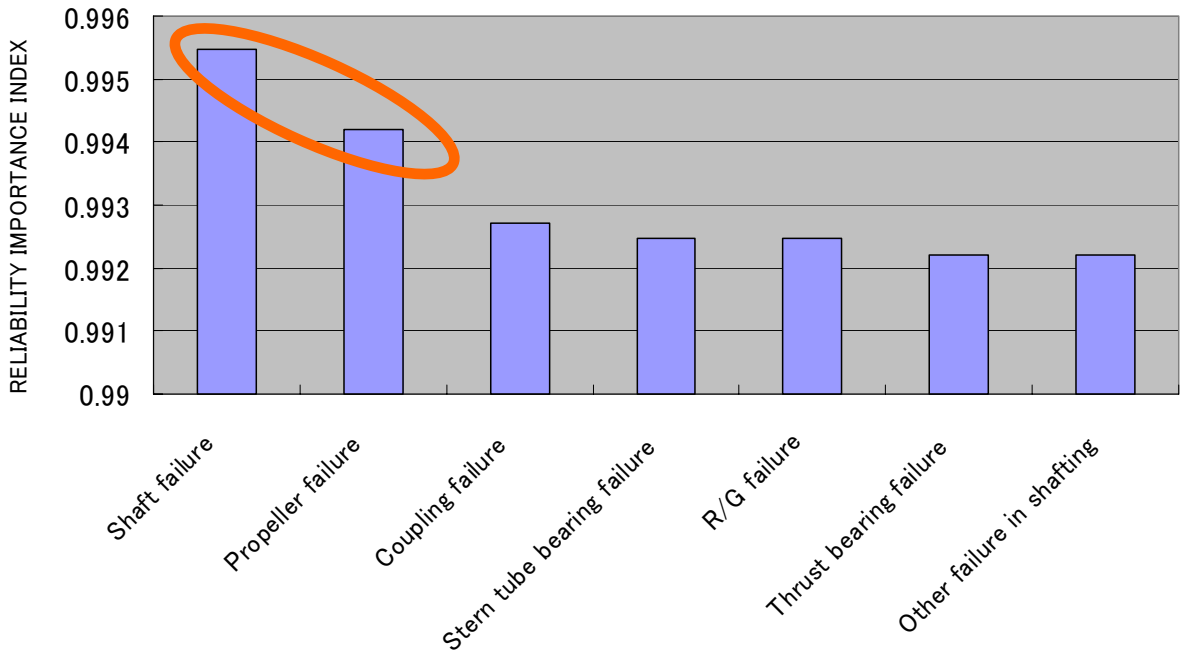

Fig.18 Reliability Importance of Shafting Components

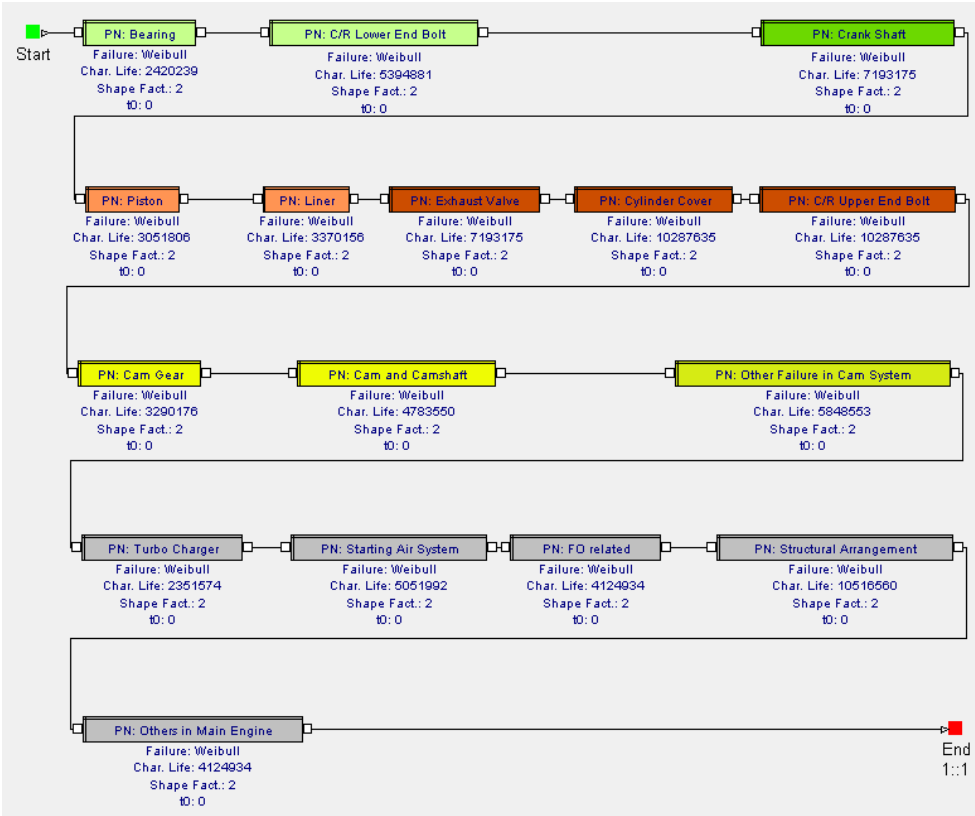

Fig.19 RBD for Calculating Reliability of Main Engine

また、この重要度解析の結果に基づいて仮に対策が取られ、個々の部品の信頼性が改善された場合、主機全体がどの程度改善されるかについて検討してみた。

Fig.17 に示した上位 6 部品の故障率が半減したとして Fig.19 に示すような RBD を用いて試算した主機全体に関する結果は次のとおりである。

MTTF は 82.4 年から 102.7 年に、また、15 年における信頼度は 97.43% から 98.34%になり、主機全体として顕著な改善があったと言えよう。

一方、仮に上記のような信頼性重要度を評価せずに改善を計ろうとして信頼性重要度のあまり高くないクランク軸、排気弁などの残り 5 品目に対し、故障率が完全に 0 となるまで品質を向上させたとして、主機全体の信頼性改善は同様な計算で次のような結果となる。MTTF は 82.4 年から 84.9 年に、また、15 年における信頼度は 97.43% から 97.59%になり、すなわち、主機全体としての改善効果は無視できるほど小さく、効率的な信頼性向上策とは言えないことが明らかである。

また、主機 6 項目、軸系 2 項目合わせて 8 項目の重用部品の一級故障率を半減させた場合は推進機関全体としての年間一級故障率が現状の約 70%まで低下すると計算される。これに基づいて 15 年までの各時間ポイントにおける信頼度が Fig.20 に示すように計算される。即ち、8 項目の重用部品に的を絞って重点的に改善策を講じ、個々の故障率を半分程度に減らせば 15 年間のスパンで見た場合信頼度が約 1.2%高くなることが判る。換言すれば一級故障を引起す確率が 1.2%程度減ることとなり、本会船級船 6000 隻として 15 年間の一級機関故障が約 72 件減る計算となる。

機関の一級故障が起きた場合、不稼動損害も含めた船主が蒙るであろう損害金額、或いは保険会社が請求を受ける保険金の額は状況に応じて相当変動するが、平均して一件あたりの損害額を 5 億円と見積もって 15 年間通算すると、上記のような改善によって 360 億円の経済的利益があると概算できる。

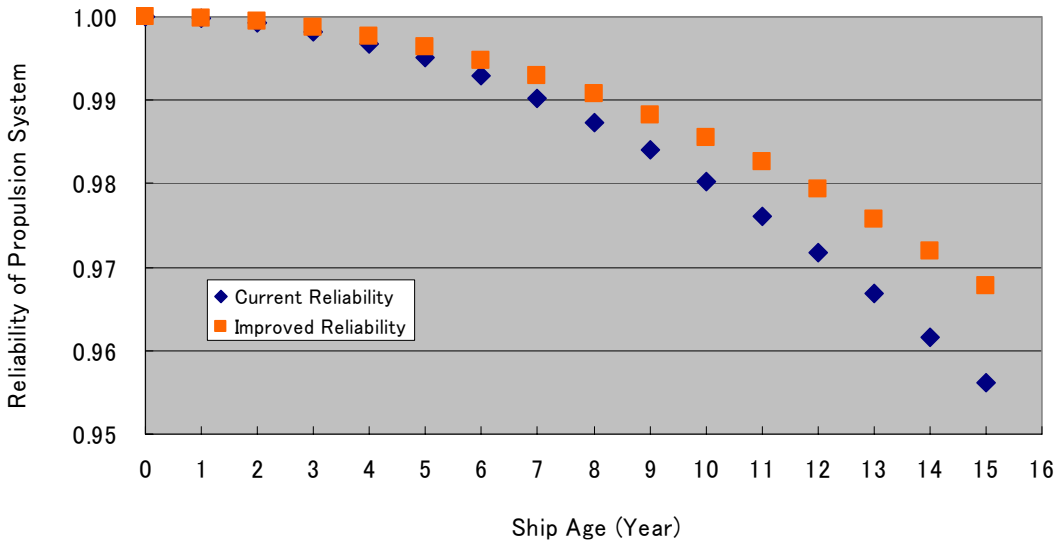

Fig.20 Improvement in Reliability of Propulsion System by Halving Failure Rate of Reliability-Sensitive Items

(3) 推進機関信頼性向上の対策

では、具体的にどのようにすれば信頼性重要度の高い部品の故障を減らす又は影響を軽減することができるかについて Table 3 に示すような簡易な FMEA シートを使って参考程度に検討してみた。誰が対策を取るべきかはその原因によって異なる。設計又は製造上の問題は主に造船所またはメーカーが対策を検討すべきで、操作或いは日々の保守に起因する問題はオーナー及び乗組員が注意して防ぐべきである。船級協会は、現行規則の枠組みでは、規則規

定以上に対策を要求することはできないが、すべての有効と考えられる対策の確実な実施を促し、確認すべきであろう。

Table 3 Simplified FMEA for Important Components of Propulsion System

Item	Failure mode	Failure cause	End Effect	Corrective Actions
主又はピン軸受	- 溶損焼付	- L0 への異物混入,L0 不足(外側からの腐食から L0 ﾀﾝｸ破孔、シリンダの噴き抜き、L0 クーラの腐食から漏水、ストレーナエレメントの破損、油圧調整弁の固着) - 新造、経年及び修理時のミスアライメントから過大または逆の軸受荷重	Critical	- L0 経路の見直し*B L0 経路の日々の保守*0 - 新造時のアライメントの見直し*B 軸受衰耗の監視*B,*0
ピストン	- 頂部破孔 - リング固着	- 粗悪油による燃焼不良過熱 - 冷却水への異物の混入過熱 - 冷却側からの腐食 - 粗悪油による油膜の破壊 - F0 噴射不良による後燃え	Critical Critical	- 粗悪油の不使用*0、F0 システムの見直し*B - 冷却経路の見直し*B - 冷却水の管理*0 - 粗悪油の不使用*0、F0 システムの見直し*0 - Injector の保守*0
カム軸駆動歯車	- 歯の欠損 - キー溝からの亀裂	- 曲げ疲労 - 疲労	Critical Critical	- 強度評価を見直しモジュール又は歯幅を増す*B - 形状の見直しなどの強度再評価*B
ライナ	- 亀裂	- 粗悪油による過熱 - 冷却水管のスケール、閉塞	Critical	- 粗悪油の不使用*0、F0 システムの見直し*B - 冷却水経路の見直し*B、点検*0
カム軸	- 折損	- 疲労	Critical	- 強度評価を見直し*B
連接棒大端ボルト	- 折損	- 締め付け力不足から過大な変動軸力、疲労	Critical	- 製造又は保守時の初期締め付け力の確保*0,*B
プロペラ軸	- 折損	- 海水浸入から腐食雰囲気へ、曲げ疲労 - 船尾管軸受の過大な衰耗による曲げモーメントの増大、曲げ疲労	Critical	- シール装置の設計、施工の見直し*B - 過大な衰耗の監視と防止*0
中間軸	- 折損	- ねじり疲労	Critical	- 共振回転数近辺での運航の確実な防止*0 - 強度評価の見直し*B(例えば、疲労強度のより高い材質へ)
プロペラ	- 翼折損 - CPP 翼角制御部品の亀裂破損	- 疲労 - 疲労	Critical Critical	- 翼厚増しによる応力の低減*B(対策済み) - 強度評価の見直し*B

*B-主に Builder or Manufacturer が取るべき対策

*0-主に Operator が取るべき対策

7. 終わりに

船級基準に信頼性評価を導入する利点及び用いる方法を展望してみた。現行の規範的船級規則の不足点を克服し、事故の防止又はリスクの低減に新しい考え方及びツールを提供することにより舶用機器・システムは現状以上の信頼性を確保すると共に、設計により高い自由度を与えることで技術の進歩が促進されることも期待できると考えられる。

なお、ここで述べているのは著者らの個人的な見解であって必ずしも日本海事協会の公式な立場を反映したものではない。

参考文献

1) ASME, Standard for probabilistic risk assessment for nuclear power plant applications, 2002
2) IEC, Analysis techniques for system-Procedure for failure mode and effects analysis (FMEA), 1985
3) 星野次郎、機関損傷解析と安全対策、成山堂書店、1999, p 309
4) Department of Defense of USA, MIL-STD-1629A -Procedures for performing a failure mode, effects and criticality analysis, 1980.
5) American Bureau of Shipping, Guidance note on risk assessment applications for the marine and offshore oil and gas industries, June 2000.