



舶用機器の信頼性と安全運航に関する研究 : 船舶信頼性情報に基づく評価

桐谷, 伸夫

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

2002-03-31

(Date of Publication)

2010-05-13

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

乙0001

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/DS200001>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



神戸商船大学

博士論文

舶用機器の信頼性と安全運航に関する研究

— 船舶信頼性情報に基づく評価 —

2002年1月

桐谷伸夫

目次

1 章	序論	
1.1	舶用機器信頼性研究の社会的背景と目的	1
1.2	研究の概要と構成	4
2 章	舶用機器信頼性情報の利用技術の確立と評価	
2.1	緒言	7
2.2	舶用機器信頼性情報の収集体制の確立	
2.2.1	舶用機器信頼性フィールド・データの収集体制	9
2.2.2	調査解析の実績と情報の公開	11
2.2.3	船舶信頼性調査における問題点と対応	12
2.3	船舶信頼性情報データベース・システムの構築	
2.3.1	システム設計における基本要件とコンセプト	14
2.3.2	RDB システムとしての SRIC システムの構造と特徴	15
2.3.3	データベース・システムの問題点と対応	18
2.4	船舶信頼性情報データベース・システムの機能概要	
2.4.1	信頼性データの更新とシステムの運用	19
2.4.2	信頼性情報の処理コードとアプリケーションの開発	21
2.5	船舶信頼性情報データベースの課題と将来への提言	
2.5.1	船舶信頼性情報の課題	22
2.5.2	舶用機器信頼性データベース・システムの展望	25
2.6	結言	26
3 章	舶用機器の安全性と信頼性評価	
3.1	緒言	29
3.2	舶用機器故障の特性と評価	
3.2.1	信頼性評価指数と 全期間統計による舶用機器故障の特性	31
3.2.2	機械分野別による舶用機器故障の特性	33
3.2.3	経年変動に見られる舶用機器故障の特性	38
3.2.4	舶用機器故障の原因と理由	41
3.3	頻出機器故障の特性と評価	
3.3.1	頻出機器故障のクラスター解析による評価	52
3.3.2	故障頻出機器における機器・要素故障	58
3.4	電気電子系機器故障の特性と評価	
3.4.1	電気電子系機器故障の特性	60

3.4.2	電気電子機器故障の検定評価と発生状況	62
3.4.3	電気電子系機器における頻出故障の評価	65
3.4.4	多変量解析による電気電子系機器故障の評価	69
3.4.5	電気電子系機器故障の原因	73
3.5	主機系機器故障の特性と評価	
3.5.1	ディーゼル及び タービン主機系機器における故障発生状況	80
3.5.2	ディーゼル主機システム機器の信頼性	81
3.5.3	ディーゼル主機における機器・要素故障	84
3.6	推進動力システムにおける冗長系の評価	
3.6.1	主機システム冗長系の概念	85
3.6.2	主機故障の発生状況とシステム冗長度の評価	86
3.7	船用機器故障発生による安全運航への影響の評価	
3.7.1	故障発生による運航への影響	91
3.7.2	多変量解析による運航への影響の評価	95
3.8	結言	98
4 章	船用機器のシステム信頼性解析	
4.1	緒言	104
4.2	システム信頼性解析と GO-FLOW 解析	
4.2.1	確率論的安全評価とシステム信頼性解析	105
4.2.2	GO-FLOW 手法の概要	106
4.3	システム信頼性解析と評価	
4.3.1	推進プラントの FT モデリング	109
4.3.2	船用機器システムの GO-FLOW モデリング	111
4.4	システム信頼性解析に基づく船用機器システムの安全評価	
4.4.1	船用機器システムにおける機器信頼性向上の効果	116
4.4.2	船用機器システムにおける冗長系の効果	118
4.4.3	GO-FLOW モデルにおける保全作業の表現と効果	122
4.5	結言	124
5 章	総括	127
	謝辞	129
	主な記号	130

資料

船舶信頼性情報の解析結果	1
舶用機器のコード表	14
船舶信頼性調査票	31

1 章 序論

1.1 舶用機器信頼性研究の社会的背景と目的

近年、我が国造船業界はオイルショックやバブルの崩壊などの厳しい社会環境にさらされていた。また国際的にも近隣アジア諸国の台頭が著しく、今もなお決して楽観視できない状況にある。このような背景に基づき、例えば海運造船合理化審議会から「21世紀を展望したこれからの造船対策のあり方について」（平成3年12月）の答申がなされ、これからの造船対策として長期的な受給の安定化や産業基盤の整備、そして国際協調の推進に関する提言がされた。その後、造船対策部会意見として「今後の造船業及び舶用工業のあり方について」（平成8年7月）がまとめられ、舶用機器標準化及び研究開発の必要性の認識において、舶用機器の価格競争力強化のためのコストダウンに対する取り組みと同時に製品技術面での付加価値を追求する重要性が示されている⁽¹⁾。このような観点に立って展望するならば、船舶の安全な航行実現にも直接的に資する舶用機器の信頼性向上の取り組みが、新世紀においても海事産業界全体で重要要件であることは言うまでもない。また舶用機器の高信頼度化は船舶の安全性向上のみならず、社会経済性や効率性そして一方では乗組員の船内作業負担の軽減にも大きく寄与するものであり、船舶や船社そして更には一般社会に対しても有益な還元効果を持つものである。

2001年初頭においては、我が国のバブル崩壊後に通貨価値下落などの経済危機を迎えた近隣諸国がその影響から抜け出しつつある状況を反映して、外航海運はアジア諸国の内需増加により回復基調を示すようになっていたが、9月11日に米国で発生した同時多発テロ事件以降は世界的に再び混沌とした不安定な経済状態にあることから、海運業界もまた不安材料を抱えた状況にある。しかし、年前半まではITバブルの下降期に入りながらも近年の好調傾向が残っていた米国経済によって北米航路の荷動量が増加傾向^{(2)~(7)}となっていたことも事実であった。このような近年の世界経済状況の中で、我が国の海運業界では1998年10月に日本郵船（株）と昭和海運が合併し、更には1999年4月には大阪商船三井（株）とナビックスライン（株）が合併した結果、現在では川崎汽船（株）を含めた3社体制が確立するに至っている。これらの企業連合化は、良好なサービスの維持や企業運営の効率化、そして収益の増大を図るためにもスケールメリットの活用を期待した重要な経営戦略上の判断であった。換言するならば、企業運営上のリスク管理⁽⁸⁾の結論と位置付けられるものであると考えられる。ここで、海運企業運営のリスク処理の象徴として連合化を捉えるならば、事業実施上におけるリスクのひとつとなるものは運用船舶による海難事故の発生と捉えられる。海難事故の発生状況を統計値として検証するならば、平成12年度の要及び不要救助海難船舶隻数（2873隻）は平成3年以降の平均海難船舶隻数を上回るものであり、前年比約13%の増加となっている⁽⁹⁾。しかし、その多数はプレジャーボート（39.7%）と漁船（34.6%）であり、特に貨物船に注目するならば平成12年度は前年に比べて29隻増加の367隻ではあったが、過去20年間では漸減傾向と認識されている。すな

わち、単純に評価するならば一般商船における海難発生リスクは軽減されつつあると判断することもできるが、未だ記憶に新しい日本海でのナホトカ号事故⁽¹⁰⁾による油流出(1997年1月)や東京湾でのダイヤモンドグレース号座礁事故⁽¹¹⁾による油流出(同年7月)によってもたらされた影響は、社会経済や自然環境に対して計り知れないものであった。視点を変えるならば、このような海難事故発生リスクは船舶や船社に限定されたものでなく、社会や国家そして海洋自然環境に対するものであり、決して軽視できるものではない。一方では、四面環海の我が国にとって海運が産業基盤として果たす役割はあまりにも大きく、従って常にその効果とリスクとの巨視的で総合的な評価が重要である。海難事故発生原因は、一般的に操船者の運航上の過誤に起因するものが多数である⁽¹²⁾と報告されている。しかし、操船者は個として独立した存在ではなく船橋環境や操船装置・設備の連携をもって成立する作業、すなわち人間-機械系を基盤とした作業を実施するものであることから、系の一端である運航に関わる装置や設備の機能と信頼性が安全確保のためにひじょうに重要である。また、直接操船に関わることのない機器や装置であっても、それらの機能喪失は運航全般上の不安全状態の発生を意味するものであることから、船用機器における信頼性問題は重大な課題となるものである⁽¹³⁾。

第二次世界大戦の災禍より多くの人々の多大な努力により復興を遂げ、高度経済成長時代やバブル崩壊の時代を経て現在に至った我が国であるが、技術立国として発展した側面を忘れることはできない。すなわち陸海を問わず、多数の努力により技術革新と製品信頼性の向上を目指し続けたことの成果として、社会や国家としての信頼性が勝ち得られたものと考えられる。確かに、大戦直後の日本製品の代名詞は「安かろう、悪かろう」であったが、その後はデミングが提唱した統計的品質管理を発展させて総合的品質管理(Total Quality Control : TQC)を実践するまでに至り、製造業においては品質と価格の両面を向上させることが可能であることを具現した⁽¹⁴⁾。すなわち、全ての工程において不良品の発生を極限まで低減することによって歩留まりを向上させて、原材料の無駄をなくし、検査費用ですら省略できるようにして、高品質低価格を実現したのである。しかし、このような品質管理の段階に全ての産業分野が到達していないことも事実である。原則的に示すならば、総合的品質管理の要件は源流管理であり、下流工程における欠陥や不良の修正コストは上流工程におけるコストを上回ることから、より前段階での品質管理を優先することが重要なのであるが、現実的にはテスト段階のみを重視する意識が未だ多数である。小山が海事産業における安全性と経済性の両立⁽¹⁵⁾を示したように、終局的には信頼性・安全性の追求はトータル・コストを軽減するものではあり、貿易摩擦などのジレンマはあるが「良いものの方が安くできる」と言う製造業界の経験を海事社会の認識としても一般化することが、船舶における安全性の実現に寄与するものと考えられる。すなわち最適信頼度の確立は、ライフサイクル・コスト(Life cycle cost)当たりのシステム有効度(System effectiveness)によって定義されるコスト有効度(Cost effectiveness)を最大にするのである⁽¹⁶⁾。

第二次世界大戦以降の海事分野における画期的な技術革新の成果のひとつとして、M0船(機関部無人化設備を持つ船舶)の登場があった。運航経費の節減や乗組員の

作業軽減などを目的として船舶の省力化や自動化技術が推進された結果、我が国では1961年に進水した「金華山丸」において初めて船橋からの主機関の遠隔操作が可能となった。その後1969年にはM0船の第1船「ジャパンマグノリア」が進水するに至り、これ以後は現在まで自動化機器の技術開発・装備による船舶の近代化や少人数化が促進されているのである。このような技術革新を支え、実用の場面へと送り出すことを担保したものは、機器やシステムの信頼性や安全性の確立と確保であった。すなわち、いかに優れた技術や装置であろうとも現実の場において使用され社会的にも広まるためには十分な信頼性や安全性が備わっていなければならないのであり、新技術を実用のものとするためには信頼性の確立が不可欠な最重要要件なのである。

M0船をはじめとする自動化船や近代化船の登場は、コンピュータをはじめとする電子機器技術や自動化技術をバックグラウンドとして成立している。一般的にも、現代社会はまさにコンピュータ全盛社会であり、さらにインターネットを基盤とした情報化社会へと変貌している。特にインターネット普及率の増加傾向は著しく、2000年8月末時点で30.6%（日経BP社インターネット視聴率センター調査）に達している。従って、コンピュータ技術主体の社会構造による弊害も発生しており、例えば新ミレニアムを目前とした1999年末に起こった所謂Y2K問題に対する世界的な動揺や懸念が大きな社会不安となった事は未だ記憶に新しいものである。海事産業においても船舶運航会社が本社指令として港外手動待機を命じるなど、大きな危機感を持って新千年紀を迎えたことなどを考えるならば、港湾施設整備を含めて海事技術の多くが最新の情報技術を導入したものとなっている状況が明らかである。超自動化船の就航など、コンピュータや情報技術によって運航される近代船舶は、これまでの技術の単純延長でない新たなステージにあるものとなり、少人数化による保全環境の制限と共に複雑なハード・ソフトウェアによって構築されたシステムとなったことから、新たな視点からの船用機器の信頼性評価の実施が重要となっている。

塩見は、21世紀の信頼性・保全性（安全性）の課題として6分野を対象としてキーワードを掲げると共に種々の課題を示した⁽¹⁷⁾。その課題の中には、「データ」分野に関して機械的要素部品の信頼性データ不足、そして「数理」分野に関して時間的に変化するモデルの導入などが掲げられている。そこで本研究は、船用機器信頼性研究の持つ技術的社会的な役割の重要性に基づき、フィールド・データ収集の計画立案と実施、そして集められた情報を利用して船用機器の信頼性・安全性を定性的定量的に評価することを目的として実施したものである。すなわち、過去約20年間における信頼性向上の取り組みの成果と現状を明らかにすることによって、実情報に基づく船用機器の故障発生と保全の実状を把握し、顕在あるいは潜在する課題を評価することを目的としたものである。

1.2 研究の概要と構成

本研究実施の過程をフローチャートとして図 1.1 に示し、また以下に本論文の構成について示した。

第 2 章では、本研究において使用した船用機器信頼性データの調査母体である「船舶信頼性調査委員会」の活動結果とその成果、そして収集された船用機器信頼性フィールド・データを用いて構築した船舶信頼性情報データベース・システムの概要と問題点を示し、検討を実施した。船舶信頼性調査は、その規模において世界に誇ることのできるプロジェクトであったが、最終段階における現在においても総括的な評価や課題の検討は未だなされていない。そこで現在までの活動と成果を総括すると共にこれまでに得られた種々の知見や技術的社会的ノウハウ、更には構築されたデータベース・システム等の資源を将来的にも活用するための方策を明らかにするものである。

第 3 章では、構築された船舶信頼性情報データベース・システムを利用して船用機器が持つ故障発生の特徴や経年変動の状況を検討評価すると同時に保全作業の状況を明らかにすることによって、船用機器故障の信頼性を定性的定量的に評価した結果を示した。また統計解析のみならず、故障情報が内包する機器固有の故障特性を明らかにすることを目的として多変量解析を実施した。特に電気電子系機器と機械系機器故障との特性判別解析を実施し、近年において搭載が急速に進められている最新機器の信頼性評価を実施した。言うまでもなく、船舶における自動化・近代化の実現は種々の電気電子系機器の搭載によって実現された成果であり、これらの機器が船舶の運航において果たす役割はひじょうに大きなものとなっている。換言するならば、自動化された船舶において電気電子系機器は運航を実現するための中枢であり、今後更にこの傾向は進行するものと考えられる。そこで、これらの機器に視点を置いて安全航行実現との関わりを評価した。また同時に、機械系機器として依然として船舶の主なるシステム要素として重要な主機系機器を対象とした信頼性評価を実施した。主に機関の設置台数や気筒数に注目して、主機の冗長性問題を明らかにした。

第 4 章では、船用機器をシステムとして捉える視点において信頼性解析を実施した。特に主機廻りの機器システムに注目して、フールトツリー・モデリングそして GO-FLOW モデリングと解析を実施した。

近年、システム信頼性解析はシステム全体の持つリスクを定量的に評価することを目指した確率論的安全評価(PSA : Probabilistic Safety Assessment)の確立により、原子力分野等を中核として広く一般的に行われるようになってきた。例えば、フールト・ツリー解析(FTA : Fault Tree Analysis)は 1960 年代にミサイルの偶発故障解析に適用されて以来、一般産業界におけるプラントやシステムの安全性評価に大きく貢献している実績をもっている。また、PSA のひとつとして提案された GO-FLOW も原子力プラントのリスク評価の分野などで大きな成果をあげたものである。このように複雑なシステムの安全性を評価する立場では、システム信頼性評価の検討が不可欠と

考えられる。船舶がひとつの完結したプラントであることは容易に理解されるものであり、特に陸上施設と異なり海上では単独で自己完結したシステムであることが求められていることが明かである。このような視点より、船舶をひとつのシステムとして考え、そのリスク評価を実施することを目的とした。

本研究は、船用機器の信頼性フィールド・データ調査法の計画・立案から調査の実施、そして信頼性情報データベース・システムの設計及び構築、更には統計解析とシステム信頼性解析までの全過程を通して 1980 年代から現在までの船用機器の信頼性と船舶運航における安全実現との関わりを明らかにしたものである。

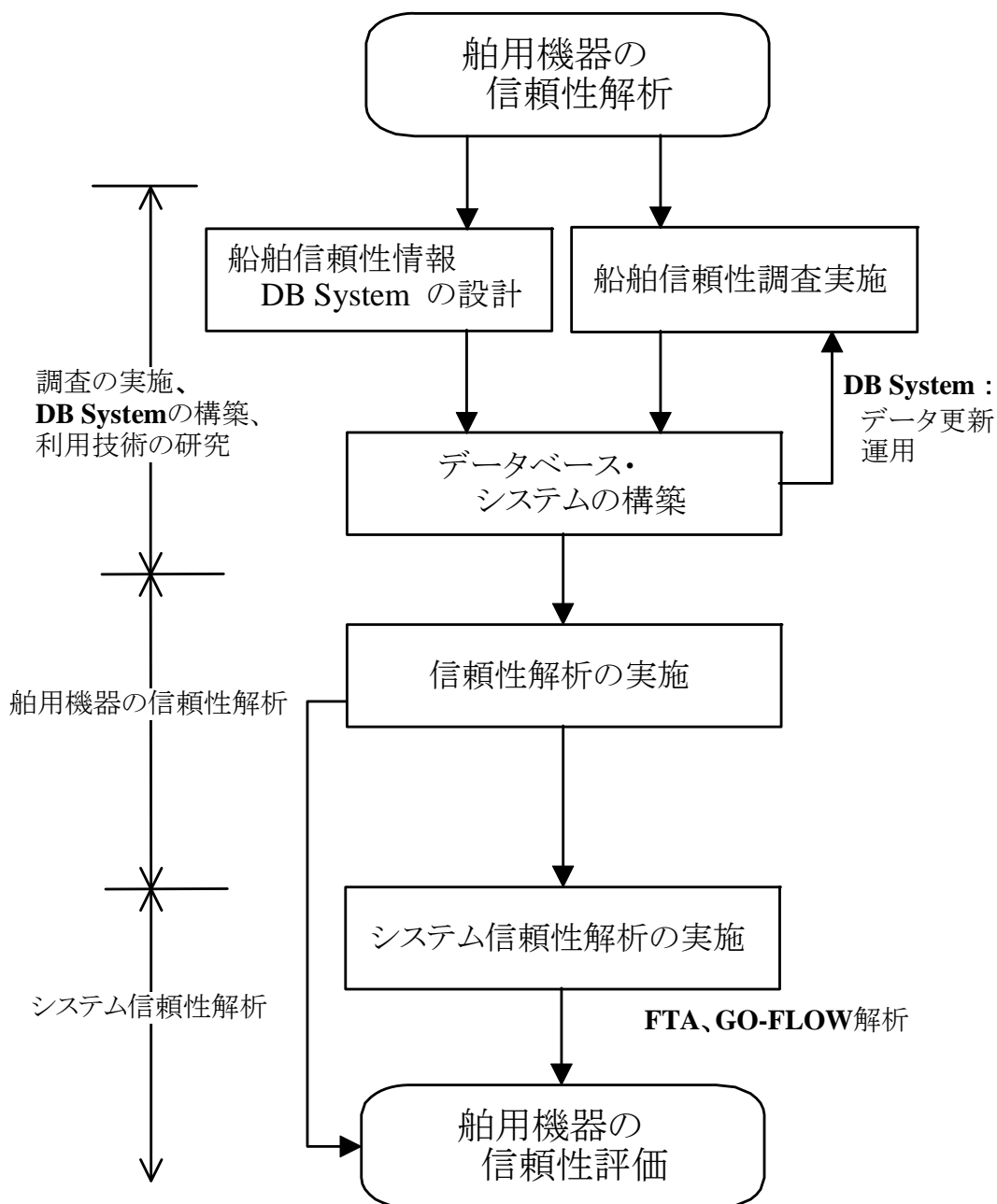


図 1.1 船用機器信頼性研究のフローチャート

第1章の参考文献

- (1) 運輸省海上技術安全局：「船舶行政資料集」、(1997.3)
- (2) 運輸省：「平成12年度運輸白書」、(2000.11)
- (3) アジア経済研究所：「アジア動向年報 2000」、日本貿易振興会アジア経済研究所研究支援部、(2000.6) (社)
- (4) 日本船主協会：「船協海運年報 1997」、(1997.9)
- (5) 日本船主協会：「船協海運年報 1998」、(1998.9)
- (6) 日本船主協会：「船協海運年報 1999」、(1999.9)
- (7) 日本船主協会：「船協海運年報 2000」、(2000.9)
- (8) 日本リスク学研究会：「リスク学辞典」、テービーエス・ブリタニカ (2000.9)
- (9) 海上保安庁警備救難部航行安全課：「平成12年における海難の発生状況について」、海と安全 No.506、pp.2-5、日本海難防止協会 (2001.3)
- (10) 岩井聡：「ナホトカ号の重油流出事故」、海と安全 No.458、pp.2-6、日本海難防止協会 (1997.3)
- (11) 岩井聡他：「ダイヤモンドグレース号の教訓」、海と安全 No.471、pp.8-10、日本海難防止協会 (1998.4)
- (12) 海難審判庁：「平成12年版海難審判の現況」、(2000.9)
- (13) 福戸淳司他：「1名当直を操船支援システムとその評価」、船舶技術研究所報告第37巻5号、運輸省船舶技術研究所 (2000.12)
- (14) 若部一鷹、最相力：「リスク管理の秘訣」、共立出版 (1996.6)
- (15) 小山健夫：「Quality Shipping について」、海と安全 No.508、pp.2-5、日本海難防止協会 (2000.5)
- (16) 塩見弘：「信頼性・保全性の考え方と進め方」、技術評論社 (2000.11)
- (17) 塩見弘：「21世紀への信頼性技術」、信頼性ハンドブック、pp.1-16、日科技連出版社 (1997.4)

2章 舶用機器信頼性情報の利用技術の確立と評価

2.1 緒言

序論に示したように運航経費の節減や乗組員の作業軽減などを目的として船舶の自動化・省力化が推進された結果、我が国では1961年に進水した「金華山丸」において初めて船橋からの主機関の遠隔操作が可能となり、その後1969年にはMO船の第1船「ジャパンマグノリア」が進水するに至った。これ以後、自動化機器の開発・装備により船舶の少人数化が促進されていると同時に、1970年代後半に始まった海運業界に対する厳しい国際状況を背景として船舶運航の少人数化は、更にいっそう推進される事となった。そして、少人数化船の運航による船内業務の合理化を目的とした船員制度の近代化実験が、1979年より開始された。この船舶近代化実験は、乗員数18名での運航を試みるA段階実験に始まり、BからC段階実験船を経て、乗員数11名での運航を実現したパイオニアシップ実験が行われた。その後、海運業界を取り巻く社会・経済環境の変化に伴い少人数化を基本とした外国人船員乗組みの混乗化や日本籍船の減少などにより、2000年5月現在で日本人乗組員だけによって運航されている日本籍外航近代化船は、パイオニアシップを含めて5隻⁽¹⁾となっている。

少人数化と共に進められた燃料の低質化や混乗化によってもたらされる運航条件の激化に対する方策のひとつとしては、舶用機器の高信頼度化による対応が重要と考えられる。すなわち、厳しい使用条件や環境条件にも耐え稼働できる機器の開発や適正な保全の確立である。これらの実現のためには、舶用機器の信頼性に関わるフィールドデータを収集して解析を実施し、その結果を社会に還元することによって舶用機器の信頼性や保全性の向上を図ることが重要なのである。

我が国における舶用機器に関する信頼性調査において、公的機関によって実施された代表的なもののひとつとして「船舶信頼性調査委員会(The committee for Ship Reliability Investigation)」による舶用機器の信頼性調査・研究の取り組みが⁽²⁾ある。この調査事業は、産官学の相互協力により1982年より実質的な調査を開始し、10年の期間を費やして、国内主要船社が運航する外航MO船における舶用機器の故障発生や警報発生に関わるフィールド・データを収集し、解析するものであった。この船舶信頼性調査が国内主要船社の絶大な協力と支援を得て長期間にわたって調査を実施した結果、収集された信頼性データは膨大なものとなり、調査委員会の活動成果として構築された船舶信頼性情報データベース(SRIC Database System in JAPAN : "SRIC" or "JSRIC")は、世界にも他に例を見ない大規模なシステムとなった。10年の時を経て調査委員会本体の活動は終了となったが、多くの関係者の多大な尽力によって獲得された貴重な資源の利用を更に将来に繋げることを求める多くの声に呼応して、調査委員会の活動を引き継ぐ形で運輸省海上技術安全局技術課を窓口とし、これまで船舶技術研究所システム技術部がデータベース運用の実務を担当することによって調査解析の継続実施^{(3)~(15)}を図ってきたが、国内船社自社船の減少から継続が困難となり1999年3月をもって新たなデータの収集実務は終了するに至った。

本章は、船舶信頼性調査の実施状況から最新の船舶信頼性情報データベース・システムの設計概念や機能概要を述べると共にフィールドデータ調査の問題点や課題、そして船用機器信頼性データベースの将来的な展望を示すものである。特に、船舶信頼性情報データベース・システムは 20 世紀終了期におけるパーソナル・コンピュータ技術の長足的な技術発展時期に対応したこともあり、システムの更新あるいは再構築が多段的に実施された結果と成果に視点を置いた総括と評価を行ったものである。

2.2 舶用機器信頼性情報の収集体制の確立

2.2.1 舶用機器信頼性フィールド・データの収集体制

船舶信頼性調査は、調査対象船舶と船社、運輸本省（現国土交通省）、船舶技術研究所（現海上技術安全研究所）等の緊密な協力体制のもとに1982年から1999年までの長期間にわたって調査実務が行われてきた。この調査体制の概要をデータ収集の流れに従って、図2.1に示す。例えば船舶において搭載機器に故障が発生した場合、担当乗組員が故障情報や航海情報を指定調査票に記載し、本社へ送付することによって情報収集が実行されてきた。その後、本社より運輸本省へ送られた情報は、調査・解析実務を担当する船舶技術研究所に転送され、同所において集積整理されてデータベースの更新や信頼性解析に供されるものであった。

信頼性調査の対象となっている項目の概要を表2.1に示した。ここで、航海情報記録とは船舶の航海状況を報告するものであり、航海時間やMO実施時間、停泊時間などを記録したものである。また故障情報記録は、故障発生機器の詳細状況を記録したものであり、機器名や発生年月日時刻などの基本情報だけでなく故障発生の原因や推定理由、そして運航に対する影響や修復に要した作業工数等の情報も含まれているものである。この修復作業に関する詳細な保全情報を持つことは船舶信頼性調査の大きな特徴であり、ロイド海事データなどと比較しても大きな特徴となるものである。このようにして確立されたフィールド・データ収集体制は、情報を源（調査対象船舶）より下流（解析担当部門）へと円滑に流れることに主眼をおいたものであり、統計調査計画として見るならば、船舶信頼性調査の調査形式は調査票による標本調査に分類されるものである。

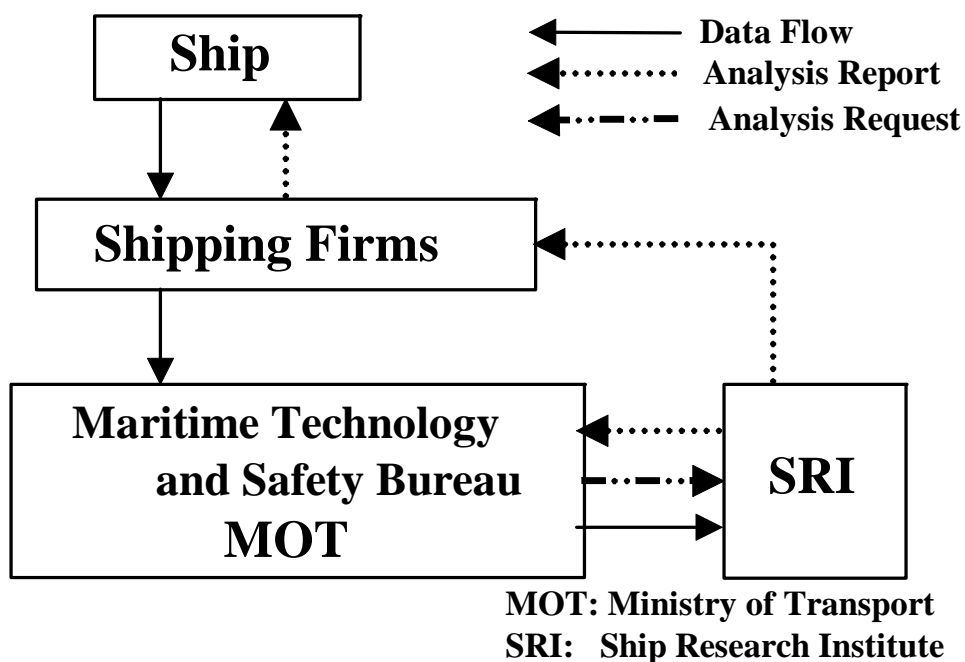


図 2.1 船舶信頼性調査におけるデータと情報の流れ

表 2.1 調査項目

Voyage Log	Failures and Alarms Log
Name of Ship Name of Person in Charge Classification Ship No. Voyage No. Start and Finish Date Navigation Time Port Time	Serial No. Date and Time Ship's condition Influence on Service Influence Time on Service Chance of Finding Alarm Point Code Failure Equipment Code Phenomenon Cause of Failure Presumed Reason Treatment for Failure Work for Repair

表 2.2 船舶信頼性調査の実施概要年表

1981. 6	船舶信頼性調査委員会が設置され、調査実施のための準備を開始
1982. 1	調査実務の開始、年次報告書の刊行開始
	SRIC System Ver. 1.0（プログラム駆動型システム）を運輸本省情報処理室に構築
1992. 3	船舶信頼性調査委員会解散、最終報告書刊行 船舶技術研究所を窓口としての調査活動継続
	SRIC System Ver. 2.0、汎用リレーショナルデータベース・エンジンを導入したシステムをEWS上に構築
1993. 3	簡易記入方式の調査票を採用
	SRIC System Ver. 2.1、グラフィック機能を付加したシステム構築
1996. 3	SRIC System Ver. 3.0、PCをハードウェアとして汎用リレーショナルデータベース・エンジンを導入したシステム構築
1999. 3	船舶信頼性調査完了
2001. 3	情報解析を船用機器の信頼性研究の一環として継続実施

前述したように船舶信頼性調査は1982年から1999年まで実施されて、現在に至っている。この経緯の概要を年表として表2.2に示した。1982年の調査開始以来、システムの構築や更新においては常に最も機能的で利便的な存在であることを目標として最新の情報処理技術を導入することを続けたが、最新システムにおいても機能上不十分な部分が未だ残っている。原因のひとつとして、全体の基本設計がほぼ20年前であったことを挙げることは容易であるが、このような初期設計の問題点に固執することなく、現在のコンピュータ技術やインターネット技術などの情報通信技術の認識に基づいて船舶信頼性情報データベース・システムの現状と今後の可能性を評価することが重要である。

調査に使用した調査票（「故障及び警報発生状況」調査票、及び「航海記録」調査票）を添付資料に示した。調査開始当初は詳細な記入を要求した調査票が使用されていたが、年表に示したように記入者からの強い要請を受け1件1葉の様式に変更した経緯がある。情報解析の立場からは、より詳細で正確な情報の入手が望まれることは当然のことではあるが、現実には調査票を記入する立場にある乗組員が少人数化や混乗化等による作業増加の環境下でより負担の少ない方式を望むことも十分に理解できるものである。このような状況の中で、出力である解析目標の質と量を考慮した上での選択により、最終的に現在の調査方式が選択されていった。

船用機器コード表は調査開始当初から同一のものを継続して使用したが、年々新たな機器や装備品が搭載される状況では大きな問題となっていた。例えば、航海計器の機器コードにはGPSの分類がなく、現在ではごく当然な機器を特定することができずに「その他」の分類の中に埋もれてしまう状況が生まれてしまった。機器コード表自体の変更や更新は容易なことであるが、調査実行上の問題として調査票記入者の混乱、新旧コードの混在等を考慮すると現実には実施することはできなかった。処理システムの機能としては、非コード化による記述記入や追加記述記入等の選択も可能であるが、記入者の作業軽減によるデータの確保とのトレードオフの問題となっている。センサやモニタリング装置の発達により、搭載機器の異常や故障の発生を自動記録すること自体は決して困難な事ではないが、その状況を具体的に表現して記録することに関しては人間の介入を排除することはできないのが現状である。一方、記入者の作業軽減が最大の要求であることを考えるならば、マルチメディア情報入力を利用した記録方式等の導入が今後の検討課題と考えられる。

2.2.2 調査解析の実績と情報の公開

「船舶信頼性調査委員会」指導の調査体制においては1982年から年毎に調査結果や解析成果を定期刊行してきたが、1992年3月の最終公式報告以降は不定期に船舶技術研究所より解析報告等が実施されている。

調査委員会の事業として公式に実施された解析項目を目的別に整理して示すならば、以下の通りである。

- (1) 「船用機関システム全体としての信頼性把握と個々の機器の信頼性が船舶」

- 全体に及ぼす影響の把握」 1 編
- (2) 「最適な保全等を検討するための評価方法の確立」 8 編
 - (3) 「機器の全体的な故障特性の把握及び運航条件等外的要因の影響の把握」 13 編
 - (4) 「機器・部品の構造・性能の違いによる個々の機器の故障特性の把握」 14 編
 - (5) 「保全に関する全体的な解析」 3 編
 - (6) その他、3 編

以上のように船用機器の信頼性保全性に関する研究・解析が多面的に実施されてきた。また、報告書と同時に刊行されたデータシートを用いた解析も利用者により種々実施されているが、船舶信頼性調査活動の全てを総括的に、また完全に把握して評価することは未だ実施されずにいる。

情報公開を進める立場より、船舶信頼性調査は船用機器の信頼性情報に関わる問い合わせには現在もなお随時応じており、図 2.1 に示したように情報の社会還元を目的としたフィードバック系も確保された調査体制である。特に関連学会等の公的な使用に関しては、制限付きではあるが使用者の要求に応じた情報提供・公開も行われている。このようにして、多くの関係者の多大な努力と協力によって実施され、これまでに大きな社会的役割を果たしてきた船舶信頼性調査ではあるが、社会や関係業界の状況変化により、年々調査対象船舶の確保が困難となっていく結果、前述のように 1999 年 3 月をもって新たなデータの収集実務は終了となったが、システムの更新や船用機器信頼性解析などの研究業務は現在も継続実施しており、情報提供の実施については情報公開の手法の研究を含め更に継続するものである。

2.2.3 船舶信頼性調査における問題点と対応

統計調査計画⁽¹⁶⁾において船舶信頼性調査は、調査票を用いた標本調査法に属するものであるが、このような調査の利点を整理するならば、

- (1) 迅速性
- (2) 経済性
- (3) 正確で詳細な情報の獲得

以上の 3 点であることが明らかである。しかし欠点としては、

- (Ⅰ) 回答率（本調査においては報告率）の維持が困難
- (Ⅱ) (1)の結果に基づく標本集団と母集団特性との誤差の発生
- (Ⅲ) 特定された対象への調査の限定
- (Ⅳ) 回答者に対しての外的観察に基づく回答方法の面談説明補足の不備
- (Ⅴ) 対象予定回答者以外による回答の発生

以上の点が一般的に指摘されるものである。船舶信頼性調査についてこれらの欠点に

対する評価を行うならば、長期の調査期間を経た現時点では特に(I)の問題が最も重大であることが明らかとなっている。すなわち船舶信頼性調査は、いわば船社と乗組員の犠牲的な協力の下に成立している側面を持っているためである。特に 90 年代になり、少人数化や混乗化によって海上業務の繁忙化が進行した結果、本調査への積極的な協力が困難なものとなっていった。このような状況において、報告率を確保するための方策を整理するならば、以下の通りである。

- (A) フィールド・データ収集の意義周知による社会的認知の獲得
- (B) 船社及び本船にとって実務上有効な情報提供の確約と実施
- (C) 法令による報告の義務化
- (D) 報告実施に対する経済的補てん
- (E) 報告実施に対する法令的な優遇措置

(A)は当然のことであり不可欠な要素ではあるが、即効性と確実性において十分な効果を期待することはできない。また、(C)及び(D)は調査の性格上からも社会的環境からも容易ではない。従って、(B)と(E)による対応が有効なものと考えられる。前節において示したように、情報公開推進の立場よりこれまでも積極的に無償提供の形での情報提供は実施してきた。しかし、利用者のサイドに立って高い利便性を追求したものであったかと言う反省においては決して充分でなかったものと考えられる。換言すれば、データベース・システム自体の機能設計にも公開性の面での検討が不十分であったことに帰着する。

情報通信技術の発達が著しい事からも、第一に価値の高い情報が容易に利用可能なシステムを構築し、データ収集への協力が得やすい体制を確立することが必要である。また船舶信頼性調査に限定するならば、調査報告の状況により対象船の保全状態を評価して船舶検査等における優遇措置を与えるなどの検討は不可能なことではなく、このような措置が調査継続に最も有効な方策と考えられる。

2.3 船舶信頼性情報データベース・システムの構築

2.3.1 システム設計における基本要件とコンセプト

表 2.2 の年表に整理して示したように「船舶信頼性調査委員会」の活動成果として構築された初期の船舶信頼性情報データベース (SRIC Ver.1x) はメインフレームをハードウェアとし、汎用言語によって構築されたプログラム駆動型のデータベース (DB) システムであった。そのためデータ解析において取り扱いは非常に困難であり、解析の自由度も限定されたものであったが、その後のコンピュータ技術の発展により、90年代前半に構築された第二世代のシステム (Ver.2x) では、ワークステーション (EWS) をハードウェアとした汎用リレーショナルデータベース (RDB)・ツールによるデータベースエンジンを持つシステムとなり、グラフィック・ユーザーインターフェース (GUI) も整備され、使い勝手の良いデータベース・システムに発展した。更に近年のパーソナルコンピュータ技術の飛躍的な進歩に対応し、第三世代 (Ver.3x) としての現在の船舶信頼性情報データベース・システムは、図 2.2 に示したようにネットワークの利用を重視し、パーソナル・コンピュータをハードウェアとしたシステム構築となっている。

システム設計において設定した基本要件とシステム構築の主要コンセプトを整理するならば、以下の通りである。

- (1) ハードウェアとして、パーソナル・コンピュータを採用
- (2) 汎用 OS によるコントロール
- (3) 汎用ツールによる RDB システム
- (4) 汎用言語ツールによってもソフトウェア開発が可能な DB エンジン
- (5) バックアップ機能を持つ大容量データ記録装置
- (6) ネットワーク利用を前提としたシステム構築

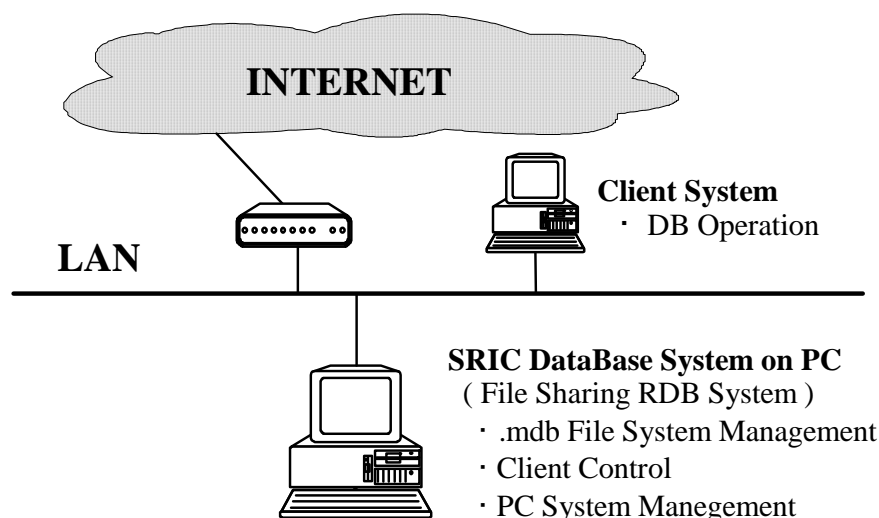


図 2.2 SRIC Database System の概念

- (7) ヒューマン・インターフェースの優れた RDB システム
- (8) セキュリティに優れたシステム
- (9) データ更新機能や出力機能

以上のような指針に基づき開発された現在のシステムは、ハードウェアとして大容量記録装置を装備し高速演算可能な CPU を搭載したパーソナル・コンピュータを採用しており、ソフトウェアとして PC 用の DB エンジンとツールを採用して構築された。換言すれば、最新 SRIC システムは汎用ツールによって PC 上に構築された RDB システム⁽¹⁷⁾となっている。

一般的に規模の大小を問わず、現代社会においてパーソナル・コンピュータの果たす役割でデータベース管理業務の占める部分は大きなものとなっており、種々様々な業務目的に応じて数多くの機能装備がデータベースに求められている。その結果、その使用用途によってデータベース・システムの型式も多数提案されているが、ネットワーク利用の主なデータベース型式は、以下のように大別⁽¹⁸⁾される。

- (A) クライアント・サーバ型システム
- (B) ファイル共用型システム

クライアント・サーバ型は、ユーザーとサーバ (DB エンジン) が完全に別個のシステムとなっており、ユーザー・インターフェース以外のほとんどの処理がサーバ上で実行されるためネットワーク・トラフィックが少なくなるが、多数のクライアントがサーバに同時に処理要求を発した場合にはサーバへの負荷が大きくなる。従って、基本的に高性能なサーバ・マシンの導入が必要となるものであるが、情報の一元管理やセキュリティにおいて高い能力を持つものと位置付けられる。一方、ファイル共用型はクライアント側で起動した DB エンジンがファイル・サーバ上のデータを排他制御方式によって共有使用するため、ネットワークへの負荷が大きくなるものである。しかし、システム運用としてはコスト・パフォーマンスが高く、簡便である点に優れている。それぞれに利点や用途に対する適正があるものの、船舶信頼性情報データベースの場合ではネットワーク利用は十分に視野には置いていながらも情報利用上の制限もあり、そして小規模ネットワークでの利用要求が主たるものであると考えられることから、最新の SRIC システムはファイル共用型リレーショナル・データベース・システムとして構築した。

2.3.2 RDB システムとしての SRIC システムの構造と特徴

RDB システムとして、SRIC システムは表 2.1 に示した調査項目から構成された発生故障の詳細情報に関するファイル (故障情報テーブル) と船舶主要目テーブル、そして故障の状態や船舶の運航状態を説明する複数の情報テーブルが、関連するインデックスにより結合されたリレーション構造を持つデータベースである。この構造を各テーブル間のインデックスと共に図 2.3 に示した。船舶主要目テーブルは、本船の船

体主要目データばかりでなく主機の型式等の詳細仕様も含まれており、信頼性解析における条件付け等が容易にできるものである。なお、この船舶主要目情報は船舶信頼性調査における信頼性フィールド・データ収集実施の事前調査として対象船舶別に調査を行って、作成したものである。

図 2.3 に示したように、最新の SRIC システムは 10 種のデータ・テーブルの関連づけによって構成された RDB システムである。しかし、前述したように第一世代 (SRIC Ver.1x) のシステムではメインフレームをハードウェアとして、汎用言語により構築されたものであったこと、そしてデータベース技術も未発達の技術状況であったため、低密度の磁気テープを媒体として書式付きのロング・レコードに全ての情報を記録する形式が採用されていた。従って、運用上のデータ取り扱いの困難さは想像を超えたものであった。このような認識と経験から、運用の容易さを追求して第二世代システム (Ver.2x) や現在の第三世代システム (Ver.3x) への再構築が実施された。

第三世代システム (SRIC Ver.3x) は、1990 年代のコンピュータ技術や情報通信技術の著しい発展と普及を背景として新たなシステム設計概念に基づいて再構築されたデータベース・システムであり、取扱いやネットワークによる利用において優れた能力や機能を持つものではあるが、結果的に業務としてデータの更新や解析を義務づけられた使用者への利便性が重視された傾向は否定できない。しかし、一般的で汎用の DB エンジンやツールが導入されたことで、最終的には一般利用者が個別の目的に対応した解析処理コードを作成することも容易なものとなっている。

RDB システムとして各データ・テーブル間の共通インデックスによる関連づけは必須の要件ではあることから、初期設計段階において SRIC システムでは NK 船級番号の利用を計画した。しかし、現実には NK 船級と船舶番号との混在が甚だしくシステムが認識できないトラブルが続発した。そこで、データ・テーブル間の関連確認には多段のインデックス参照による確認が導入されており、関連づけ失敗によるデータ喪失を防止する機能が準備されている。

故障情報テーブルにおいて、故障機器の特定は最も重要な要件である。そこで、SRIC における故障発生機器の特定は、Item1～Item4 と表現する 4 段階の機器コードによって実施している。

- (1) 第 1 段階分類 (Item1 Level) … 機械分野分類
- (2) 第 2 段階分類 (Item2 Level) … 機械・装置分類
- (3) 第 3 段階分類 (Item3 Level) … 機器・要素分類
- (4) 第 4 段階分類 (Item4 Level) … 要素分類

第 1 段階の機械分野分類では 10 系統 (1 : 主機系機器～N : 航海通信系機器) に分けられ、以下第 2 段階の機械・装置分類、第 3 段階の機器・要素分類、そして第 4 段階による要素分類では個々の部品単位までの指定が実施されるものである。例えば機器コード [1112] によって特定される機器要素はディーゼル主機のピストンであり、[主機/ディーゼル・エンジン/燃焼室廻り/ピストン] となる。この機器分類コードの階層構造を図 2.4 に示した。このようなコード記述によって分類された機器要素

は、故障機器テーブルにおいて空白処理も含めて現在は 1872 要素分類に整理されている。なお、機器分類の詳細として添付資料に故障機器コード表を示した。

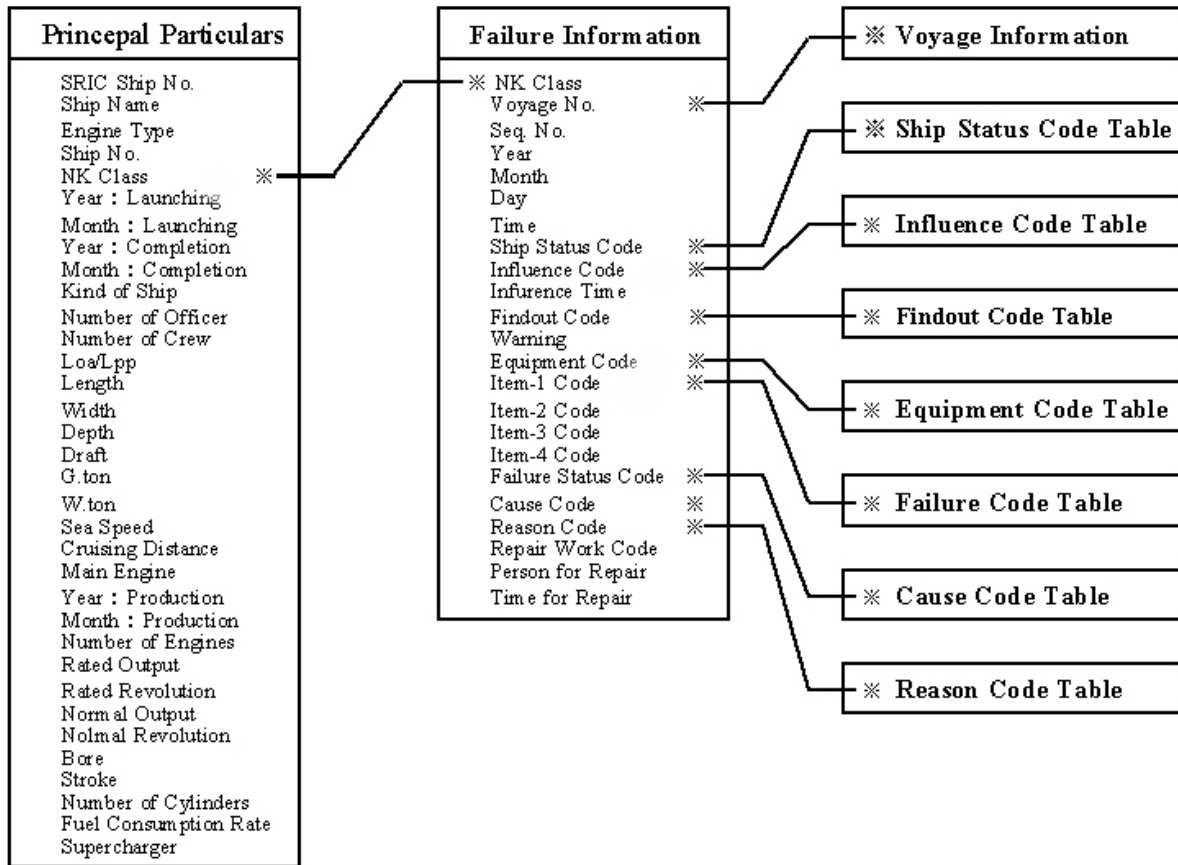


図 2.3 データ・テーブルの構成

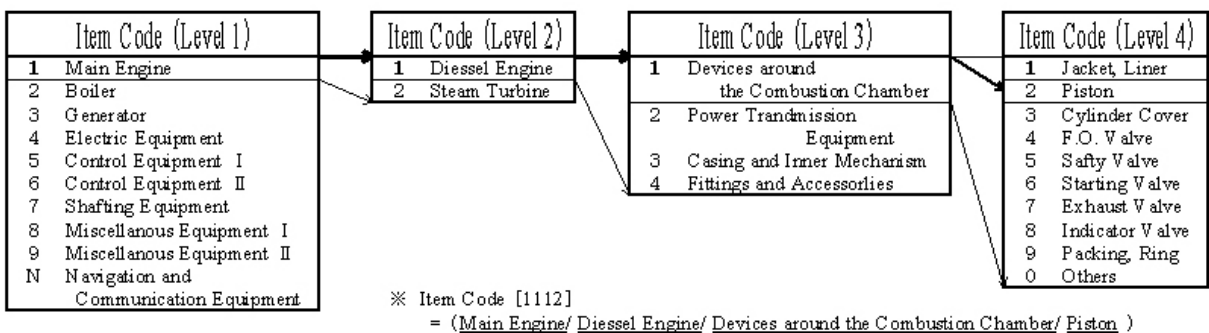


図 2.4 機器分類コードによる階層的表現方法

2.3.3 データベース・システムの問題点と対応

最新の SRIC システムがファイル共有型リレーショナル・データベース管理システムを採用したことは前述の通りである。その主たる理由には、現状では同時に発生するアクセスが決して多数とならないこと、そして運用コストの制限があった。しかし、データベース・システム本来の意義と SRIC システムの目的を考えるならば、多数の同時アクセスを可能にするクライアント・サーバー型リレーショナル・データベース管理システムへの移行は必要な課題と考えられる。ただし、単にシステム管理方式の変更のみが重要なのではなく、前提条件としてデータベースから得られる情報が利用者にとって価値のあるものにしなければならないことは言うまでもない。データベースがデータの検索・表示のみならず、解析手法の提案やユーザー・データとの比較評価などの能力を持つ情報解析エンジンとして機能することができれば、その社会的な存在意義はひじょう大きいものとなる。SRIC システムの持つ信頼性情報が次第に時代評価的な意味だけとなることは避けられないことではあるが、そのフレームデザインのコンセプトは新たに計画された他の類型船用機器信頼性情報システムにも継承されており、このことによって SRIC システムと他のシステムとのデータリンクは将来においても単純なインターフェースの設計により容易に可能と考えられる。この視点において、船舶信頼性情報が持つ価値は永遠であり、決して途絶えることのないものと確信するものである。

いわゆる IT・情報通信技術全盛の現在において、ネットワーク・サービスをどのようにシステムの機能として装備するかは、もっとも現実的で重要な課題である。すなわち、システムがいかに重要な情報を持つものであっても公開手段を持たなければ、その社会的価値は無いものと等しい。特に公開性に迅速性を求めるならば、ネットワーク・サービスの機能装備は不可欠であり、必然のものである。最新 SRIC においては、インターネットによる情報利用を考慮した設計がなされたことから、ネットワークを介したアクセスの実証実験が実施されて機能検証されたが、セキュリティーの問題⁽¹⁹⁾が完全に解決できないことによって恒常的なネットワーク・サービスが実施されなかった。いかなるシステムも意志を持った侵入者を排除することはできないことから、完全なるセキュリティーの確立は不可能であると言う前提に立って考えるならば、クラッキングに対する現実的な防御策としては、バックアップ機能を持って運用されるメイン・システムと情報公開を目的としたサブ・システムによる多重性をシステムに求めることが有効な選択と考えられる。

2.4 船舶機器信頼性データベース・システムの機能概要

2.4.1 信頼性データの更新とシステムの運用

データベース・システムにおいて、収集されたデータをより迅速にシステムに取り込み・登録する事はシステムと情報の更新機能として必須の要件と位置付けられる。SRIC システムではデータの更新方法として、逐次入力方式とファイル入力方式の2種類の方法が用意されており、追加入力されるべきデータの種類と量によってユーザーが選択する形式となっている。従って、例えば更新すべきデータ量が少ない場合にはデータ・テーブルに直接追記する方式によるデータ更新が簡便である。このような場合に利用するシステムの表示画面例を図 2.5 に示した。この表示方式はデータの単票表示と呼ばれるものであり、1件1葉により故障情報を示したものである。SRIC システムは一般 RDB 構造を具備していることから、画面下部の2つのウィンドウには対象船舶の主要目情報と故障機器コードに対応する機器名をする事も可能となっている。このような画面より更新データを入力する事も可能であるが、実際にはデータ全体をリスト表示する事によって追記するものである。また、一度の更新データが大量である場合には、入力データの作成が外注されて実施されたため、汎用の作表ソフトウェアを介在させてデータ・テーブルにインポートする方式が採用された。

データ更新の方式を整理して図 2.6 に示した。このようなデータの更新作業が、デ

船舶信頼性データベース

データ番号 1 故障機器 1146

船舶番号 次航数 68 一連番号 9

発生年 85 発生月 3 発生日 30
発生時 15

船の状況 3 Item1 1 故障の内容 11
運航への影響 B Item2 1 故障の原因 12
影響時間 1600 Item3 4
発見の発端 1 Item4 6 推定理由 1 7
警報発生の有無 141 推定理由 2 0

故障の処置 1 処置人員 9
処置時間 20 故障処置工数 (Man*Hour) 18

前へ 次へ

竣工 82 6
GTon 59407
主機 B&W 7K90GFC

1146
MAIN ENGINE
DIESEL ENGINE
FITTINGS AND ACCESSORIES
CYLINDER OIL LUBRICATOR

コード: 1 / 114307

図 2.5 船舶信頼性情報の単票表示画面例

データベース運用上で重要な要件であることは言うまでもない。この場合に重要となる問題は、更新データの質の検証である。調査票を読みとりキーボードを打つ、この一連の作業実施におけるミスが発生は、調査票記入時に発生が予想される作業ミスによる誤差にさらに加わるものであることから最大限排除されなければならないものである。従って、更新データの検証評価機能はデータベース・システムにおいて重要な要素と考えられることから、船舶信頼性情報データベース・システムでは、データの妥当性や矛盾点を検索するための評価プログラムを用意して、データ更新時等に随時記録データの評価を実施する機能を実現した。この結果、解析結果の確度が十分に保証されるものとなった。

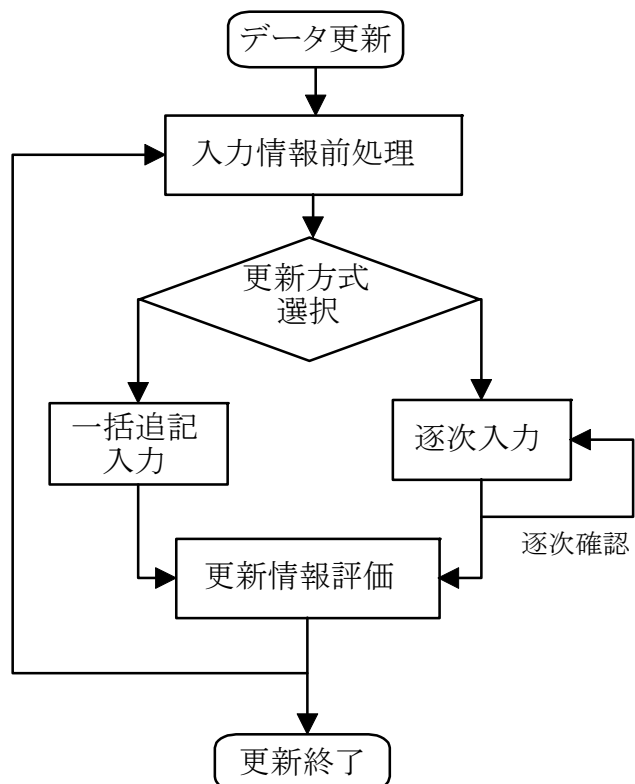


図 2.6 情報の更新作業と評価手順

この結果、解析結果の確度が十分に保証されるものとなった。

2.4.2 信頼性情報の処理コードとアプリケーションの開発

構築された RDB システムに対する情報処理のソフトウェアを作成する手段、換言するならば RDB エンジンを駆動して目的とする情報処理を実行するための機能を実現するためには、ソフトウェア開発ツールとして例えば RDB マクロ言語を用いる手法と DB ファイルへのアクセス機能をサポートした汎用コンピュータ言語を用いる手法が考えられる。それぞれの利点を整理するならば、マクロ言語はそれ自体がひとつのアプリケーションとして機能するための基本処理であれば短時間で作成できることに大きな特徴を持つものである。一方、汎用 PC 言語(Visual Basic 等)は本来独立した言語であるためユーザーの自由な要望に沿ったアプリケーションのコードを生成することができる点に特徴を持っている。最新 SRIC システムにおいては、これらの特徴を考慮してデータ更新や検索などに関するアプリケーションは DB マクロを開発ツールとして作成し、信頼性解析やグラフ化などのアプリケーションは PC 言語によって作成した^{(20)~(26)}。

船舶信頼性情報の利用・活用のための情報処理アプリケーションは、その実行目的において、以下に示すように大別される。

- (1) 定期的な報告の実施を目的とした定型出力形式を持つ統計解析処理
- (2) 検索条件を前提とした信頼性基本解析処理
- (3) 機能付加や改造を考慮した入出力系処理

すなわち第一には、定期あるいはデータ更新時において実施される信頼性統計解析であり、SRIC システムの機能において考え得る全情報の出力を目的としたものである。第二は、ユーザーの要求に従った検索の条件設定を前提とした信頼性解析の実施が考えられる。例えば、対象船舶や対象機器等に対する絞り込み条件の設定がある処理形式である。このような要求の実現こそがデータベース・システムの実利性を明らかにするものと考えられる。第三には、新たな信頼性処理アルゴリズムの導入を想定し、カスタマイズされることを前提とした基本処理アプリケーションである。第一のアプリケーションは定期的な出力を目的としたものであることから、固定的なレポート出力形式を保持することが必要であるが、他の場合にはそれぞれの目的や要求により可変でなければならないことから、使い勝手の良い GUI の設計や2次処理に対するインターフェースの装備が実現されている。

2.5 舶用機器信頼性データベースの課題と将来への提言

2.5.1 船舶信頼性情報の課題

舶用機器信頼性向上を目的として確立された調査・解析の実施は、船社自身によるものを除くならば、船舶信頼性調査や運輸施設整備事業団による内航船を対象としたものなどが規模において主たるものである。一方、本船での運航支援を目的とした各種観測・監視センサの情報を収集解析して故障診断や保全作業計画立案などを実施する製品などの開発は既に実施されている。このような現状、いわばオフラインとオンライン体制に基づくシステムが、距離を置いて対極的に存在する状況は早急に改善されることが望ましいのは言うまでもない。

近年における情報処理技術や通信技術の進展は著しいものがあり、この傾向が今後とも加速されることは確実と考えられることから、多数のセンサにより大量なデータを収集してリアルタイムで解析を実行し支援情報として本船や船社そして更には社会に対してもフィードバックするシステムの構築は十分に可能なものである。問題点としては、少人数化の進んだ船舶において効率よく情報を収集する手法の確立や情報処理システムの機能設定、情報伝達の手段、また陸上と海上の関係、さらには情報のセキュリティと公開などである。そこで、このような概念に基づいた情報ネットワークを図 2.7 に示した。この情報ネットワークは、船舶と船社そして情報利用の第3者が個々に、そして自律的に存在することのできる側面とそれぞれに協調し合って分散データベース・システムを構成する側面を同時に持つことができるものである。

船舶において、運転機器を常時モニタリングして稼働状況を把握し、診断や将来予測を行うことは安全運航実現のためにも、また予測・予防保全計画策定の意味からも重要なことである。そのためにも、例えば機関部では各種センサによりエンジンモーションデータなどが計測されて遠隔表示や診断装置への入力となっている。しかし一方では、故障記録や保全作業記録などの船内作業に伴う記録、そして航海記録などの直接的にはコンピュータデータとならない情報も多数ある。従って、これらの情報をコンピュータ情報として一元的に取り扱えるようなシステム設計⁽²⁷⁾をすることが、本船システムとして必要な第一要件と考えられる。このような問題に対する対応としては、デジタル化された種々のセンサ情報それぞれの関連付けを行うことで、データベースとして構築する方法が考えられる。この場合、関連付けさえ実現できれば、画像データなどのマルチメディア情報を同列に取り扱うことも可能となり、作業記録が機器の稼働状態などの運航状態の背景を伴って記録されることとなる。その結果、ネットワーク型の機器の監視・診断システム^{(28),(29)}が容易に構築されることになり、加えて信頼性データベースの活用が可能となるならば、より高度な保全の実現も考えられるのである。すなわち、機器信頼性を確保しつつ保守コストを低減するためには、事後保全と予防保全そして予測保全、これらの最適な組み合わせを実施する RCM (Reliability Centered Maintenance)⁽³⁰⁾の確立が求められているのである。このネットワーク型の機器監視・診断システムを利用した RCM で考えられている保全の分類を整理するならば、以下の通りである。

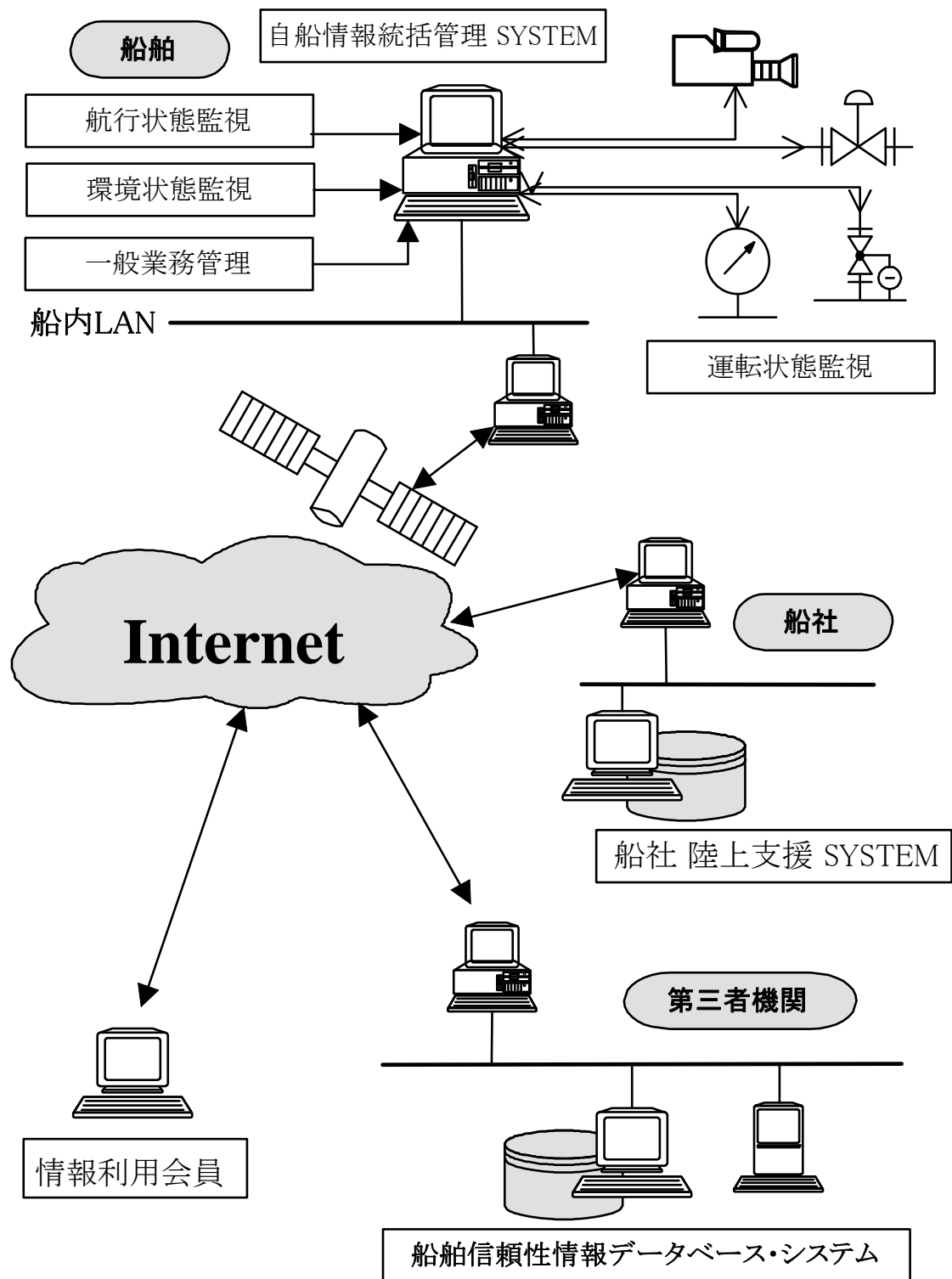


図 2.7 情報ネットワークの構成

- (1) 事後保全 (Corrective Maintenance)
- (2) ① 運転経過に基づく予防保全 (TBM : Time-Based Maintenance)
② 状態監視結果に基づく予防保全
(CBM : Condition-Based Maintenance)
- (3) 予測保全 (Predictive Maintenance)

これらの実現によって、保守保全の最適化、省力化、信頼性の確保を達成しようとするものが、RCM の目的である。ここで、予測保全は故障予知の結果に対する処置となるが、故障予知において重要となるものは(2)の情報に加えて機器の持つ故障特性であり、信頼性データベースの持つ情報に対応する。

現実問題として、船舶におけるネットワーク型機器監視・診断システム構築のために必要となるインフラ条件を考えるならば、第一には船内 LAN の設置である。設計段階において情報ネットワークの設置が計画されていれば問題はないが、既存の船舶に後付けすることは決して容易ではない。陸上施設であれば無線 LAN などの導入で容易に解決できるが、船舶に適用できるものではない。現在考えられる現実的な対応策としては、例えば電力線を利用した LAN 構築などの手段がある。電力線ネットワークは小規模 LAN として有効な手段ではあるが、欠点として大容量高速通信を保証しない問題がある。しかし、限定された船内使用の手段としては簡便さや経済性において大きな利点を持つと考えられる。また副次的な効果として、センサの増設や処理装置の設置が容易に実施できることなどがあげられる。

第二には、全地球規模の高速大容量情報ネットワークの確立が求められている。現在一般的に利用されている衛星インターネット・システムは、情報の「下り」に衛星通信を使い、「上り」に地上回線通信を利用したもの（例えばスーパーバード衛星を利用した高速データ通信サービス）であり、船舶に適用することは技術面コスト面において容易ではないが、近将来的には全地球を対象とした衛星ネットワークによるサービスが十分に予測されるものである。

船陸のネットワーク化による総合的な情報通信インフラストラクチャが実現されるならば、大洋を航行する船舶は陸に対して「距離と時間の壁」の存在を意識することがなくなり、船陸一体となったネットワーク型の機器の監視・診断システムの実現も可能になるものと考えられる。

2.5.2 船用機器信頼性データベース・システムの展望

IT 技術に基づく近将来の経済社会はネットワーク利用を主体としたものであり、いわゆるネットビジネスが今後も引き続き社会経済活動における先導的な役割を果たしていくものと考えられる。しかし、このようなネット取引が経済活動において大きな勢力なろうとも物流の機能を持たない以上、情報流通の局面においてのみ最大のメリットを持つものである。従って、現代米国に見られるような金融や情報サービスの面での躍進が今後も継続することは確かなことではあるが、インターネット技術が単独に全ての社会構造を決定するものとはならないと考えられる。ただし、このインターネットに代表される情報通信技術がひとつの社会基盤として定着することは間違いないことから、その利用を図ることは海事産業においても不可欠の要素である。特に船陸間の大量な情報通信の実現が求められる場合、技術面においても経済性においてもネットワーク技術の利用が必須のものである。このような海上における情報通信のインフラが確立されたならば、船舶運航に対する陸上支援のバックグラウンドとして船用機器信頼性情報が果たす役割はより大きなものとなる。すなわち、運航支援の視点からは運航状態データや環境データなどの全ての情報を包括的に処理して、安全航行実現へフィードバックさせるようなシステムの確立が可能となるからである。このようなシステムにおいては船陸(航行船舶と陸上支援システム)の一体化は距離的な隔たりに関わりなく確立され、船舶は運航上必要な情報支援とサービスを容易に受けられるようになり、船社は自社船の運航管理を効率的に実施することができるようになる。そして、この各社システムに対して多重的冗長的に各船情報の一元的に集中管理するような組織、企業の枠組みを越えて情報の管理とサービスを実施するようなシステムこそが船舶信頼性情報データベース・システムの未来像と位置付けられる。換言するならば、将来的に海事情報ネットワークが整備されるならば、船上のデータベース・システムは陸上システムとの同一化が容易に図られ、大規模なデータベースの一部として機能させることも可能となる。更には、インターネットの特性として双方向通信が実現されることから、情報の行き来だけでなく機器のリモート操作も実施できることなど将来的な発展の要素も大きい。このように、衛星インターネット網などの活用が実現された場合、船舶情報は全地球規模での分散型データベース・システムとして容易に機能することになる。従って視点を変えるならば、図 2.7 に示したような船社の境界を越え全船舶を対象としてオンライン操作で情報の運用を所管する機関の実現も考えられる。当然の事ながら、そのような運用機関は船社の情報保護を第一にすると共に公益性を保持して、集約された情報の持つ高い価値を社会にフィードバックする使命を果たすものでなければならない。

想定される船社や船舶が享受できる情報の社会的共用性を確立できるならば、この次世代船舶信頼性情報データベース・システムは永続的に存在することが可能となるものである。すなわち、BtoC から BtoB への展望⁽³¹⁾を持って公益性と共にビジネス・サービスにも充分に対応したシステムへの移行が可能となるからである。

2.6 結言

1980年代よりの長期間にわたるフィールド・データ収集の継続と研究実施の成果として、船舶信頼性情報データベースは船用機器の信頼性調査によってもたらされる技術的あるいは社会的効果を明らかにした。このような膨大なフィールド・データをバックグラウンドとして得られる船用機器の信頼性情報は、本船における故障対策や保全作業計画立案、また船社や造船所、機器メーカーなどにおいて機器設計や製作段階での有効な基礎情報となり得るものである。また、海上において航行船舶が保持している独立性や自律性はハードウェアである搭載機器の高い安全性のもとに成立するものであることから、フィールド・データによって得られる情報の評価は実利性の高いものであることは明らかである。コンピュータ技術や情報通信技術が飛躍的に発展した現代では、あらゆる社会分野においてデジタル化された情報の持つ顕在的潜在的価値は強く認識されるものとなっているが、海事分野においては未だ成熟した認知を十分に獲得しているとは言えない。この視点において船舶信頼性情報データベース・システムの構築によって船用機器信頼性情報の管理から解析までの手続きを実証したことの価値はひじょうに高いものであり、海事面では他に例を見ないものである。また、近将来の情報ネットワークを視野に置いたシステム構築は不可避のことであることから、さらなる船舶信頼性調査の実施及びシステム構築の計画立案の必要性が明らかとなった。特に、現代のインターネット利用技術開発の進捗度から考えるならば、最新の情報技術や通信技術に基づくネットワーク利用を主眼した全地球規模のシステム構築が求められている。

情報通信技術に基づく航行船舶における安全確保のためのインフラとは、第一に船内におけるデジタル情報通信網の構築であり、第二に陸上支援システムとの高速データリンクの実現である。新造船における船内 LAN 設置のメリットは船舶の自動化や近代化推進において明らかであるが、船内 LAN が装備されていない既存船舶においても電力線 LAN などの代替手段も存在することから、このようなデジタル情報通信網を整備することが求められている。全地球規模で海上を航行する船舶に対する船陸間の通信手段としては衛星によるデータ通信手段の確保が有効であり、通信回線などを利用して直接的なリンクを張ることも可能であるが、経済性を考慮するならばインターネットを介したデータリンクの確立が優位と考えられる。このような船内のデジタル情報通信網と船陸間のデータリンクの実現こそが、陸上支援システムの機能を活用して航行の安全を確保するための基本的な海上のインフラとなるものであり、この基本資源をバックグラウンドとして、次世代の船舶信頼性情報データベース・システムでは装備機器の信頼性評価や評価結果に基づく保全計画立案、さらには適正予防保全や予測保全計画立案などをネットワーク・サービスの形で提供することが可能となる。すなわち、船舶信頼性情報をベースとして信頼性評価・リスク評価を実行する機能を具備することによって、次世代 SRIC となる船舶信頼性情報データベースが真に実用に耐えるものとなる。そして、その実現にはこれまでの研究経過において獲得した情報収集の実務的な知見からシステム構築上の技術的経験までの全ての要素が有効で欠くことのできない重要な資源と考えられる。

第2章の参考文献

- (1) 日本船主協会：船協海運年報 2000、pp.175-176、(社)日本船主協会(2000.9)
- (2) 日本造船振興財団・シップアンドオーシャン財団・運輸省海上技術安全局：船舶信頼性調査委員会報告書、(1982.7)、(1983.3~1992.3)
- (3) 桐谷伸夫他：船舶信頼性データベースの利用技術について、第58回船舶技術研究所講演集、pp.149-152、船舶技術研究所(1991.12)
- (4) 桐谷伸夫他：船舶信頼性データベースについて、電子情報通信学会技術研究報告、pp.12-17、電子情報通信学会(1991.12)
- (5) 桐谷伸夫：機関部近代化と信頼性、第50回船用機関学会学術講演会講演集、pp.214-219、日本船用機関学会(1992.11)
- (6) 桐谷伸夫他：船舶信頼性データベースの利用技術について(第2報)、第60回船舶技術研究所講演集、pp.123-126、船舶技術研究所(1992.12)
- (7) 桐谷伸夫：機関部近代化と信頼性、日本船用機関学会誌 Vol.28 No.2、pp.136-144、日本船用機関学会(1993.2)
- (8) Nobuo KIRIYA : "A Database System for Ship Reliability in Japan"、The 6th Conference of ICMES、Proceedings of ICMES93 Paper27、ICMES (1993.9)
- (9) 桐谷伸夫他：船舶信頼性データベースの利用技術について(第3報)、第62回船舶技術研究所講演集、pp.123-126、船舶技術研究所(1993.11)
- (10) 金井康二、桐谷伸夫：船舶信頼性データベースの主観的データを利用した信頼性解析、第64回船舶技術研究所講演集、pp.25-28、船舶技術研究所(1994.12)
- (11) 石村恵以子、桐谷伸夫他：故障予測を用いた船用機関の運転・保全システムの試作、第65回船舶技術研究所講演集、pp.23-28、船舶技術研究所(1995.6)
- (12) 金井康二、桐谷伸夫：船舶信頼性データベース SRIC の解析(客観的データと主観的データとの関連)、第66回船舶技術研究所講演集、pp.159-162、船舶技術研究所(1995.11)
- (13) 桐谷伸夫：船用機器の故障発生と安全(船舶信頼性データベースにおける重故障発生状況)、第4回交通物流部門大会講演論文集、pp.385-386、日本機械学会(1995.12)
- (14) 金井康二、桐谷伸夫：船舶信頼性データベースの現状と展望、第68回船舶技術研究所講演集、pp.282-285、船舶技術研究所(1996.12)
- (15) 金井康二、桐谷伸夫：船用機器の信頼性データベース SRIC の現状、第72回船舶技術研究所講演集、pp.243-246、船舶技術研究所(1998)
- (16) 実務教育研究所：現代統計実務講座 I 及び II
- (17) 小泉修：「データベースのすべて」、日本実業出版社(2000.5)
- (18) 望月宏一：「Access データベース・テクニック No.1」、日経バイト No.199、pp.142-147、日経BP社(2000.1)
- (19) Deborah Russell & G.T. Gangemi Sr. : 「コンピュータセキュリティの基礎」、

- アスキー出版 (1994.12)
- (20) Catapult, Inc : 「Access オフィシャルコースウェア」、アスキー出版 (1996.4)
 - (21) 高羽実 : 「ACCESS VBA」、秀和システム (1996.11)
 - (22) 釜谷玲子 : 「Access 97」、オーム社 (1997.9)
 - (23) エクスメディア : 「ACCESS 97 クエリー&応用編」、エクスメディア (1997.7)
 - (24) 谷尻かおり : 「Access VBA 初級プログセミング」、技術評論社 (1997.9)
 - (25) 林晴比古 : 「新 Visual Basic 入門」、ソフトバンク (1998.12)
 - (26) 林晴比古 : 「Visual Basic 応用プログラミング」、ソフトバンク (1998.12)
 - (27) 日本財団 : 「船舶運航の情報管理・支援システムに関する調査研究報告書」
 - (28) 井上眞一他 : 「マルチメディア統合ビジュアル監視制御システム」、東芝レビュー Vol.55 No.11、pp.31-54、株式会社東芝 (2000.11)
 - (29) 河合三千夫他 : 「イントラネット技術を適用した今後の電力系統システム」、東芝レビュー Vol.53 No.2、pp.34-36、株式会社東芝 (2001.2)
 - (30) 横田岳志、上原京一 : 「変電機器の新しい監視・診断システムを実現するイントラネット技術」、東芝レビュー Vol.53 No.2、pp.41-44、株式会社東芝 (2001.2)
 - (31) 郵政省 : 「平成 12 年版 通信白書」、ぎょうせい (2000.6)

3章 船用機器の安全性と信頼性評価

3.1 緒言

信頼性に対する技術研究は、第2次世界大戦中に始まり 1950 年代の米国でのミサイル開発における取り組みから本格的なものとなって基礎が築かれ、軍事技術や宇宙開発技術分野などでの信頼性に対する高い要求の発生に伴い発展し、近年の航空機事故や原子力機関の事故などの多発によりシステム信頼性解析やリスク評価技術の進展へと推移している^{(1)~(5)}。このような状況を背景として進められた信頼性研究の対象は部品やデバイス、材料を対象としてものが多数であるが、最近は電子部品やコンピュータなどを主対象とする研究、更には大規模プラントに対するリスク評価が注目されている^{(6)~(8)}。当然の事ながら、このような信頼性解析・研究の第一段階は対象の信頼性データを十分に収集することであるが、このことが最も重要で最も困難な作業である。すなわち、製造者にとっても使用者にとっても故障発生的事实はマイナスのイメージであり秘匿したいものとなっているからである。しかし、故障発生などのフィールド・データを多数収集することは信頼性解析上不可欠の要素であることは言うまでもない。

船舶における信頼性調査の取り組みは、例えば日本海事協会(NK)では船舶検査記録書で報告された機関関係の一般損傷を集計する作業を実施しているが、航行中の故障発生状況や保全作業の実施状況を収集したもので公的なものは船舶信頼性調査⁽⁹⁾が最大規模を持つものと指摘できるものである。従って、船用機器が持つ故障発生の特性や経年変動の状況を検討評価すると同時に保全作業の状況を明らかにするためには、船舶信頼性調査の成果として構築された船舶信頼性情報データベース・システム(SRIC)を利用した解析^{(10)~(17)}が現在最も有効で効果的な手段である。換言するならば、船用機器の信頼性研究の実施で規模と情報量さらには取扱いの容易さにおいて、SRIC以上のデータベース・システムは世界的にも他に例がなく、これを利用することが最も有力かつ適切な手段である。

本章では SRIC の持つ信頼性情報を利用して、船用機器故障の信頼性と保全性を定性的定量的に評価することを実施した。特に電気電子系機器と機械系機器故障との特性判別解析を実施し、近年において搭載が急速に進められている電気電子系機器の信頼性評価を示した。言うまでもなく、船舶における自動化・近代化の実現は種々の電気電子系機器の搭載によって実現された成果であり、これらの機器が船舶の運航において果たす役割はひじょうに大きなものとなっている。すなわち、自動化された船舶において電気電子系機器は運航を実現するための中枢であり、今後さらにこの傾向は進行するものと考えられる。そこで、これらの機器に視点を置いて安全航行実現との関わりを評価した。また同時に、機械系機器として依然として船舶の主なるサブシステムとして重要な主機システムの冗長性問題の評価や主機系機器を対象とした信頼性評価を実施した。当然のことながら、主機の異常・故障発生は推進機能の喪失であり、海上の船舶にとっては最も甚大で致命的な状況を意味するものである。

船舶は陸上産業施設やプラント設備などと異なり、たとえ運航上の致命的な障害が

生じた場合においても、海上においては他者の支援を受けることは困難である。従って、海上の船舶は自己完結された人員と時間と装備による基本資源によって安全航行を阻害する不安全要因である故障状況を修復しなければならない。すなわち個々の船舶は、故障状況からの復帰するために限定された配員資源 (Manning Resource : MR) からその一部を投資して故障状況を修復していると考えられる。従って、故障発生によってもたらされる直接的な不安全状態と同時に、故障修復に投入される人的時間的損失に起因してもたらされる不安全状態の評価を行うためには、故障修復処置工数や配員指数 (Manning Index:MI) ⁽¹⁸⁾の検討など、いわば質的な観点からの信頼性評価も重要と考えられる。そこで、船舶の安全運航を直接的及び間接的に影響するものとして舶用機器の故障発生を捉えて評価を実施したものである。

ここで舶用機器の信頼性評価の実施において、注目した事項を整理して以下に示す。

(1) 信頼性評価指数の導入

故障率は、機器の信頼性を直接的に評価するもので重要な指標値である。また、保全性評価の観点より、故障機器に対する修復処置作業工数、機器の稼働・不稼働率やアベイラビリティ、さらには配員指数を採用して信頼性評価を実施した。

(2) 多変量解析による評価の実施

船舶信頼性情報の大きな特徴は、舶用機器の故障・警報発生に関する多変量によるデータを大量に持っていることにある。従って、これらを事象である故障についての説明変数として有効に利用するために主因子分析やクラスター分析などの多変量解析手法を用いて実施した。

信頼性評価としては、故障情報が内包する機器固有の故障特性と船舶運航における安全実現との関わりを故障率やアベイラビリティ、配員指数などの評価指数を利用することによって多面的に評価し、さらには構造的な特性を明らかにすることを目的として多変量解析を実施したものである。

3.2 舶用機器故障の特性と評価

3.2.1 信頼性評価指数と全期間統計による舶用機器故障の特性

調査開始より現在までの 18 年間で SRIC に記録された舶用機器に関する信頼性フィールド・データの状況と全期間平均統計値を表 3.1 に示した。収集されたデータを大別するならば、以下に示した船舶搭載機器故障発生に関わるデータと警報発生に関わるデータの 2 種類である。

(A) 故障発生データ

故障状態が確認された機器が存在するデータ。

(B) 警報発生データ

何らかの警報装置で異常発生が発報された場合のデータであり、故障発生機器が確認されない場合や誤報を含む。

表 3.1 に示したように収集・整理されたデータの総数は 114,707 件である。この内、舶用機器の故障発生に関するデータは 77,420 件であり、全体の約 64% を占めていることが明かとなった。

表 3.1 SRIC における舶用機器信頼性情報の現況

Total Data	[case]	114707
Failure Data	[case]	77420
Ships	[vessel]	265
Failure Rate : λ	[case/1000h]	7.246
Work for Repair : mh	[man·h:MH]	5.0
Influence Time : IM	[min]	4.9
Manning Index : MI	[MH/1000h]	36.22

※ 調査期間：1982～1999

表中に示したように、1982 年より 1999 年までの全期間全故障データを対象として求めた平均故障率(Failure Rate: λ)[case/1000h]は以下の通りである。

$$\lambda = 7.246 \quad [\text{case}/1000\text{h}]$$

また、この故障率を平均故障間隔(Mean Time Between Failure : MTBF)[h]として表すならば、次のように算出される。

$$\text{MTBF} \doteq 138 \text{ [h]}$$

ここで船舶信頼性調査で使用している平均故障率： λ の定義を以下に示す。

$$(\text{平均故障率} : \lambda) [\text{case}/1000\text{h}] = N(t) / t$$

$N(t)$:	全故障数	$[\text{case}]$
t	:	対象機器の累積動作時間	$[1000\text{h}]$

すなわち、ある期間内で累積された機器の動作時間 t とその期間内の全故障数 $N(t)$ によって算出されるものである。この平均故障率において、対象機器の動作時間は最も重要な要素となるが、現実には全ての機器の動作時間を正確に求めることは非常に困難である。そこで、便宜的ではあるが、本論では機器自体の存在時間を経過時間として考えることによって平均故障率の算出を実行した。

本来の故障率⁽¹⁹⁾の決定方法を以下に示す。

$$\lambda_i = n_i / \left[\left\{ N - \sum_{j=1}^{i-1} n_j \right\} \Delta t_j \right]$$

従って、故障率の算出にはサンプル母数： N を考慮することが必要となるが、現実問題として寿命試験ではないフィールド調査の場合にサンプル母数を正しく把握することは困難な場合が通常であり、本調査でも把握されていない。

そこで、

- ・十分に大きな t を取り、故障観測数： $N(t)$ を大きくする。
- ・加えて、機器の故障分布が指数分布に従うものとする。

以上により、

$$N(t) / t \rightarrow 1 / T \quad T : \text{MTBF(平均故障間隔)}$$

すなわち、「MTBF の逆数」に近似できるとして、 $N(t) / t$ で定義した(故障率)を使用することにより、対象機器の故障発生特性を評価する⁽²⁰⁾のものである。また、機器の稼働・不稼働率は以下のように定義される。

$$(\text{稼働率}) = \text{MTBF} / (\text{MTBF} + \text{MTTR})$$

MTBF : 平均故障間隔
 MTTR : 平均動作不可能時間、平均修理時間
(Mean Time To Repair)

$$(\text{不稼働率}) = 1 - (\text{稼働率})$$

故障した機器に対する修復処置作業工数が明かとなっていることは、船舶信頼性情報の大きな特徴のひとつである。ここで、修復処置作業工数：保全工数 (Repair Work : mh) [man*h : MH] は投入人員と投入時間の積によって以下のように定義されている。

$$(\text{保全工数 : mh}) [\text{man} \cdot \text{h} : \text{MH}] = R_m * R_t$$

R_m : 保全作業への投入人員 [man]
 R_t : 保全作業への投入時間 [h]

運航への影響時間 (Influence Time : IM) [min]は、搭載機器の故障発生によってもたらされた運航への直接的な影響を時間として表現したものであり、航行中においては主機の自動及び手動停止時間あるいは減速時間であり、停泊中においては出港遅延時間を示したものである。船舶信頼性情報では、故障規模の基準として影響時間や保全工数の発生状況を評価しており、影響時間を伴う故障を重故障 (Major Failure)、そして故障機器の修復に費やされた保全工数が 5 [MH]以上であった場合を重大故障 (Serious Failure) として位置付けている。

配員指数 (Manning Index : MI) [MH/1000h]は、平均故障率と平均処置工数を乗じたものであり、ある故障発生により単位時間あたりに投入される人と時間を意味するものであり、総合的な評価として重要な指標である。

$$(\text{配員指数 : MI}) [\text{MH}/1000\text{h}] = \lambda * mh$$

現実の運転時間との差異を評価するならば、使用された経過時間は実運転時間に対して常に大なることは明らかであることから、結果として見かけ上信頼性を高めることになっている。また、調査全期間を通じて解析対象とした船舶は 256 隻であるが、対象船舶個々において何らかの理由により故障報告群の間隔が非常に大きく (365 日以上) 空いた場合、すなわち故障報告が中断した期間を持つ船舶は、それぞれ別個の船舶として取り扱い、データを処理することとした。その結果、調査対象となった船舶数 265 隻に対して見かけ上の延べ船舶数は 358 隻である。

調査全期間を通じての全調査対象船舶、全発生故障において故障機器修復に投入された平均の処置作業人数は 1.8 人であり、平均の処置作業時間は 1.6 時間である。また、個々の故障修復に投入された故障修復処置作業工数 (保全工数 : mh[MH]) の全平均は 4.9[MH]となっている。さらに、故障発生に対して投入処置工数の質的な評価基準を導入した評価インデックスである配員指数も同時に示した。言うまでもなく、故障発生は機器の正常動作を喪失させることにより船舶に不安全状態をもたらすものであることから、故障率は量に関する直接的な評価指標となるものである。一方、修復処置作業工数は故障の質的な指標であると同時に、船舶に与える人的時間的損失による不安全状態の指標と考えられる。すなわち、陸上施設と異なり航行する船舶では人的資源に限界があり、この配員資源を消費することによって安全を確保するからである。従って、配員指数は船舶固有の配員資源からの投資レベルを表現し、評価するものと考えられる。

3.2.2 機械分野別による舶用機器故障の特性

機器分類第 1 段階の機械分野別の故障発生状況を表 3.2 に示した。機械分野別の故

障発生状況では、主機系 (Item1="1") 機器の修復処置作業工数と運航への影響時間、また発生割合において全体の約 43[%]を占める補機 I 系 ("8") 機器の故障率と配員指数が特徴的に大きな値を示している。ここで、主機系機器とは[11: 主機本体] (機器コードと名称) や[14: 付属機器]、そして補機 I 系機器とは[82: ポンプ]や[85: 清浄機]、[88: 諸管弁]等を代表するものである。また故障率に関しては、自動化 I 系 ("5") 機器故障の多発も注目されるものである。この自動化 I 系機器は、[511: データロガー]や[512: モニター]、[513: コンピュータ]などの電子系機器を代表するものであることから、今後も装備の増加が想定される船用機器分類である。

故障の発生による機関の自動・手動停止や出港遅延など、運航への時間的影響: IM[min]をもたらす故障 (重故障: IM>0[min]) 発生割合を示したものが、表中の有影響時間故障割合である。主機系故障では当然の事ながら高い数値を示しているが、その影響時間の平均値においては主軸系機器故障が第 1 位であり、ボイラ系機器、そして航海通信系機器故障の順となっている。

機器に対して想定される故障発生による人的時間的損失の指標とも考えられる配員指数で見ると、補機 I 系機器故障の配員指数が最大であり、換言するならば船舶に対して最も大きな損失をもたらす可能性を持つ故障であることが明らかである。故障率と修復処置作業工数そして配員指数に注目し、これら 3 つの評価指数を同時に表示できるマルチ・チャートとして図 3.1 に示した。修復処置作業工数において重大な損失を船舶に及ぼす主機系機器故障と故障率において重大な損失を及ぼす補機 I 系機器故障の関係では、配員指数による比較において補機 I 系機器故障が安全航行実現の目的達成に対してより大きな影響を持つものと考えられる。機能喪失に直接的に関与する重故障発生による不安全状態の発生と同時に、発生した故障機器に対する修復作業に費やされる人的時間的損失もまた不安全状態を継続させるものであり、補機 I 系機器故障は高い故障率のみならず、人的時間的損失においても大きな影響を持つものである。

運航への影響として、図 3.2 ではこれらの故障の持つ他の機器との差異と特徴を平均影響時間 (IM=0[min]を含めた平均) において示した。運航への影響時間とは前述のように故障発生による主機の減速や停止あるいは出港遅延などの時間を示したものであり、これは安全運航の実現に対する直接的な障害結果を示したものである。図より明かなように、全平均影響時間において主機系機器故障は影響時間が大きく配員指数は小さい、一方補機 I 系機器故障は影響時間が小さく配員指数は大きいとする対局の特性を示している。なお (IM=0[min]) 故障の割合は、主機系機器故障の場合で約 26[%]、補機 I 系機器故障の場合で約 0.9[%]となっており、当然の事ながら推進機能に直接関係する主機系故障において航海への影響時間の発生が高いことが明かである。

表 3.2 に示した修復処置作業工数において、特に平均投入人員: R_m と投入時間: R_t に注目して示した結果を表 3.3 に示す。比較的長大重量物を対象とせざるを得ない主機系機器故障修復作業では人的要求が大きく、航海通信系機器故障では時間的要求が大きい。主機系故障の状況は当然のことではあるが、航海通信系機器故障の作業時間に関しては今後さらに電子機器等の搭載が進められるものと予想される事からも、重大な問題と考えられる。

表 3.2 機器分野別の故障発生状況

Equipment Code Item Level 1 (機械分野分類)	Failures / Ratio (発生件数、 構成割合) [Case]/[%]	Failure Rate (故障率) [Case/ 1000Hr]	Ratio of Failure with Repair Work (有修復作業 故障の割合) [%]	Repair Work (修復作業 工数) [Man*Hr.]	Ratio of Failure with Influence (有影響故 障の割合) [%]	Influence Time (影響 時間) [Min.]	Manning Index (配員指数) [MH/ 1000Hr.]
1 Main Engine (主機系)	7032 / 9.1	0.856	85.8	10.3	26.1	142	8.775
2 Boiler (ボイラ系)	7116 / 9.2	0.834	94.8	4.9	1.9	222	4.092
3 Generator Engine (発電原動機系)	5235 / 6.8	0.704	93.9	6.3	1.7	96	4.399
4 Electric Equipment (電気機器系)	4097 / 5.3	0.533	89.4	3.9	1.6	91	2.086
5 Control Equipment I (自動化 I 系)	10761 / 14.0	1.135	91.8	2.2	3.8	56	2.517
6 Control Equipment II (自動化 II 系)	5097 / 6.6	0.605	95.7	2.1	0.7	79	1.262
7 Shafting Equipment (主軸系)	424 / 0.6	0.209	78.8	1.6	1.9	134	0.341
8 Miscellaneous Equip. I (補機 I 系)	33049 / 42.9	3.211	94.8	5.5	0.9	129	17.543
9 Miscellaneous Equip. II (補機 II 系)	2918 / 3.8	0.401	94.9	2.3	0.8	126	0.920
N Navi, Communication (航海通信系)	1385 / 1.8	0.721	80.9	3.6	1.1	229	2.601

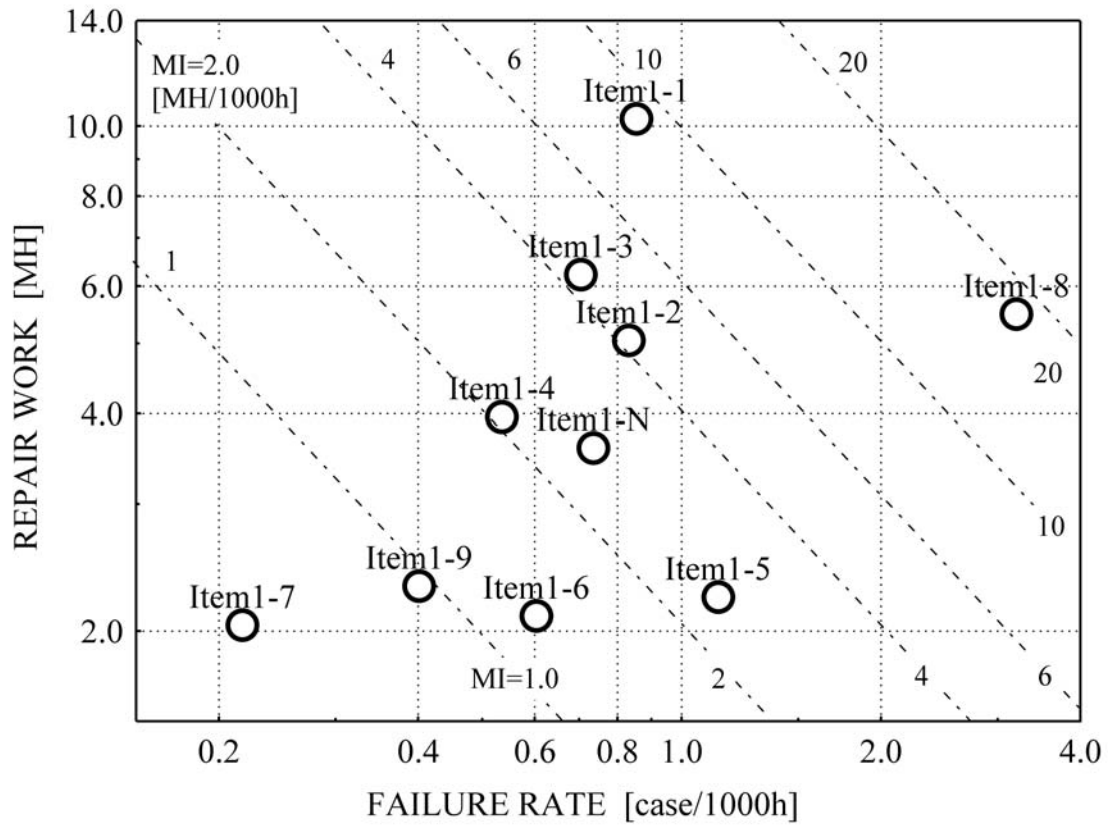


図 3.1 機械分野別故障の発生状況

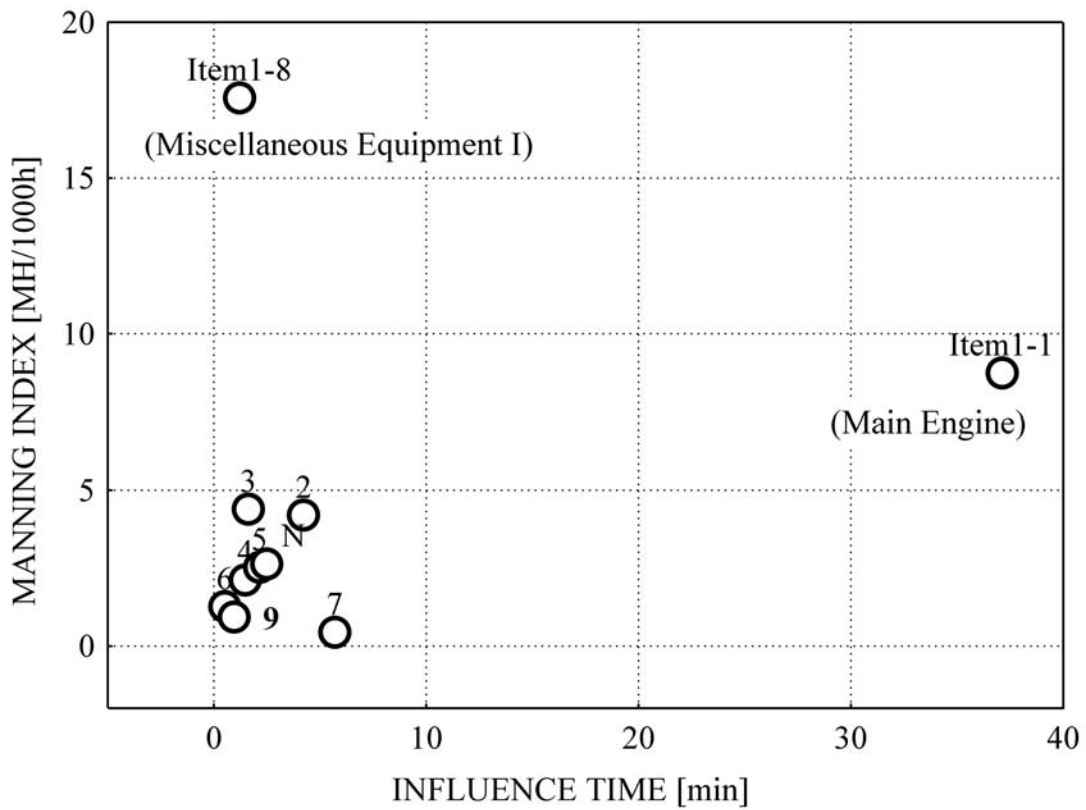


図 3.2 機械分野別故障による航海への影響と配員指数

表 3.3 機械分野別故障修復作業における平均投入人員と平均時間

Equipment Code Item Level 1	Repair Work	
	Av. Persons : Rm [man]	Av. Hours : Rt [h]
1 Main Engine (主機系)	2.85	1.89
2 Boiler (ボイラ系)	1.69	1.43
3 Generator Engine (発電原動機系)	2.03	1.97
4 Electric Equipment (電気機器系)	1.61	1.67
5 Control Equipment I (自動化 I 系)	1.53	1.09
6 Control Equipment II (自動化 II 系)	1.42	1.14
7 Shafting Equipment (主軸系)	1.22	0.89
8 Miscellaneous Equip. I (補機 I 系)	1.86	1.94
9 Miscellaneous Equip. II (補機 II 系)	1.40	1.05
N Navigation, Communication (航海通信系)	1.27	2.08

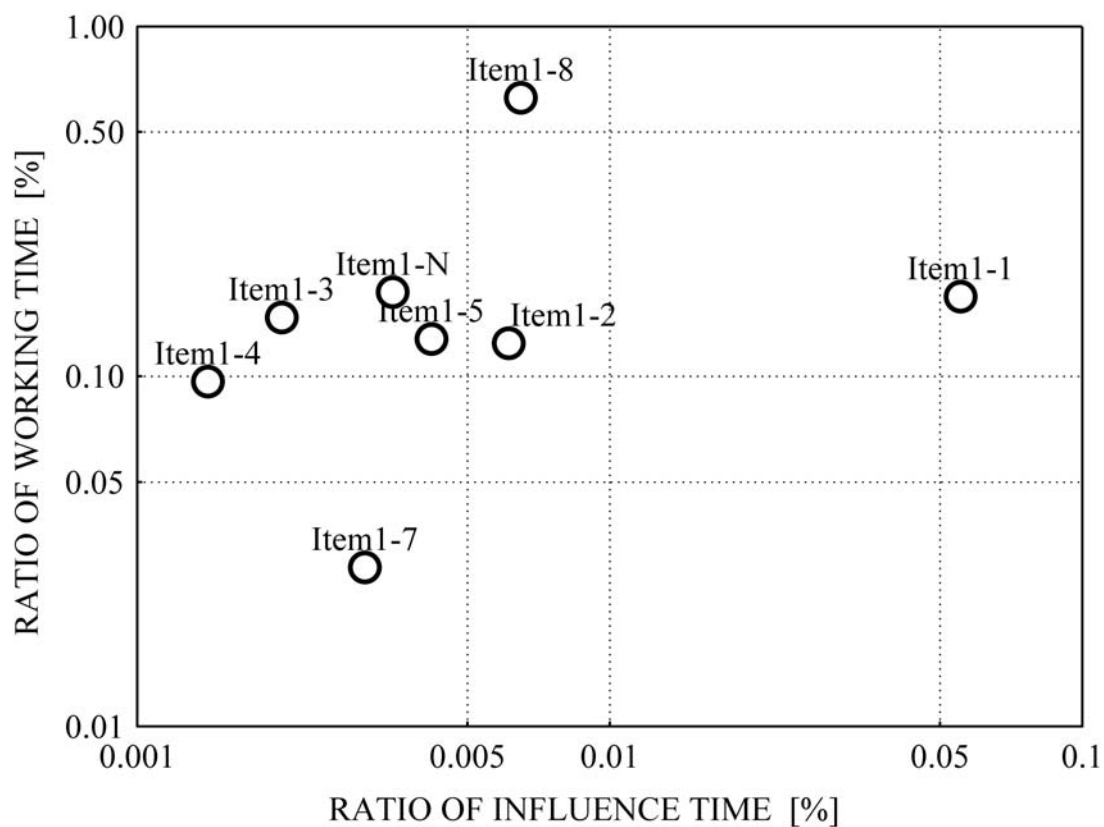


図 3.3 機械分野別故障の修復作業時間と影響時間の割合

図 3.3 には、全航海時間に対する運航への影響時間の割合と修復処置作業時間の割合を示した。前述した特性により、ここでも当然のことながら主機系機器故障と補機 I 系機器故障の特徴が顕著である。修復処置作業時間は、作業スペースなどの環境条件による制限は考えられるものの、作業投入人員との関係において成立する点を考慮するならば、保全作業計画立案においては対象機器に対する配員指数と配員資源を含めた問題として戦略的な検討を実行することが、結果的に運航の安全を担保すると指摘できるものである。

3.2.3 経年変動に見られる船用機器故障の特性

1982 年の調査開始より全期間通じての平均故障率と平均処置工数の年毎の推移状況を図 3.4 に示した。平均故障率の推移では、1980 年代後半に増加した状況もあるが、全体の傾向としては減少傾向から横這いの状況を示しており、調査開始当時から比較するならばほぼ半減した状況である。すなわち、80 年代前半に対して現在の船用機器の信頼度は倍化したものと指摘できる。

平均故障修復処置工数の推移は減少傾向から 90 年代に入って増加の傾向に転じている。この原因を明確にすることは困難であるが、少なくとも船舶や搭載機器が大きく変化したとは言えないことから、この時期に実施された低質油導入によって安全性が変化したことが原因のひとつとして推定されるものである。また調査実施上の問題としては、対象船の少人数化が大きく進行した結果、船舶信頼性調査に応ずることの作業負担が船舶において年々増加し、軽微な故障発生に対する報告の省略等が発生したことも考えられる。安全性の変化に限定して考えるならば、少人数化による直接間接的な影響として修復処置作業実施に対する効率的な対応能力の低下や自社社員配乗の船舶であった対象船選択条件を 90 年代より混乗船も含めることに変更したことなどによる影響も推測できるものである。

図 3.5 には、故障機器に対する平均修復処置時間とアベイラビリティの経年変動の状況を示した。ここで示したアベイラビリティは信頼性の評価指標のひとつであり、「修理可能な系、機器、部品などがある特定の瞬間に機能を維持している確率」(JIS Z8115) と定義されるものである。従って、機器の稼働率を示す指標値とも考えられるものである。

一般的に、アベイラビリティ(Availability : A)は、信頼度 $R(t)$ が時間 t の関数として指数分布に従う場合、次式によって求められるものである。

$$A = \mu / (\lambda + \mu)$$

λ : 故障率
 μ : 修復率

ここで、厳密な定義に基づき、単一ユニットシステムを対象としたアベイラビリティを整理⁽²¹⁾するならば、以下の通りである。

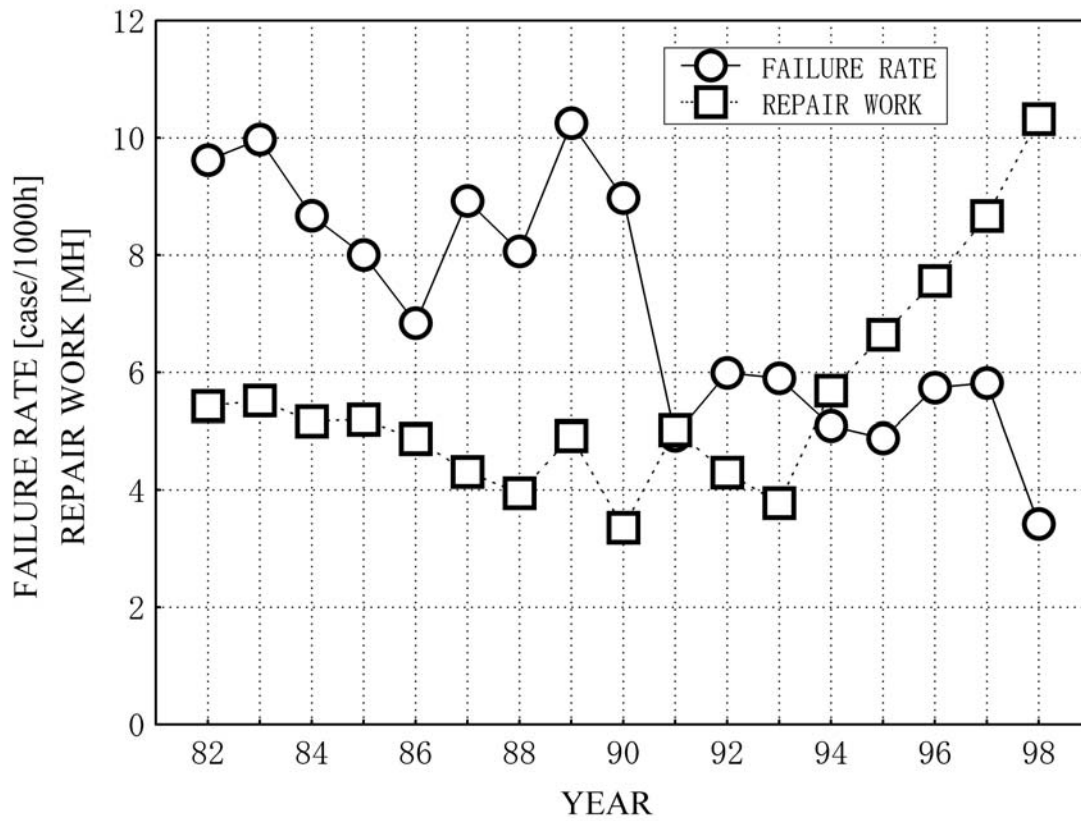


図 3.4 船用機器故障における故障率と修復処置工数の経年変動

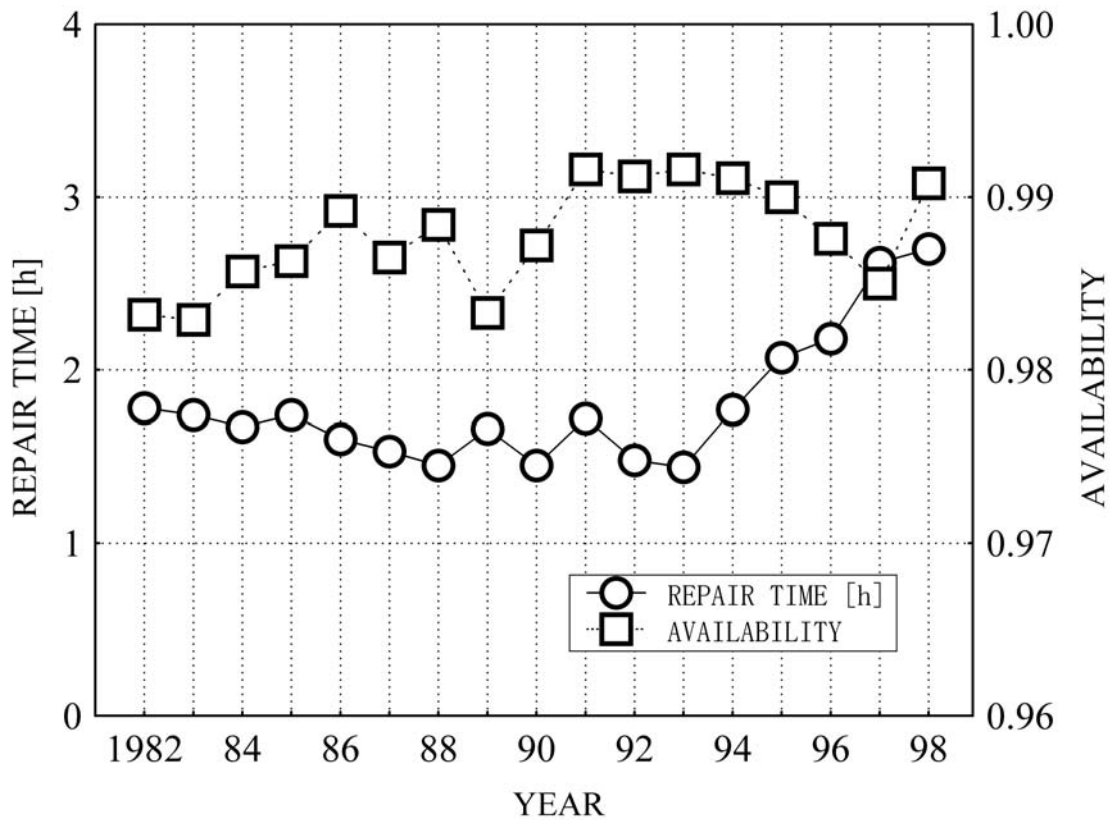


図 3.5 平均修復処置時間とアベイラビリティの経年変動

(1) 瞬間アベイラビリティ

ある時点 t において、要求された機能を遂行状態にある確率。

$$A(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \exp\{-(\lambda + \mu)t\}$$

(2) 平均アベイラビリティ

時間間隔 (t_1, t_2) における瞬間アベイラビリティの平均値。

$$\bar{A}(t_1, t_2) = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} A(t) dt = \frac{\lambda}{(\lambda + \mu)^2 (t_2 - t_1)} \cdot [\exp\{-(\lambda + \mu)t_1\} - \exp\{-(\lambda + \mu)t_2\}]$$

(3) 漸近アベイラビリティ

瞬間アベイラビリティが $t \rightarrow \infty$ のときに極限值が存在する場合の値。

$$A(\infty) = \frac{\mu}{\lambda + \mu}$$

(4) (定常) アベイラビリティ

ある期間、定常状態にある瞬間アベイラビリティの平均値。

$$A = \frac{\mu}{\lambda + \mu}$$

(5) 漸近平均アベイラビリティ

時間間隔 (t_1, t_2) において t_2 が無限大になったとき、平均アベイラビリティの極限值が存在するときの値。

$$\bar{A} = \lim_{t_2 \rightarrow \infty} \bar{A}(t_1, t_2) = \frac{\mu}{\lambda + \mu}$$

アベイラビリティの経年変動に注目するならば、図 3.5 に示したように 90 年代前半までには増加傾向が見られるが、その後減少のトレンドを示している。すなわち、90 年代初頭において稼働率は経済性と技術水準のトータル・バランスにおいて最大になっていたと判断されるものであり、この安全水準を、経済性を考慮して維持するためには、さらに新たな技術面での発達が必要になっていると考えられる。

機械分野別に故障発生割合構成の経年変動を図 3.6 に示した。表 3.2 で示された補機 I 系 (Item1="8") 機器故障が高い構成割合によって推移している状況が顕著である。特に 2 つのピークの出現が特徴的であるが、これらの背景には低質油の採用と混乗船の影響が推定されるものである。全体として各機械分野別機器故障の構成割合に著しい変化は見られず、定性的に評価するならば、船用機器故障の発生に大きな経年的な質的变化はないものと考えられる。しかし部分的には電気系 (Item1="4") 機器故障に全期間を通じての増加傾向と自動化 I 系 ("5") 機器故障に 90 年代半ばよりの

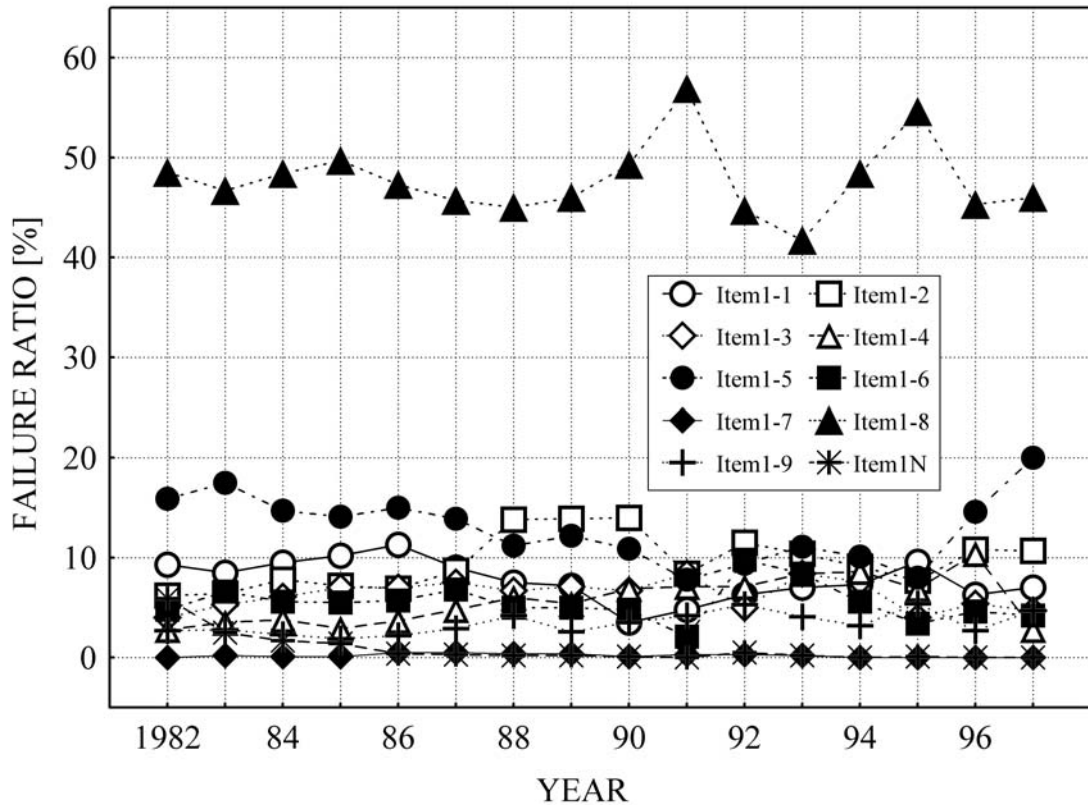


図 3.6 機械分野別機器故障の故障割合の年変動

増加傾向が現れている。これらの傾向は船舶の自動化の進行に伴い、自動化機器やコンピュータ搭載機器の装備増加によって故障発生が増加が表れたものと推測される。船舶の自動化は進行し続けると考えられることから、このような傾向は今後も更に増加するものと考えられる。従って、非機械系機器故障の修復処置作業方法の変更や自動診断技術の確立等が重要となっている。

3.2.4 船用機器故障の原因と理由

船舶信頼性調査では故障機器に関する情報として故障の発生した機器コードの記録と同時に、以下の記録を調査票（添付資料）に従い報告すること求めている。

- ① 故障機器の状態（故障の現象）
- ② 故障の原因（故障が発生した直接的な原因）
- ③ 故障の推定理由（故障が発生した根本的な理由）
- ④ 故障機器に対する処置（修復処置作業の内容）

①と④は、明らかな現象と行為に対応することから回答誤差の出現は少ないが、②及び③は報告者の主観によって決定されていることを考慮しなければならない。一般に統計誤差を代表するものとして、「片寄り」と「偶然誤差」が誤差発生型の型として定義

(22)されているが、人間である報告者の主観によって発生することが予想される誤差は偶然誤差の範疇と考えられている。標本数が少ない少数統計では、偶然誤差の影響に対する検討は不可欠であるが、経験的に標本数が多い場合は相殺される性質が確認されていることから、船舶信頼性調査における主観データに対する誤差発生の影響は少ないと考えられるものである。

表 3.4.1 には全期間全機器故障を対象とした故障の現象と原因のクロス表を示した。また、機械分野別分類において故障発生数が多く代表的な主機系機器故障、自動化 I 系機器故障、そして補機 I 系機器故障について、表 3.4.2~4 に故障の現象と原因のクロス表を示した。なお、示した値は該当記入のあるものだけであり、「不明」や「その他」あるいは記入のないものは省略した。上段数値は該当故障件数[件数：Case]を示し、下段太字数値はクロス表内合計に対する割合[%]（1%以上）を示している。

表 3.4.1 に見られる特徴的な傾向として、亀裂等の故障は振動(4.2[%])や疲労(5.8[%])、腐食(5.9[%])そして劣化(3.5[%])等を原因として多発していること、また汚損を原因として漏洩(1.7[%])や汚損(2.2[%])、固着(3.8[%])そして閉塞(4.3[%])等の故障が多発していることが明らかである。

亀裂等故障の発生は主機系機器(全亀裂故障の約 21.1[%])と補機 I 系機器(同約 39.2[%])において顕著であるが、主機系機器では疲労を原因とする亀裂故障(主機系機器故障の 5.8[%])、補機 I 系機器では腐食を原因として亀裂故障(補機 I 系機器故障の 7.5[%])の発生が多いことが認められる。このように動作部分の多い主機系機器とポンプや清浄機、諸管弁等を代表する補機 I 系機器の故障と原因の関係としては当然の事ではあるが、他面このような明らかな因果関係において故障が発生している事実注目すべきである。更に、汚損を原因とする閉塞故障(全機器故障の 7.8[%])等の発生もまた顕著であることを認識して保全計画を立案することが重要である。

電子機器やリモコン装置、そして各種センサを代表する自動化 I 系機器の故障では、振動を原因とする断線等の故障(自動化 I 系機器故障の 10.5[%])の多発が見られる。このように故障発生の原因と故障現象の関連は、主機系機器故障と補機 I 系機器故障の場合と同様に対象機器が持つ固有の特徴を考慮するならば、単純な状況が多数であることが明らかであるにも関わらず、故障が発生している状況が現実である。

故障の現象と原因との対応関係を明らかにすることを目的として、コレスポンド解析 (Correspondence Analysis) (23)を実施し、その結果を図 3.7.1~4 に示した。このコレスポンド解析は多変量解析手法のひとつであり、数量化理論 3 類 (Quantification Theory Type 3) (24)と同様な解析手法として特にマーケティングの分野において広く活用されている手法である。基本的には、正準相関解析を基礎としてクロス集計表を入力データとして行・列項目の対応関係を図示することから、対応分析とも呼ばれるものである。ここで、コレスポンド解析と数量化理論 3 類との差異を明らかにするならば、数量化理論 3 類が YES/NO のダミー変数を対象とすることに対して、コレスポンド解析は反応頻度データを対象として分析することにある。それぞれの図中において白丸で示したものが故障現象項目であり、黒丸で示したものが故障原因項目である。コレスポンド解析における評価は位置関係に対する主観的な判断に基づいて実施されるものであるが、定性的には対応関係の強い項目は

近くに、そして弱い項目は遠くに配置されるものである。また、中央位置 (0,0) に集まる項目は他の項目に対して突出した特徴を持たないものと考えられる。

解析結果より故障現象と原因の関係を評価するならば、汚損を原因とする固着や汚損、閉塞故障発生との関係が明かであり、振動を原因とする弛緩や断線故障の発生、そして疲労を原因とする亀裂や変形故障の発生関係が明かである。

表 3.5 には、故障発生の推定理由と故障現象のクロス表を示した。発生状況により評価するならば、時間経過を推定理由とする漏洩や固着故障、そして摩耗などが特徴的なものであり、多数を占めていることが明かである。また、材質が故障発生の理由と考えられる亀裂故障や、時間経過あるいは燃料油自体によって発生したと考えられる閉塞故障の発生も多い。これらの対応関係をコレスポネンス解析によって評価した結果を図 3.8 に示した。解析の結果においては、特に燃料油と固着や汚損故障との関係が明かであると同時に、取り付けによる弛緩故障発生の関係が強く示されている。

表 3.4.1 故障の現象と原因 (全機器故障対象)

Cause State	Vibration (振動等)	Fatigue (疲労等)	Corrosion (腐食等)	Deterioration (劣化等)	Heating (発熱等)	Dirt (汚損等)	Wear (衰耗等)	Electrical Cause (電氣的)
Crack (亀裂等)	1389/1.8	1707/2.2	3265/4.2	1271/1.6	122/	72/	685/	9/
Modification (変形等)	115/	148/	88/	339/	62/	81/	134/	9/
Slack (弛緩等)	1264/1.6	105/	106/	138/	22/	40/	146/	17/
Wear (摩耗等)	312/	247/	396/	674/	48/	117/	1425/1.8	11/
Corrosion (腐食等)	3/	5/	474/	53/	8/	29/	37/	—
Leak (漏洩等)	428/	213/	2260/2.9	1880/2.4	50/	1587/2.0	953/1.2	9/
Dirt (汚損等)	13/	2/	10/	123/	43/	2778/3.6	69/	4/
Adherence (固着等)	61/	45/	149/	455/	142/	3528/4.6	180/	35/
Blockade (閉塞等)	41/	1/	47/	55/	43/	6007/7.8	21/	2/
Fire (焼損等)	62/	54/	26/	212/	302/	197/	65/	127/
Disconnection (断線等)	1525/2.0	111/	19/	726/	86/	648/	140/	314/
Grounding (接地等)	212/	15/	47/	363/	64/	649/	70/	1124/1.5

※ Failure [case] / Failure Ratio [%]

表 3.4.2 故障の現象と原因 (主機系機器対象)

Cause State	Vibration (振動等)	Fatigue (疲労等)	Corrosion (腐食等)	Deterioration (劣化等)	Heating (発熱等)	Dirt (汚損等)	Wear (衰耗等)	Electrical Cause (電氣的)
Crack (亀裂等)	293/4.2	412/5.8	226/3.2	116/1.6	35/	24/	76/1.1	-
Modification (変形等)	20/	15/	8/	22/	5/	7/	9/	-
Slack (弛緩等)	149/2.1	13/	4/	8/	1/	3/	10/	-
Wear (摩耗等)	32/	29/	53/	50/	3/	13/	130/1.8	-
Corrosion (腐食等)	1/	-	39/	1/	-	3/	1/	-
Leak (漏洩等)	73/1.0	33/	414/5.9	249/3.5	11/	119/1.7	129/1.8	-
Dirt (汚損等)	-	-	-	8/	1/	155/2.2	2/	-
Adherence (固着等)	3/	2/	12/	20/	24/	270/3.8	16/	-
Blockade (閉塞等)	7/	-	2/	10/	7/	304/4.3	2/	-
Fire (焼損等)	1/	5/	13/	8/	23/	17/	5/	3/
Disconnection (断線等)	42/	-	-	13/	-	17/	1/	16/
Grounding (接地等)	2/	-	3/	5/	1/	7/	4/	17/

※ Failure [case] / Failure Ratio [%]

表 3.4.3 故障の現象と原因（自動化 I 系機器故障対象）

Cause State	Vibration (振動等)	Fatigue (疲労等)	Corrosion (腐食等)	Deterioration (劣化等)	Heating (発熱等)	Dirt (汚損等)	Wear (衰耗等)	Electrical Cause (電氣的)
Crack (亀裂等)	98/	84/	17/	86/	3/	5/	23/	—
Modification (変形等)	9/	6/	2/	27/	2/	1/	11/	2/
Slack (弛緩等)	245/2.3	10/	—	6/	2/	10/	10/	8/
Wear (摩耗等)	28/	7/	6/	20/	—	6/	49/	4/
Corrosion (腐食等)	—	—	2/	3/	—	1/	—	—
Leak (漏洩等)	20/	8/	19/	94/	3/	36/	28/	3/
Dirt (汚損等)	3/	—	—	22/	1/	364/3.4	7/	—
Adherence (固着等)	11/	7/	3/	36/	7/	205/1.9	20/	7/
Blockade (閉塞等)	1/	—	—	5/	—	242/2.2	—	—
Fire (焼損等)	6/	2/	1/	31/	37/	9/	4/	13/
Disconnection (断線等)	1140/10.5	61/	3/	358/3.3	42/	248/2.3	65/	134/1.2
Grounding (接地等)	93/	6/	1/	116/1.1	25/	111/1.0	19/	107/1.0

※ Failure [case] / Failure Ratio [%]

表 3.4.4 故障の現象と原因（補機 I 系機器故障対象）

Cause State	Vibration (振動等)	Fatigue (疲労等)	Corrosion (腐食等)	Deterioration (劣化等)	Heating (発熱等)	Dirt (汚損等)	Wear (衰耗等)	Electrical Cause (電氣的)
Crack (亀裂等)	544/1.6	737/2.2	2483/7.5	684/2.1	45/	31/	416/1.3	4/
Modification (変形等)	42/	69/	49/	153/	25/	45/	70/	3/
Slack (弛緩等)	297/	50/	73/	90/	7/	5/	77/	2/
Wear (摩耗等)	157/	123/	272/	398/1.2	32/	69/	826/2.5	1/
Corrosion (腐食等)	2/	3/	358/1.1	41/	8/	16/	32/	-
Leak (漏洩等)	192/	89/	1412/4.3	1058/3.2	26/	1246/3.8	585/1.8	-
Dirt (汚損等)	5/	1/	7/	63/	24/	1152/3.5	39/	-
Adherence (固着等)	26/	12/	88/	203/	47/	1728/5.2	61/	5/
Blockade (閉塞等)	26/	1/	28/	29/	23/	3813/11.5	15/	2/
Fire (焼損等)	19/	24/	8/	56/	98/	59/	25/	19/
Disconnection (断線等)	47/	13/	5/	52/	4/	78/	13/	24/
Grounding (接地等)	15/	1/	10/	32/	13/	65/	6/	116/

※ Failure [case] / Failure Ratio [%]

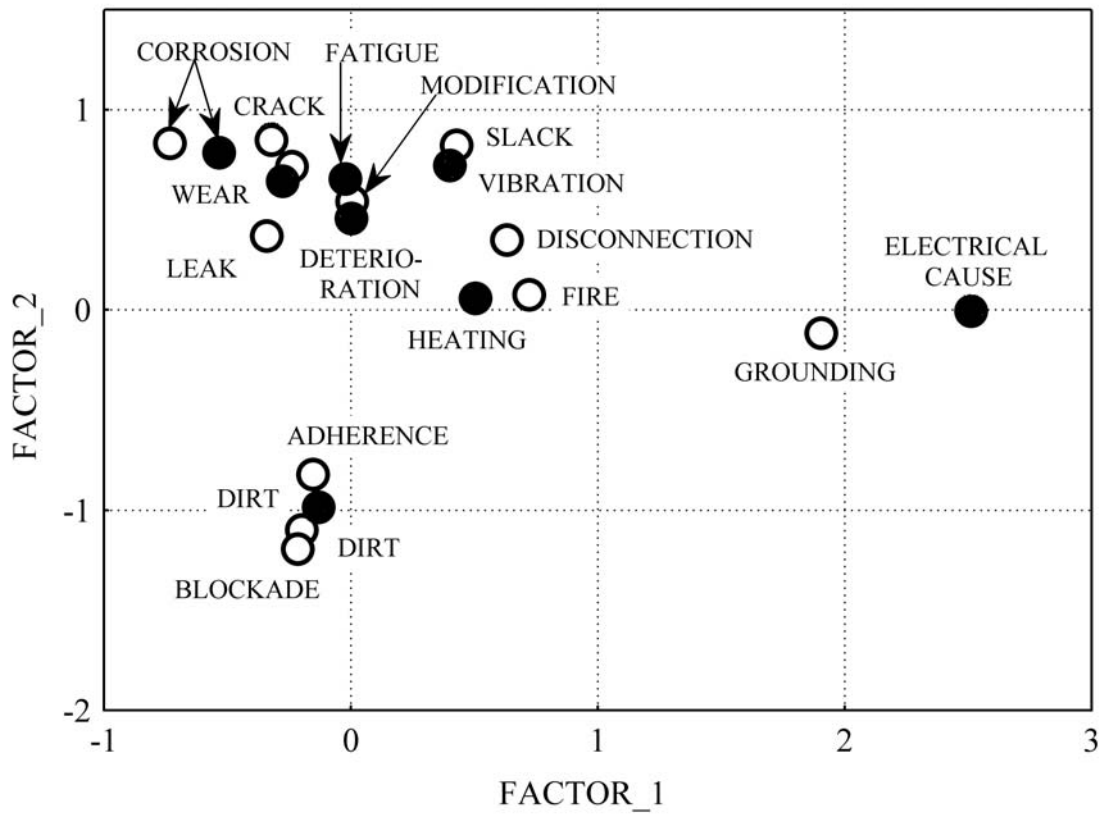


図 3.7.1 全機器故障の現象と原因のコレスポンデンス解析結果

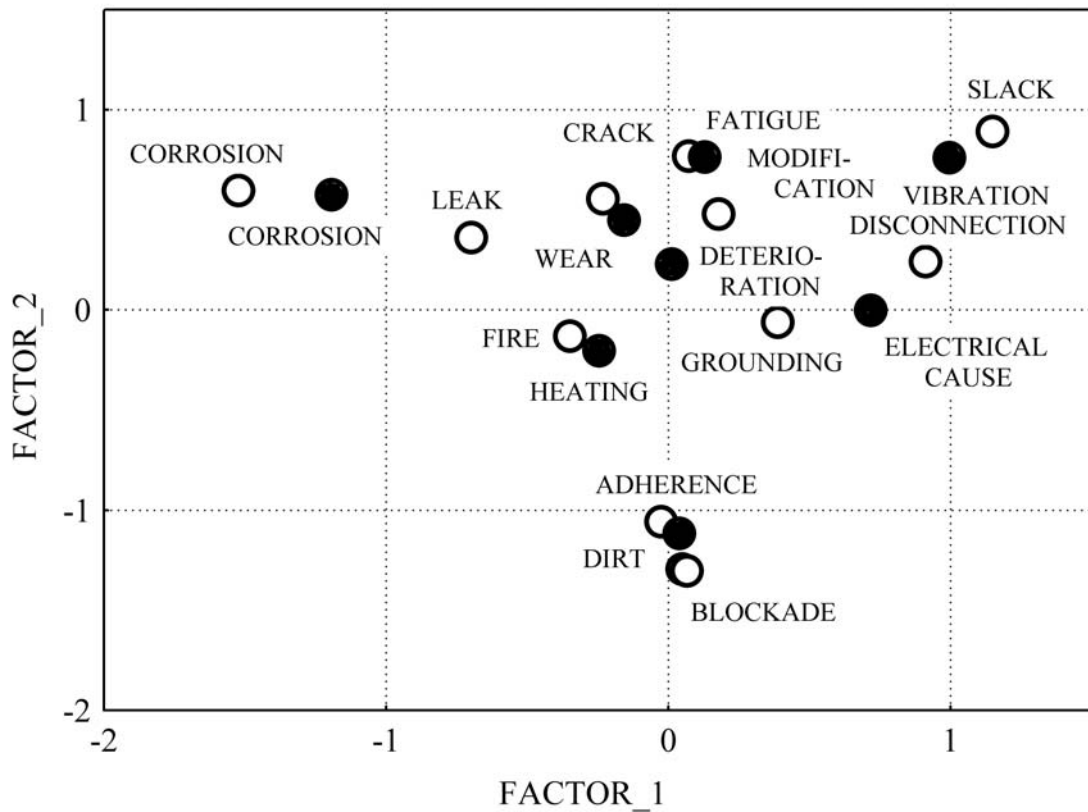


図 3.7.2 主機系機器故障の現象と原因のコレスポンデンス解析結果

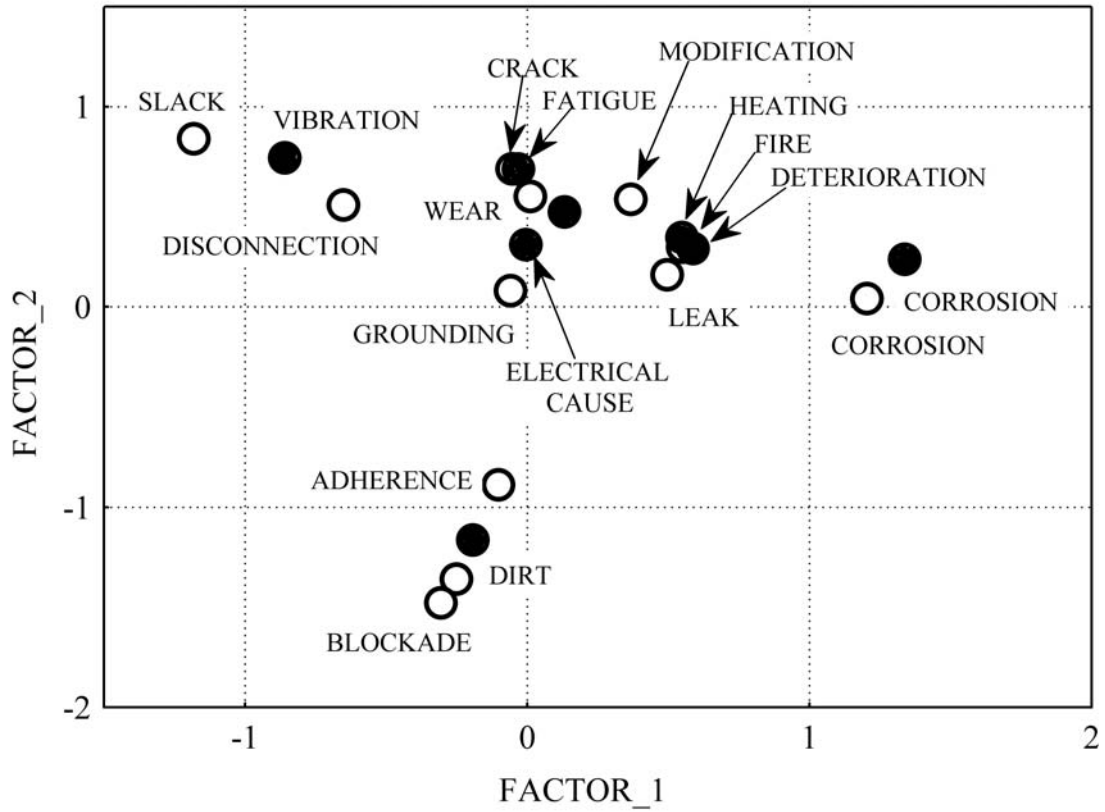


図 3.7.3 自動化 I 系機器故障の現象と原因のコレスポネンダンス解析結果

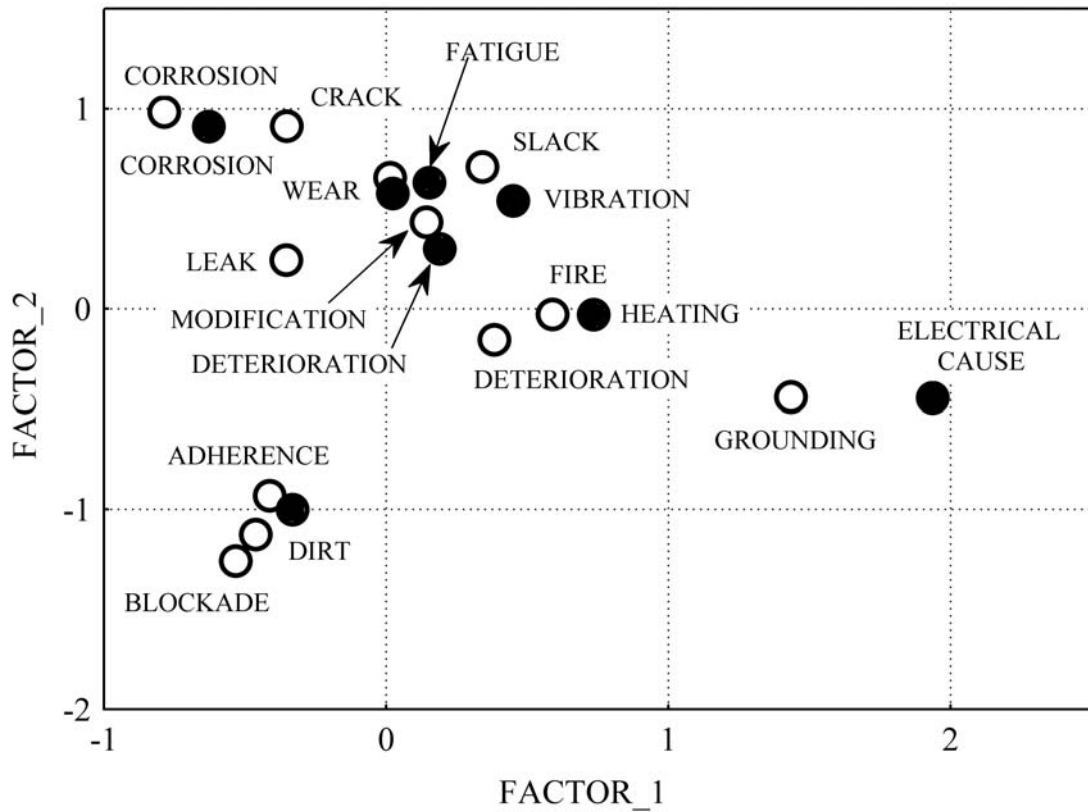


図 3.7.4 補機 I 系機器故障の現象と原因のコレスポネンダンス解析結果

表 3.5 故障の現象と推定理由（全機器故障対象）

Reason State	Design (設計等)	Material (材質等)	Attachment (取付等)	Machining (工作等)	Handling (取扱等)	Setting (設定等)	Time (経年等)	F.O. (燃料油)
Crack (亀裂等)	657/	2018/2.2	946/1.1	716/	209/	22/	5822/6.5	226/
Modification (変形等)	107/	210/	193/	89/	74/	6/	649/	50/
Slack (弛緩等)	145/	99/	923/1.0	109/	145/	30/	678/	17/
Wear (摩耗等)	125/	404/	172/	54/	91/	11/	2772/3.1	177/
Corrosion (腐食等)	15/	144/	16/	9/	12/	6/	493/	24/
Leak (漏洩等)	292/	1027/1.1	818/	382/	368/	70/	5707/6.4	732/
Dirt (汚損等)	143/	32/	47/	31/	256/	33/	1326/1.5	1061/1.2
Adherence (固着等)	280/	187/	153/	114/	234/	60/	2878/3.2	1068/1.2
Blockade (閉塞等)	325/	62/	88/	101/	606/	45/	1871/2.1	2610/2.9
Fire (焼損等)	86/	115/	119/	37/	89/	13/	668/	57/
Disconnection (断線等)	382/	341/	619/	206/	76/	40/	2153/2.4	20/
Grounding (接地等)	196/	170/	548/	185/	204/	23/	1328/1.5	20/

※ Failure [case] / Failure Ratio [%]

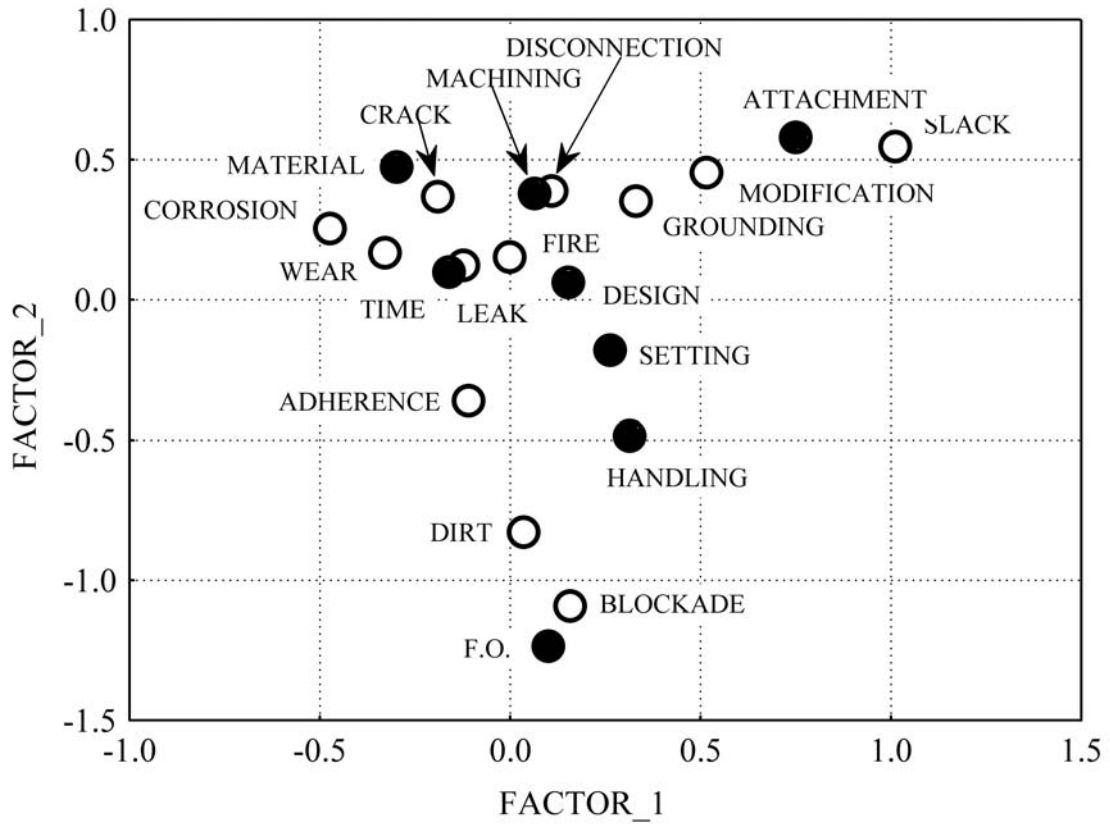


図 3.8 全機器故障の現象と推定理由のコレスポネンス解析結果

3.3 頻出機器故障の特性と評価

3.3.1 頻出機器故障のクラスター解析による評価

第3段階分類の機器・要素を対象として、頻出故障（総故障発生数500件以上）を降順に表3.6に示した。機械分野分類での多発（約43[%]）故障として示された補機I系機器に属するFO及びLO清浄機（[852]、[853]）故障の発生が多数となっており、この2機器だけでも発生故障全体の13.9[%]を占めていることが認められる。また、表中の降順上位16機器故障で全体の約51[%]を占める頻出故障の発生状況である。図3.6で示されたように発生故障の構成割合の経年変動が小さいことから推測されるように、これらの機器に関する故障の発生が現在もなお恒常的であることは明らかであり、相対的に発生故障の中で多数を占めていることが認識されるものである。しかしながら、燃料油低質化の流れの中で油清浄機への負担の増加など、使用条件の厳しい状況変化を考慮することも必要である。

多発する故障機器に注目するならば、前述の油清浄機やディーゼル主機及び発電原動機関連、パイプ、そして制御用電気電子機器における故障の発生が顕著であることが明らかである。そこで、これらの頻出故障を対象とし、その特性を明らかにすること目的として、最遠隣法によるツリークラスタリングを実行した結果を図3.9.1及び3.9.2に示す。

クラスター分析（Cluster Analysis）⁽²⁵⁾は、対象物が持つ特性値のみに注目して、いくつかの群に分類する手法であり、いわば「似たもの集め」により分類を行う手法である。この「似たもの集め」には、似ている程度を測る尺度として類似度や距離を採用して実施するものである。ここで、一般的な手法として距離の定義を示すならば、 n 個のデータについて p 種の特性値が得られたとするならば、

$$\{x_{ij}\} \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n; j = 1, 2, 3, \dots, p)$$

ここで、 $i = a$ 番目のデータと b 番目の特性 j についての距離概念を示すならば以下の通りである。

$$x_{aj} - x_{bj} \quad (j = 1, 2, 3, \dots, p)$$

一般的に使用されている距離の尺度は、各変数を直交する座標軸にとったときのユークリッド距離であり、以下に示す。

$$d_{ab}^2 = \sum_{j=1}^p (x_{aj} - x_{bj})^2$$

この他には、マハラノビスの距離などが用いられている。また、例えば0-1型デー

タに対しては、類似度を尺度として「似たもの集め」を実施する手法もある。

対象とした機器は、頻出故障機器において上位 16 機器とした。ここで 16 機器を選択した理由としては、標本数が多数であることから解析に使用する説明変数の誤差が小さく、船用機器を代表するものとして説明できるからである。

両図はクラスタリングに使用した説明変数が異なる条件を設定した場合の解析結果を示したものであり、それぞれの場合に使用した説明変数を以下に整理して示す。

- 図 3.9.1 の場合の説明変数：
- ① 平均故障率
 - ② 平均投入人員
 - ③ 平均作業時間
 - ④ 平均修復処置作業工数
 - ⑤ 平均影響時間

- 図 3.9.2 の場合の説明変数：
- ①～⑤
 - ⑥ 故障発生件数
 - ⑦ 対象船舶数
 - ⑧ 有影響故障割合
 - ⑨ 配員指数

以上を採用し、変数間の正則性を考慮してクラスタリングを実行した。

両図とも図中に結合過程の距離プロットを示した。クラスター形成の決定は結合過程の判断によって実施されるが主観的な要素も含まれるものであるが、説明変数の差異にも関わらず、いずれも 4 つのクラスターの存在が判別されるものであり、頻出する機器故障を解析対象としたことから、これらのクラスターが船用機器故障の特性を代表するものと考えられる。またクラスター形成の過程から判断するならば、ほぼ等距離でクラスターの分離が完成している図 3.9.1 のケースが有意な解析である。

判別された 4 クラスターを分類し、それぞれのクラスター毎に各機器故障の特性を整理して表 3.7.1 に示した。ここで、クラスターの持つ特性を評価して以下に示す。

- (1) No.1 クラスターを構成する故障は F.O.及び L.O.清浄機に代表される機器故障であり、高い故障率を特徴とするが、直接的な運航への影響としては小さい性質を持っている。
- (2) No.2 クラスターを構成する故障はディーゼル・エンジンの付属機器や S.W.や F.O.系諸管弁の故障であり、修復処置工数と運航への影響時間に大きな値を持つものである。すなわち、No.2 クラスターの故障はその発生により安全な運航の実現に直接的な影響を大きく与えると同時に、人的時間的損失を船舶に与えることによって間接的にも安全な運航を阻害するものと指摘できる。
- (3) No.3 クラスターは、No.1 と No.2 クラスターそれぞれの中位の性質を持つものである。

表 3.6 類出故障の発生状況

Equip. Code (Level-3)	Item Code (Level-1) Equipment Name	Item Code (Level-2) Equipment Name	Item Code (Level-3) Equipment Name	Failure Data [Case]	Cumulative Ratio [%]
852	Miscellaneous Equipment I	Purifier	F.O. Purifier	5965	7.76
853	Miscellaneous Equipment I	Purifier	L.O. Purifier	4714	13.9
222	Boiler	Aux. Boiler	Fittings and Accessories	4257	19.4
114	Main Engine	Diesel Engine	Fittings and Accessories	3333	23.8
314	Generator Engine	Diesel Engine	Fittings and Accessories	3300	28.1
111	Main Engine	Diesel Engine	Device around the Comb. Chamber	2639	31.5
884	Miscellaneous Equipment I	Pipe and Valve	S.W. Line	2308	34.5
881	Miscellaneous Equipment I	Pipe and Valve	F.O. Line	2033	37.1
511	Control Equipment I	Generator	Data Logger	1705	39.3
529	Control Equipment I	Main Engine	Monitor	1487	41.3
885	Miscellaneous Equipment I	Pipe and Valve	Stearn, Exhaust Steam Line	1442	43.2
428	Electric Equipment I	Electric Equipment	Electric Apparatus	1340	44.9
533	Control Equipment I	Diesel Generator Engine	A.C.C.	1306	46.6
311	Generator Engine	Diesel Engine	Device around the Comb. Chamber	1199	48.2
891	Miscellaneous Equipment I	Deck Machinery	Provisin Refrigerator, Chamber	1151	49.7
232	Boiler	Exhaust Gas Economizer	Fittings and Accessories	1108	51.1
820	Miscellaneous Equipment I	Pump	Others	932	52.3
871	Miscellaneous Equipment I	Distiller	Body	818	53.4
412	Electric Equipment	Electric Equipment	Motor	817	54.4
422	Electric Equipment	Electric Equipment	Starter	750	55.3
631	Control Equipment II	Purifier	Control and Safeguard Equipment	743	56.3
882	Miscellaneous Equipment I	Pipe and Valve	L.O. Line	671	57.2
512	Control Equipment I	Generator	Monitor	661	58.0
516	Control Equipment I	Generator	Fire Detector	627	58.9
212	Boiler	Main Boiler	Fittings and Accessories	623	59.7
825	Miscellaneous Equipment I	Pump	Bilge Pump	601	60.5
661	Control Equipment II	Pipe and Valve	Control and Safeguard Equipment	591	61.2
841	Miscellaneous Equipment I	Air Compressor	Main Air Compressor	580	62.0
221	Boiler	Aux. Boiler	Boiler	570	62.7
522	Control Equipment I	Main Engine	Control and Safeguard Equipment	554	63.4
800	Miscellaneous Equipment I	Others	Others	543	64.1
851	Miscellaneous Equipment I	Purifier	D.O. Purifier	535	64.8
892	Miscellaneous Equipment I	Deck Machinery	Air Conditioning Refrigerator	535	65.5
521	Control Equipment I	Main Engine	Remote Control Equipment	506	66.2

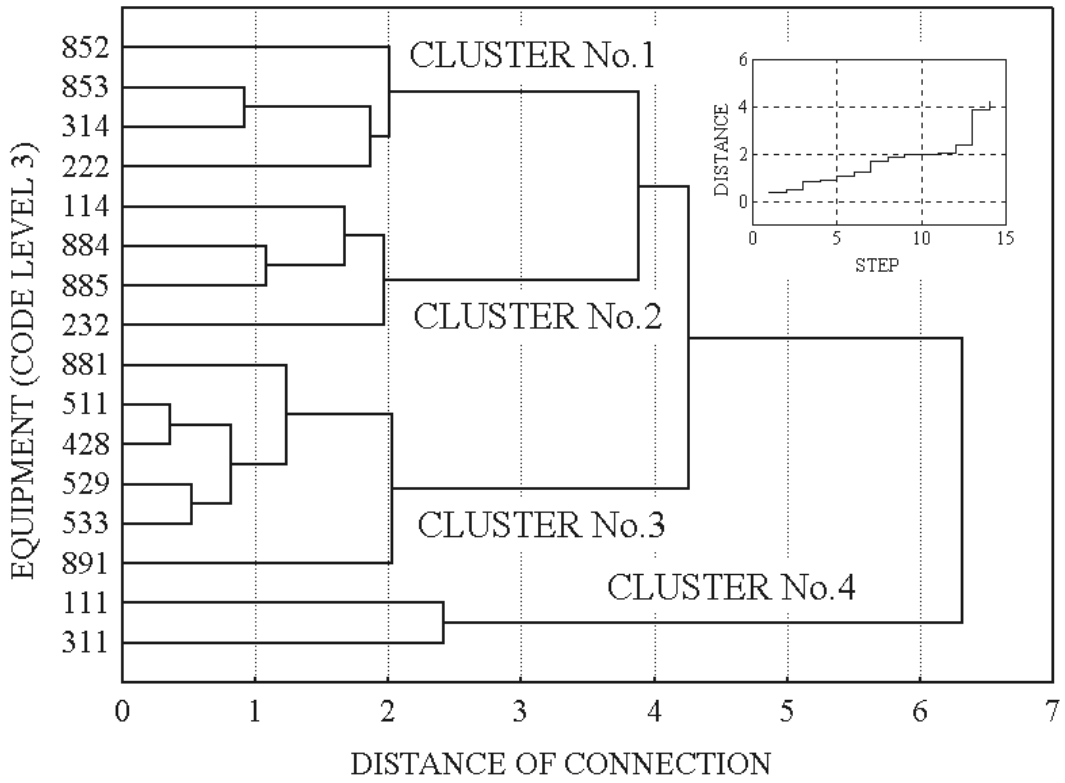


図 3.9.1 頻出故障のクラスタリング (6 説明変数)

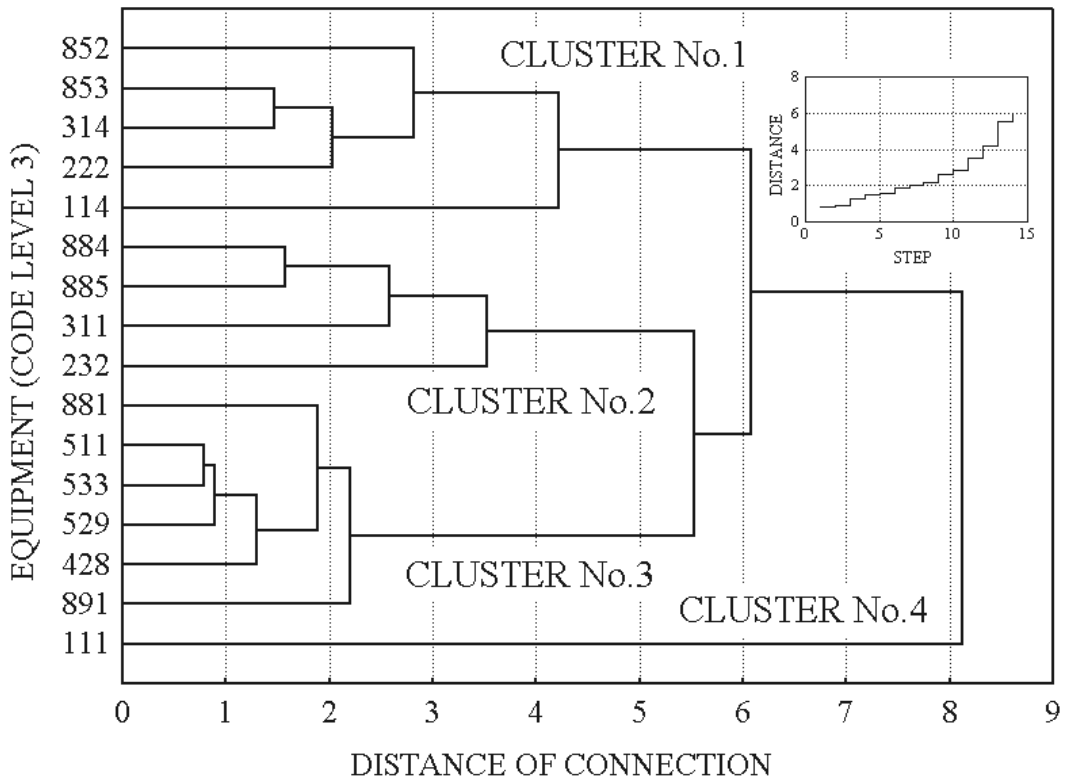


図 3.9.2 頻出故障のクラスタリング (9 説明変数)

表 3.7.1 判別されたクラスタを構成する機器故障の特性

Cluster No.	Equip. Code	Failure Rate [Case/1000Hr.]	Person for Repair [Man]	Time for Repair [Hr.]	Work for Repair [MH]	Influence Time [Min.]	Manning Index [MH/1000Hr.]
1	852	0.775	1.8	1.64	4.22	44.0	3.27
	853	0.622	1.7	1.63	4.12	18.7	2.57
	314	0.513	1.8	1.60	3.97	46.9	2.04
	222	0.651	1.4	0.94	2.00	66.0	1.3
2	114	0.495	2.5	1.49	6.20	126.0	3.07
	884	0.532	2.0	2.14	6.07	149.2	3.23
	885	0.438	2.3	2.08	6.43	197.7	2.82
	232	0.470	1.8	1.54	4.79	213.3	2.25
3	881	0.391	1.7	1.31	3.11	79.9	1.22
	511	0.430	1.4	1.18	2.22	50.0	0.95
	428	0.383	1.3	1.21	1.98	30.0	0.76
	529	0.381	1.4	0.86	1.35	31.4	0.52
	533	0.379	1.6	1.02	2.06	50.0	0.78
	891	0.238	1.5	1.70	3.60	—	0.86
4	111	0.466	3.6	2.40	16.22	151.1	7.56
	311	0.407	2.5	2.76	10.59	161.3	4.31

- (4) No.4 クラスターとなっているディーゼル主機燃焼室廻り機器故障やディーゼル発電原動機燃焼室廻り機器故障は最も運航への影響が大きく、致命的な影響を直接的にも間接的にももたらすものと位置付けられる。

このように船用機器故障はそれぞれの持つ基本的な発生特性により、固有の故障特性を有する4グループの故障群に分類できることが明らかとなった。個々のクラスターが持つ特性をより明確にするために、それぞれのクラスターを説明する特性の平均値をクラスター別に整理して表 3.7.2 に示し、図 3.10 に図示した。

表 3.7.2 クラスター別平均特性値

Cluster No.	Failure Rate [case/1000h]	Person for Repair [man]	Time for Repair [h]	Work [man*h : MH]	Inf. Time [min]	Manning Index [MH/1000h]
1	0.640	1.7	1.5	3.5	43.9	2.295
2	0.484	2.2	1.8	5.9	171.6	2.843
3	0.367	1.5	1.2	2.4	40.2	0.848
4	0.437	3.1	2.6	13.5	156.2	5.935

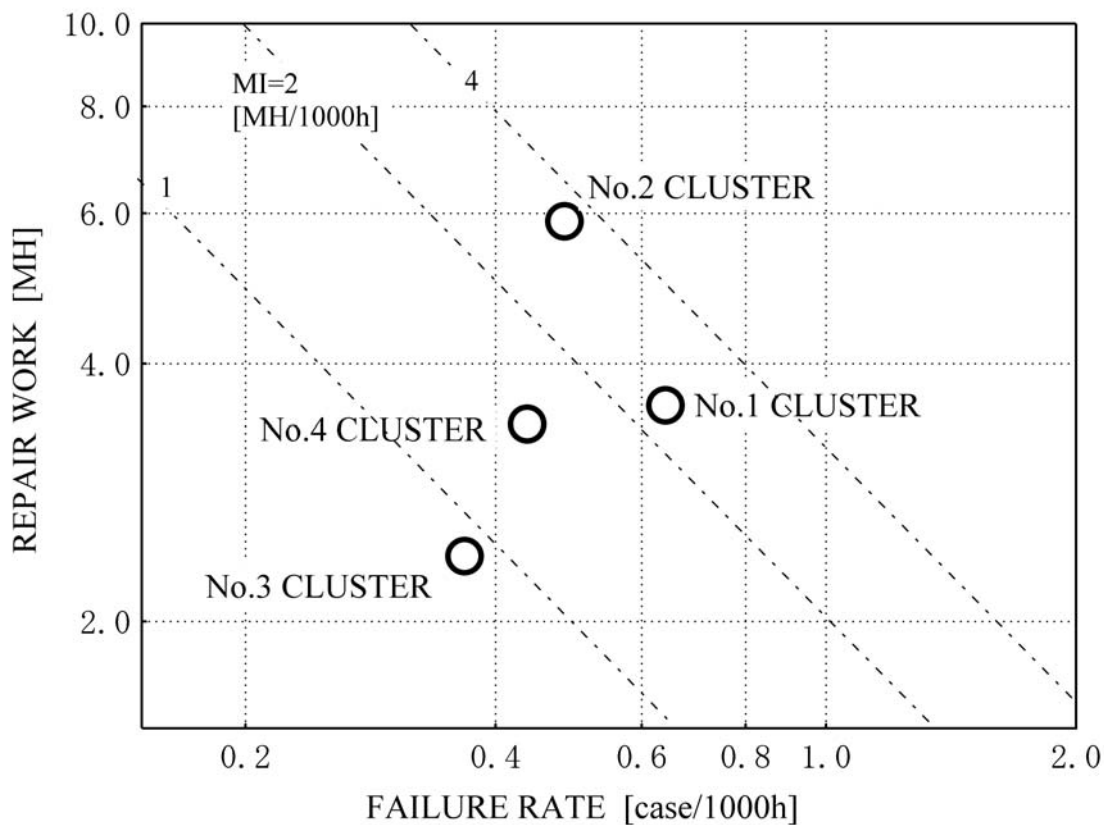


図 3.10 形成クラスター別の故障特性状況

3.3.2 故障頻出機器における機器・要素故障

Item4 レベル(機器・要素)における故障発生状況の詳細を把握するために、表 3.6 に示した頻出故障機器上位 5 機器について、その構成割合を表 3.8.1～5 に示した。F.O. 及び L.O.清浄機は特に故障が多発する船用機器であるが、
 燃焼室廻り機器故障においては、発生割合の約 27%を占める排気弁故障を筆頭として各種弁故障が多数を占めているが、ジャケットやライナ、ピストンなど開放作業を伴う重量物作業も数多く発生している状況が示されている。一方、FO 清浄機機器では弁シリンダやノズル、ボール故障に集中しており、約 72%の故障発生をもたらすものとなっていることが明かとなった。

表 3.8.1 補機燃料油清浄機の要素別故障発生状況

Item Code (Level 1/2/3)	Item Code (Level 4)	Ratio [%]
Code [852*] Miscellaneous Equip. I / Purifier / F.O. Purifier	1 : Friction lining and clutch	3.1
	2 : Bearings	4.6
	3 : Gear	1.3
	4 : Bowl	11.6
	5 : Cylinder valve and nozzle	24.2
	6 : Valve and cock	4.8
	7 : Temperature control valve	2.8
	0 : Others	47.1

表 3.8.2 補機潤滑油清浄機の要素別故障発生状況

Item Code (Level 1/2/3)	Item Code (Level 4)	Ratio [%]
Code [853*] Miscellaneous Equip. I / Purifier / L.O. Purifier	1 : Friction lining and clutch	2.1
	2 : Bearings	4.8
	3 : Gear	0.5
	4 : Bowl	16.7
	5 : Cylinder valve and nozzle	31.6
	6 : Valve and cock	5.4
	7 : Temperature control valve	4.2
	0 : Others	34.5

表 3.8.3 ボイラ付属機器の要素別故障発生状況

Item Code (Level 1/2/3)	Item Code (Level 4)	Ratio [%]
Code [222*] Boiler / Aux. Boiler / Fittings and accessories	1 : Air preheater	0.2
	2 : Forced draft fan	1.9
	3 : L.P. steam generator	0.4
	4 : Soot cleaning devices	1.2
	5 : Burning device	79.8
	6 : Feed water control device	4.2
	0 : Others	12.4

表 3.8.4 主機ディーゼル原動機付属機器の要素別故障発生状況

Item Code (Level 1/2/3)	Item Code (Level 4)	Ratio [%]
Code [114*] Main Engine / Diesel engine / Fittings and accessories	1 : Governor	4.2
	2 : Turbo charger & aux. blower	8.3
	3 : F.O. injection pump	24.9
	4 : F.O. injection pipe & flange	10.7
	5 : Air inter cooler	5.1
	6 : Cylinder oil lubricator	8.4
	0 : Others	38.7

表 3.8.5 発電ディーゼル原動機付属機器の要素別故障発生状況

Item Code (Level 1/2/3)	Item Code (Level 4)	Ratio [%]
Code [314*] Generator engine/ Diesel engine / Fittings and accessories	1 : Governor	5.4
	2 : Turbo charger & aux. blower	1.9
	3 : F.O. injection pump	15.8
	4 : F.O. injection pipe & flange	6.7
	5 : Air inter cooler and L.O. cooler	3.6
	6 : Cylinder oil lubricator	—
	7 : L.O. pump and F.W. cooling pump	5.0
	8 : Pipes and valves	23.5
	0 : Others	38.0

3.4 電気電子系機器故障の特性と評価

3.4.1 電気電子系機器故障の特性

表 3.9 に示したように、主な電気電子系機器に該当するものとして解析対象としたものは、機械分野別 10 区分における電気機器と自動化機器 I 及び II、そして航海通信装置に該当する 4 機械分野である。解析対象としたものは表中に示したように、Item 2 レベル分類では 24 の機械・装置であり、Item 3 レベル分類では 123 種の機器・要素になる。なお、船舶信頼性情報の機器分類における全機械分野での Item4 レベル分類は 1872 要素に分類されている。これら 4 機械分野の機器をまとめて、図 3.11 に示した。このように故障率と修復作業工数の観点から見るならば、電気電子系機器はほぼ中位の特徴を持つ機器として整理されることが明かである。

表 3.9 電気電子系機器の分類

Item Level 1 (機械分野分類)	Item Level 2 (機械・装置分類)	Item Level 3 (機器・要素分類)
1 : Main Engine 2 : Boiler 3 : Generator Engine 7 : Shafting Equipment 8 : Miscellaneous Equipment I 9 : Miscellaneous Equipment II		Non-Electric, Non-Electronic Equipments
4 : Electric Equipment	1 : Electric Equipment	1 : Generator 2 : Motor
	2 : Electric Equipment	1 : Switch Boards 2 : Starter 3 : Auto Synchronizing Device 4 : Auto Load Sharing Device 5 : Static Exciter ----- 6 : Transformaer 7 : Electric Cable 8 : Electric Apparatus
5 : Control Equipment I	1 : General	1 : Data Logger 2 : Monitor 3 : Comtuter .
	2 : Main Engine 3 : Boiler 4 : Diesel Generator Eng. 5 : Turbine Gene. Eng. 6 : Shafting Equipment	1 : Remote Control Equipment 2 : Control, Safeguard Equipment . . .
6 : Control Equipment II	1 : Pump 2 : Air Compressor 3 : Purifier . . .	1 : Control, Safeguard Equipment 9 : Monitor 0 : Others
N : Navigation and Communication Equipment	1 : Navigation Equipment . .	1 : Magnetic Compass . .
4 [Machines]	24 [Equipments]	123 [Equipments, Parts]

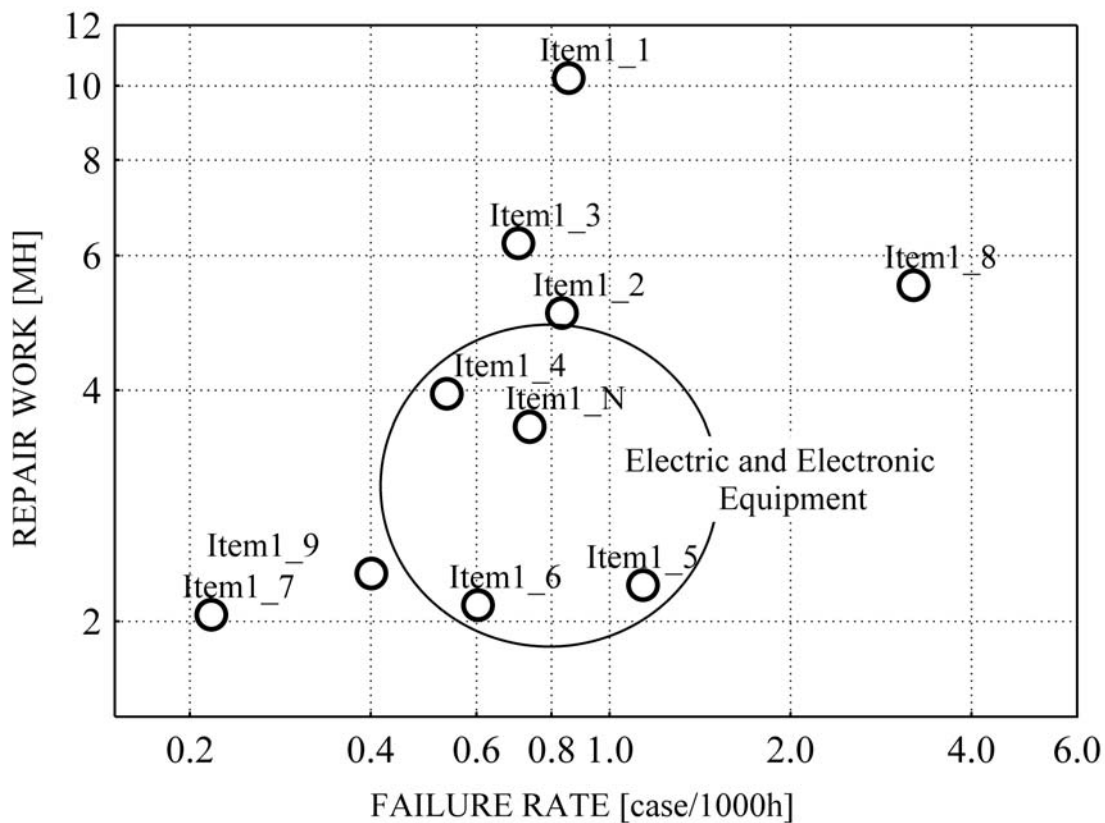


図 3.11 電気電子系機器故障の故障率と処置作業工数

船用機器信頼性解析における主な評価指標において電気電子系機器故障をとらえるならば、表 3.2 に示したように、例えばデータロガーやモニター、コンピュータに代表される自動化機器 I 系 (Item1="5") 故障は補機 I 系 ("8") 故障について高い故障発生割合 (14.0[%]) を持ち故障率も高い (1.135[case/1000h]) が、主機の停止や減速などによる直接的な航海への影響自体は小さい特徴がある。しかし、航海への影響を生ずるような重故障の発生割合は、主機系 ("1") 故障に次ぐものである。また、発電機や電動機によって代表される電気機器系故障 ("4") や各種機器の制御保護装置によって代表される自動化機器 II 系 ("6") 故障では、故障率や航海へ影響を与えるような重故障の発生 (有影響故障の割合) は比較的低い影響時間は自動化機器 I 系故障に対して比較的大きい傾向を示していることが明かである。

3.4.2 電気電子機器故障の検定評価と発生状況

船用電気電子機器故障固有の特性を明らかにすることを目的として、SRIC 機器分類に基づく電気電子系機器 (Item1="4", "5", "6", "N") 故障とその他の機器故障を2つの区分として対応させて、それぞれの特徴比較とその区分検定を目的とした評価を次式により実施し、その結果を表 3.9 に示した。

$$z = \frac{(x_A - x_B) - (\mu_A - \mu_B)}{\sqrt{\frac{\sigma_A^2}{n_A} + \frac{\sigma_B^2}{n_B}}}$$

- z : 区分判別値
 $x_A - x_B$: 観測平均値の差
 (A : 電気電子系機器故障、B : 非電気電子系機器故障)
 $\mu_A - \mu_B$: 母平均値の差 (=0)
 $\sigma_{A,B}$: 標準偏差
 $n_{A,B}$: データ数

ここで、それぞれの区分を代表する故障として発生数 200 件以上での層化により選択された電気電子系 26 機器とその他 48 機器によって代表される2つの故障区分を検定対象とし、平均故障率、故障修復のための平均投入人数、平均投入時間、平均工数、平均影響時間そして配員指数を検定指標として与えるものとした。なお表中の統計値においては、各故障の内包する発生特性を明らかにするために、過大な故障発生間隔に対しては不採用とする処理がとられているため偶発故障の影響が薄められ、強調された故障特性を示すものとなっている。これらの検定指標値それぞれについて、2区分別に平均値と標準偏差を計算して、上式により区分判別値を求めた結果が表 3.9 である。頻出故障の採用と特性の強調処理による影響はあるが、2区分の相対的な比較の前提としては等位なものである。

電気電子機器と非電気電子機器 (機械系機器) との対比において、それぞれの区分を説明する全ての評価値でその母平均が等しければ、この2区分 (電気電子系機器故障と機械系機器故障) は等質であり、ひとつの固有な特性を持つものと考えられるとして、これをゼロ仮説と設定した。従って、この仮説を否定することにより、電気電子系として区分され選択された機器 (Item1="4", "5", "6", "N") を対象とする故障解析が成立することの妥当性を評価するものである。

区分別観測平均値の差の分布は、それぞれの区分の観測値が独立で本来正規分布に従わないものであっても、中心極限定理によって観測数が大きければ、ほぼ正規分布に従うものである。従って、基準化された z の分布は、ここで設定したゼロ仮説 ($\mu_A - \mu_B = 0$: 2区分は等質でそれぞれの全ての母平均は等しい) のもとで基準正規分布: $N(0,1)$ の分布に従うものと考えられることから、仮説に基づく判別値: $|z_0|$ の値が持つ

確率を評価することによって、設定したゼロ仮説の可否を検定することが可能となる。

統計的に、平均が0で分散が1である基準正規分布： $N(0,1)$ において、 $|z_0| \geq 1.96$ となる確率は0.05であり、 $|z_0| \geq 2.576$ となる確率は0.01であること⁽²⁶⁾が明らかとなっている。従って表3.9に示された判別値： $|z_0|$ の計算値から、平均故障率のみに注目するならば、高い確率によって設定したゼロ仮説は肯定されてしまい、電気電子系機器故障が固有に持つ量的な意味における発生特性はないこと（母平均は等しい）になる。平均故障率の等質性を示唆するこの結果は、例えば表3.2に示されたように電気電子系機器より十分に小さい故障率を持つ主軸系故障（”7”）や、十分に大きい故障率を持つ補機系故障（”8”）の存在が明確であることから、直感的にも容易に理解できるものである。

故障修復のための平均投入人数、平均投入時間、平均工数、平均影響時間そして配員指数の判別値に注目するならば、ゼロ仮説は全て否定（危険率1%）され、電気電子系機器故障はその他の非電気電子系機器故障に対して固有の性質を持つものと判定される。換言するならば、表3.9に示したように検定指標として採用した各統計値の全てで、非電気電子系機器故障の平均値と標準偏差に対して小さな値を示していることから、比較において規模が小さいと同時に分散の小さなことが電気電子系機器故障の特徴として指摘できるものであり、また故障修復処置工数の判別値が大きな値を示

表 3.10 機械系及び電気電子系機器の統計値

Statistical Factor (機械区分別統計値)	Average (平均)	STD (標準偏差)	$ Z_0 $ (判別値)
Failure Rate [case/1000h]	Item1-1-3,7-9	0.761	0.40
	Item1-4,5,6,N	0.741	
Working Person [man]	Item1-1-3,7-9	1.91	4.83
	Item1-4,5,6,N	1.50	
Working Time [h]	Item1-1-3,7-9	1.91	4.66
	Item1-4,5,6,N	1.24	
Repair Work [man*h : MH]	Item1-1-3,7-9	6.21	5.21
	Item1-4,5,6,N	2.46	
Influence Time [min]	Item1-1-3,7-9	129.4	3.24
	Item1-4,5,6,N	53.4	
Manning Index [MH/ 1000h]	Item1-1-3,7-9	4.51	5.35
	Item1-4,5,6,N	1.74	

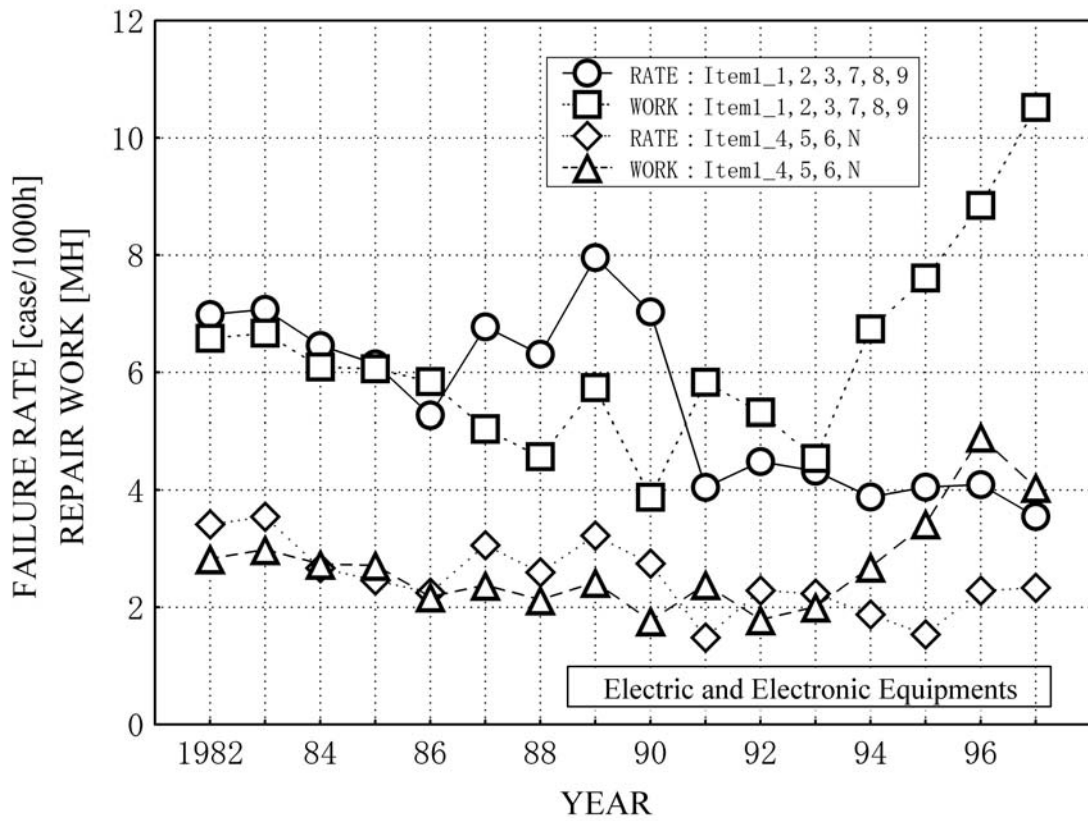


図 3.12 電気電子系及びその他の機器の故障率と修復処置工数の経年変動

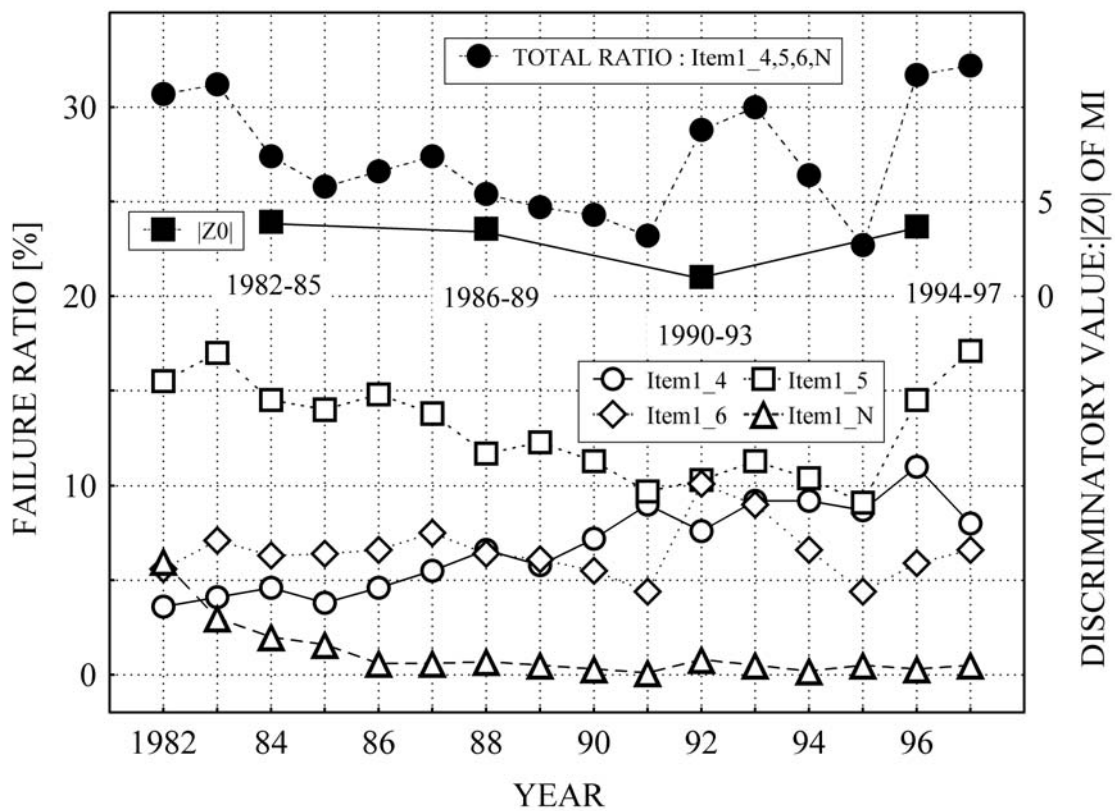


図 3.13 電気電子系機器故障の発生状況と区分判別値の経年変動

していることから、故障修復作業の状況において電気電子系機器故障の特徴が顕著であり、この結果が配員指数の判別値の結果にも反映している。一方、検定指標とした各統計値の平均値と標準偏差の大きさから機械系（非電気電子系）機器故障が、機器別に更に複数の故障パターンを持つことも推測されるものである。

区分判別値の結果に基づき電気電子系機器とその他の機器と区分して、故障率と修復処置作業工数の経年変動の状況を図 3.12 に示した。全体として、船用機械系機器の故障率は減少の傾向を示していることに比較して、電気電子系機器の故障率の経年変動傾向は若干の減少傾向はもつものの、ほぼ横這い状況と判断されるものである。すなわち、船舶全体としての船用機器高信頼度化の取り組みは着実な成果を上げた一方、電気電子系機器に限定するならば、全平均の故障率において明確な信頼性向上の結果は表れていない。この結果の要因としては、装備搭載機器の変化にあるものと考えられる。すなわち、自動化による少人数化実現とは電気電子系機器あるいは装置の高度利用を実施することであり、これらの装備点数が増加したことに起因して、故障率の推移傾向が生じたものと考えられる。なお、全期間における電気電子系機器・要素での平均故障率は 2.117[case/1000h]であり、従って平均故障間隔（MTBF）で表すならば約 472[h]である。

故障の発生状況を機器別の構成割合として、電気電子系機器に注目した結果を図 3.13 に示した。近年の発生割合において電気電子系機器（”4”，”5”，”6”，”N”）はそれぞれ微増、増加、横這い、そして横這いの傾向を示しており、年々これらの故障が持つ影響は増えていると考えられる。特に、電気機器系故障（”4”）では緩やかながらも増加傾向が継続的であり、いわば量としての直接的な影響においても電気機器系故障の増加を示すものである。

電気電子系機器故障全体での構成割合の合計には多少の変動はあるものの、全期間平均で約 28 [%]の多数で推移している。また、配員指数についての判別値： $|z_0|$ の経年変動を 4 年毎の平均として図中に示したが、電気電子系機器故障が明確な特性をもって発生し続けている状況が明らかである。質的な観点から評価するならば、従来型の電気機器から電子機器への移行結果を潜在的に内包しながらも電気電子系機器故障として発生した結果と考えられるものである。

3.4.3 電気電子系機器における頻出故障の評価

調査全期間中に50件以上の故障発生があった電気電子系機器・要素（Item 1レベル）に注目すると、電気機器系（Item1="4"）が8機器・要素、自動化機器Ⅰ系（"5"）が23機器・要素、自動化機器Ⅱ系（"6"）が20機器・要素、そして航海通信装置系（"N"）が4機器・要素の計55機器・要素により構成されている。この電気電子系55機器・要素を対象として、その発生状況を故障率と修復処置工数、配員指数によるマルチ・チャートとして図3.14.1に示した。特性値の計算は区分検定評価で用いられたものと同様である。また、区分評価で明らかとなった非電気電子系（機械系）48機器・要素を図3.14.2に示し、特に特異的に顕著な特性を示す機器に対しては機器コードと機器・要素名を付して示している。

図3.14.1に見られるように船用機器故障全体から定性的に評価するならば、電気電子系機器故障の特性は、故障率で分散が小さく、修復処置工数も小さいと指摘できるものであり、中でも特異的な機器故障として、[671：制御・保護装置]や[679：監視装置]などは、故障率は高いが処置工数は小さい性質を持っている。また、これらとは相反する性質を持つ故障として、[411：発電機]や[412：電動機]がある。図中、破線で示した範囲は表3.9で求められた電気電子系機器・要素の故障率と修復処置工数の統計値から、両軸に関して（平均±3・標準偏差）の領域を示したものであり、いわば両軸の値において典型的な電気電子系機器故障の特性を持つものと指摘できるものである。この領域とひとつの配員指数水準（8 [MH/1000Hr.]）を図3.14.1に設定して電

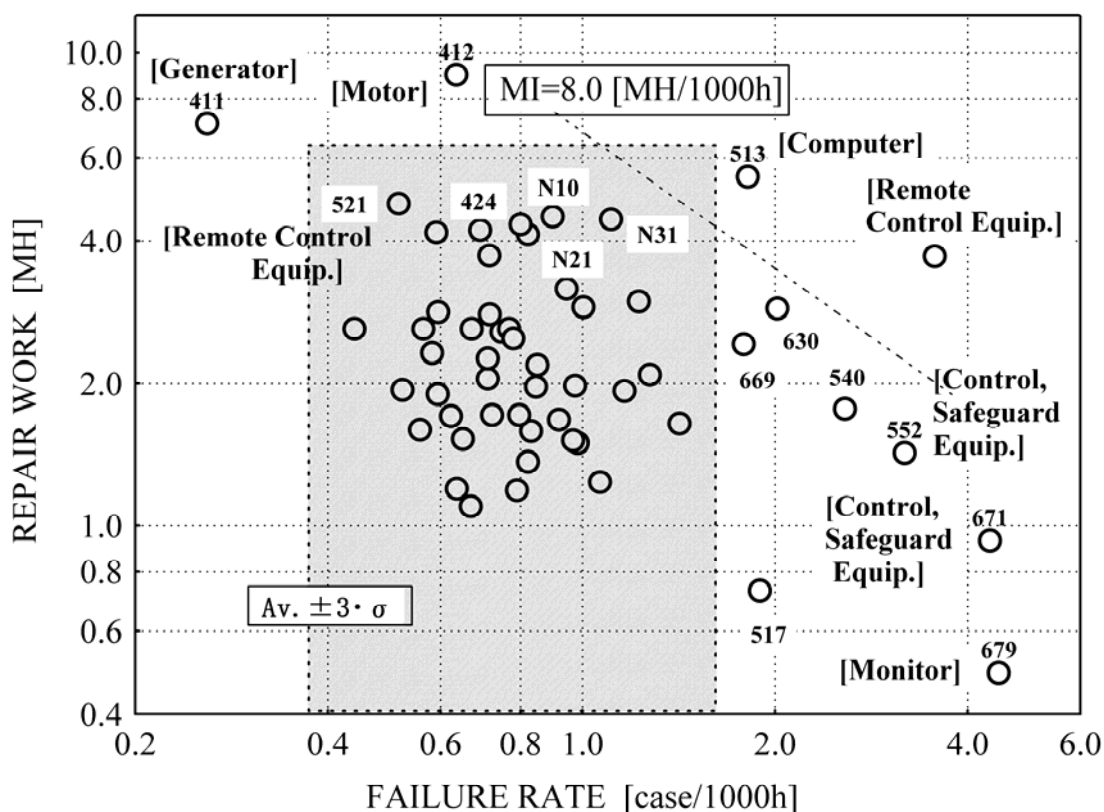


図 3.14.1 電気電子系機器故障の発生状況

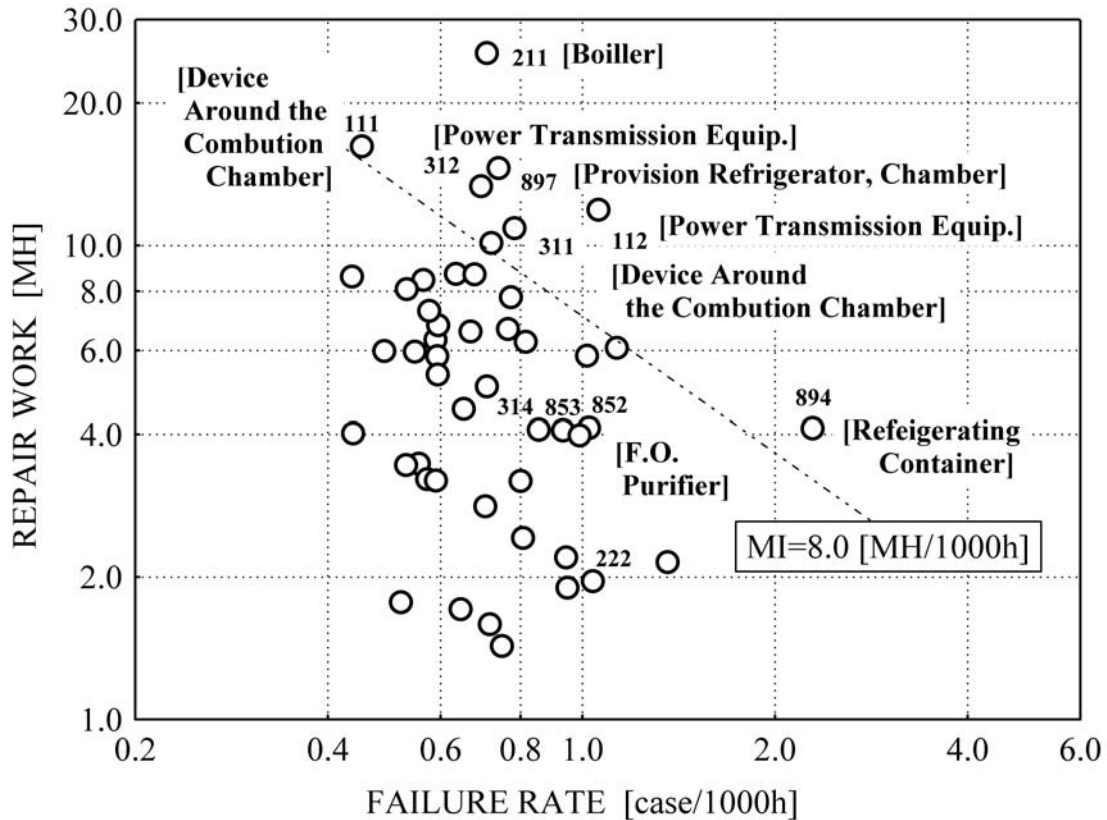


図 3.14.2 機械系機器故障の発生状況

気電子系機器故障の分類を試みるならば、以下のように4グループに整理される。

- (1) 故障率と修復処置工数において典型的な性状を持つ故障群 (第1グループ)
- (2) 特に配員指数において高い数値を示す故障群 (第2グループ)
- (3) 特に故障率において高い数値を示す故障群 (第3グループ)
- (4) 特に修復処置工数において大きな数値を示す故障群 (第4グループ)

第2グループを構成する故障機器は、図中右上に配置される[513: コンピュータ]と[541: 発電機遠隔操縦装置]であり、この2機器は共に高い故障率と大きな修復処置工数により大きな配員指数水準を示しているものであるが、全期間での故障発生総数は決して多くないものである。従って、近年において特に多発するようになった故障群と考えられるものである。一方、この配員指数水準に対応する非電気電子系(機械系)機器・要素故障を図 3.14.2 に見るならば、[211: ボイラ本体]や[897: 冷凍機及び糧食庫]、[112: ディーゼル主機動力伝達装置]などが顕著であり、いずれも修復処置工数の大きさに起因したものである。また、最頻出故障である[852: F.O.清浄機]はデータ群の中にあり、多数ではあるが、故障率において前述のコンピュータや遠隔操縦装置などを上回るものとはなっていない。すなわち、全期間を通じて多発することによって油清浄機故障は最頻出故障となっているが、高い配員指数を示す新たな電気電子系機器故障が近年多発していることが明らかである。このような状況は、近年社

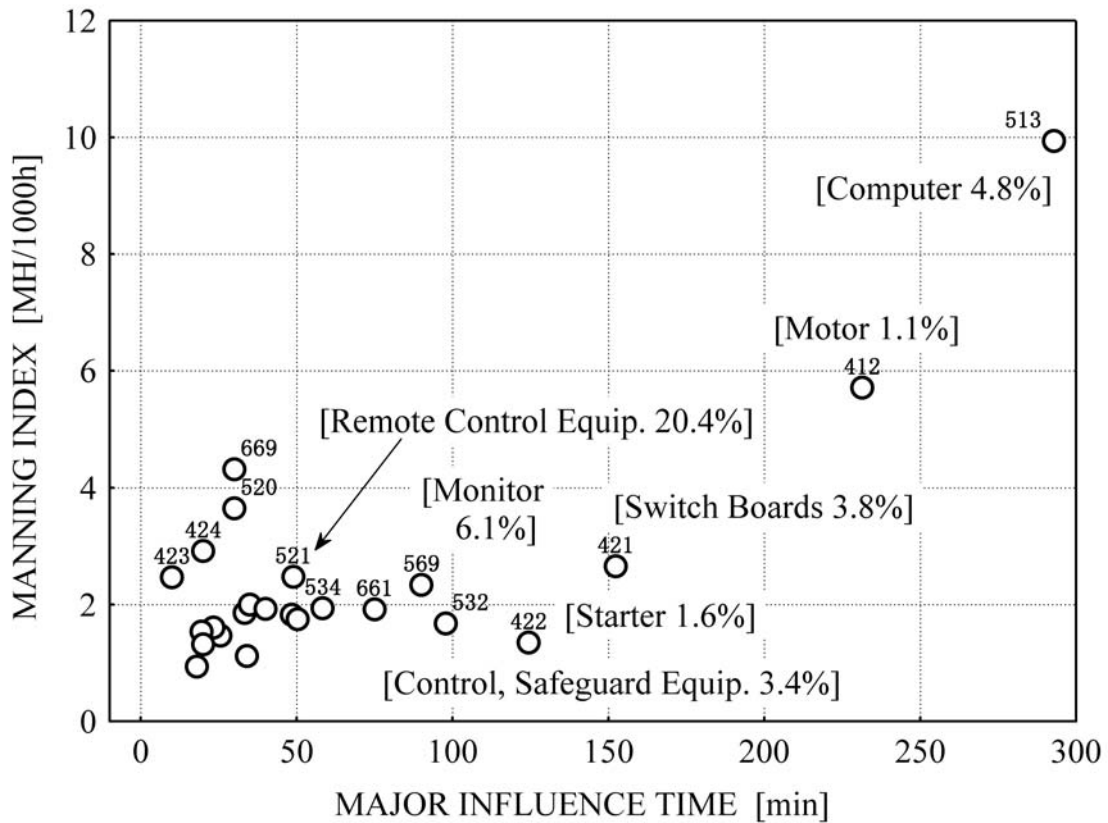


図 3.15 故障発生による航海への影響時間と配員指数

会全体において急速に進んだ電子化機器導入の流れが船舶に反映した結果と推測される。実際、船舶装備品へのマイクロプロセッサやコンピュータ搭載の傾向は著しいものであり、今後も更に加速的に進捗することは確実である。従って、これらの機器に対する更なる高信頼度化や保全作業計画立案の取り組みが早急に求められている。ここで重要な問題点は、現状の修復作業工数にある。すなわち、長い処置時間を要因として過大な作業工数が費やされている状況である。換言するならば、高い能力や経験により習熟された機械系故障に対する保全作業技術に比較して、電気電子系機器故障では未だ長い修復作業時間を必要としている点である。従って、電気電子系機器の特殊性を考慮するならば、言い尽くされたことではあるが対処方法としては故障診断の自動化の実現や機器要素のモジュール化の促進などが現実的な選択と考えられる。

図 3.15 には電気電子系機器故障発生によりもたらされる主機の停止や減速、あるいは遅延などによる航海への影響時間を配員指数と共に示した。前述のように故障発生による機能喪失を安全阻害の直接的な不安全要因とすれば、修復作業工数による人的時間的損失と共に航海への影響時間による時間的損失もまた間接的な不安全要因と位置付けられるものである。図中、特に航海への影響時間や配員指数が大きいものに関しては、機器名とその機器において影響時間の発生した重故障の発生割合を示している。この重故障率が最大のものは、[521：主機遠隔操縦装置]の約20[%]であり、故障による航海への影響時間の発生によって不安全状態を数多く生起する特徴を示している。また、高い配員指数を示した[513：コンピュータ]故障は約4[%]の重故障率を持つと同時に平均影響時間も大きく、機器の機能喪失が安全航行の継続に大きく影響

する状況が明らかとなっている。

3.4.4 多変量解析による電気電子系機器故障の評価

図 3.14.1 において推定された電気電子系機器故障に見られる 4 グループの存在を更に多変数によって評価し、内包する特性を明らかとすることを目的として、主因子分析による解析を実施した。説明変数として、故障発生数、船舶数、経過時間、平均処置人員、平均処置時間、平均処置工数、有影響故障発生率、平均影響時間、配員指数を採用し、頻出故障機器データを対象として解析を実施した結果を図 3.16 及び図 3.17 に示す。

一般に多変量多変数を対象とする解析手法としては、3 章 3.1 節に示したクラスタ一分析、重回帰分析、主成分分析、因子分析などが主たる手法である。ここで特に、主成分分析⁽²⁷⁾と因子分析^{(28),(29)}の概要を整理するならば、以下の通りである。

(1) 主成分分析 (Principal Component Analysis)

p 個の特性値 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_p$ の持つ情報を条件①と②を満足する m 個 ($m < p$) の総合特性値 $z_1, z_2, z_3, \dots, z_m$ に要約する手法。

$$\begin{aligned} z_1 &= l_{11}x_1 + l_{12}x_2 + \dots + l_{1p}x_p \\ z_2 &= l_{21}x_1 + l_{22}x_2 + \dots + l_{2p}x_p \\ &\dots\dots\dots \\ z_k &= l_{k1}x_1 + l_{k2}x_2 + \dots + l_{kp}x_p \\ &\dots\dots\dots \\ z_m &= l_{m1}x_1 + l_{m2}x_2 + \dots + l_{mp}x_p \end{aligned}$$

ただし、

$$\sum_{i=1}^p l_{ki}^2 = 1 \quad (k = 1, 2, \dots, m)$$

条件① z_k と $z_{k'} (k \neq k'; k, k' = 1, 2, \dots, m)$ の相関は全てゼロ。

条件② z_1 の分散は、 $(x_1, x_2, x_3, \dots, x_p)$ のあらゆる 1 次式の分散のうちで最大。また z_2 の分散は、 z_1 と無相関のあらゆる 1 次式の分散のうちで最大。以下、 z_m まで同様。

従って簡単に言うならば、主成分分析は変数の結合によって分散が最大にするような合成変数を決定するものであり、この合成変数を主成分と呼ぶ。

(2) 因子分析 (Factor Analysis)

以下の多因子モデルにおいて、問題①～④を求める手法。

モデルにおいて、 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_p$ は観測特性 p 個の変量、 f_1, f_2, \dots, f_m は m 個の共通因子、 $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_p$ は潜在因子。係数 $a_{ik} (i=1, 2, \dots, p; k=1, 2, \dots, m)$ は第 i 特性に対する

第 k 共通因子の因子負荷量。

$$\begin{aligned}x_1 &= a_{11}f_1 + a_{12}f_2 + \cdots + a_{1m}f_m + \varepsilon_1 \\x_2 &= a_{21}f_1 + a_{22}f_2 + \cdots + a_{2m}f_m + \varepsilon_2 \\&\dots\dots\dots \\x_p &= a_{p1}f_1 + a_{p2}f_2 + \cdots + a_{pm}f_m + \varepsilon_p\end{aligned}$$

- 問題① 共通因子数 m の決定
- 問題② 因子負荷量 a_{ik} の決定
- 問題③ 因子の解釈と軸の回転
- 問題④ 因子得点の推定

モデルは未知の変数が多く、問題を解く基準が一意的には定まらないため、様々な手法が提案されているが、因子分析をその目的から定義するならば、データを少数の因子によって説明する手法と指摘できるものである。

主成分分析と因子分析はアプローチにおいて異なる手法であるが、結果においては「主成分」と「因子」に類似性が表れることがある。特に因子分析は回転の不定性を持つため、回転によって高い類似性が見られる場合がある。また、因子モデル式を解く代表的な手法である主因子法（主因子分析）は、基本的に主成分分析と同様な手順を持つものである。

主因子分析は多変量解析の一手法として、データの縮約や構造の評価に適用されるものであるが、複数の説明変数を代表する因子の抽出によって、事象の評価を行うものである。ここで因子数の決定は、因子それぞれの分散である固有値の大きさを基準 (>1) に実行される。すなわち、図 3.16 中に示した固有値プロット (SCREE TEST) の結果より考察するならば、電気電子系機器故障を説明する 3 つの因子の存在が推測されるが、ここでは寄与率から第 1 及び第 2 因子の影響が大きく、この 2 つの因子が支配的である (累積寄与率: 66[%]) と考えられる。

図 3.16 は、3 つの因子負荷量 (因子と説明変数の相関) に対する説明変数の状況を 3 次元表示したものである。なお、バリマックス法による回転処理を施している。ここで、それぞれの因子負荷量から軸の意味付けを試みるならば、第 1 因子軸は修復処置工数や作業時間、作業人員との相関が高いことから、修復の困難さに基づく故障の規模を表すものであると考えられる。また、この因子は有影響故障発生率との相関も高くなっている。大規模な故障であれば副次的に航海への影響をもたらすことは定性的に考えられることではあるが、故障の規模自体が直ちに航海への影響発生に結びつくか否かは、故障発生機器に依存する問題と考えるべきである。しかし、ここで採用した電気電子系機器の場合、主機や重要補機に関わる監視装置や遠隔操縦装置、制御・保護装置を数多く含むことから、航海への影響を生じた事例が多いことに起因して相関が高く表れたものと考えられる。また第 2 因子軸は、第 1 軸の質に対して故障発生数や船舶数、経過時間など、量を表すものであることが明らかである。従って、この

2つの座標系により故障を質と量の側面から表現し、分類することが可能となっている。

求められた各説明変数の因子負荷量より、対象機器が持つ因子スコアを計算して機器別にプロットした結果を図 3.17 に示した。図 3.14.1 で考えられた4グループの分類は、この図における機器の分布において確認されるものであるが、第1グループと第3グループの混在や第2グループの再構成が特徴的に表れている。特に、第2グループは[513：コンピュータ]と[541：発電機遠隔操縦装置]に加えて、[N21：レーダ装置]や[N31：無線通信装置]、そして[424：自動負荷分担装置]などによって同一群を形成している点が注目されるものである。これらの故障は、修復処置作業時間が長い特徴を持つものであり、故障の大きさ・規模などを表す第1軸の特性に反応した結果と考えられる。従って、多変量を説明変数とすることによって再構成されたこの第2グループの分類が、顕在化された最新電気電子機器を対象とする故障群と考えられる。

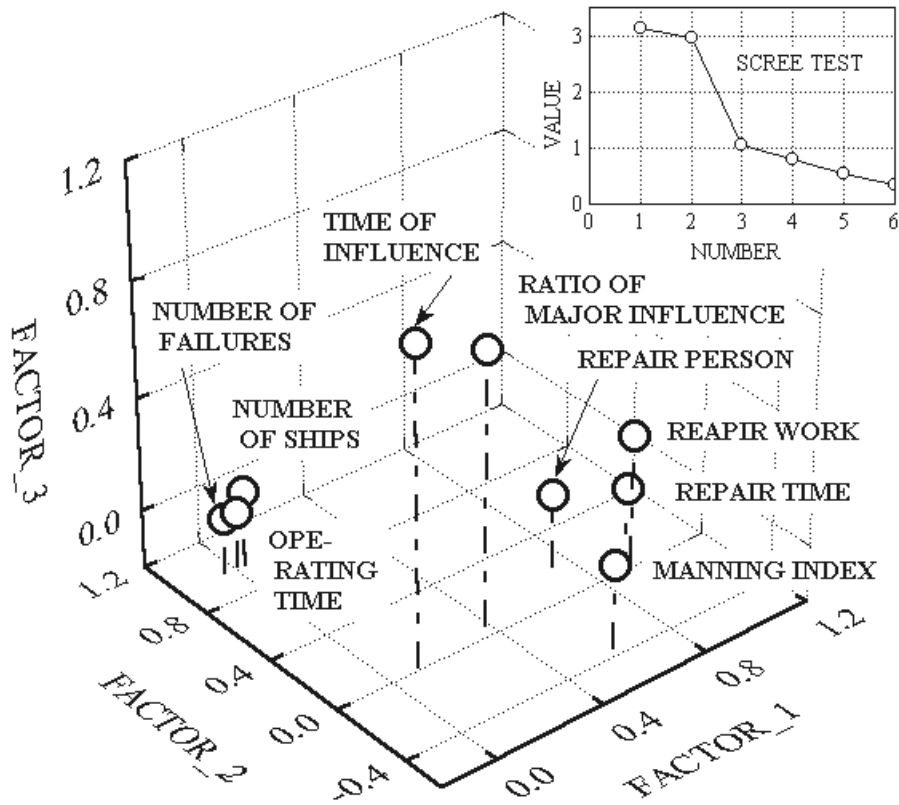


図 3.16 因子負荷量の 3 次元分布

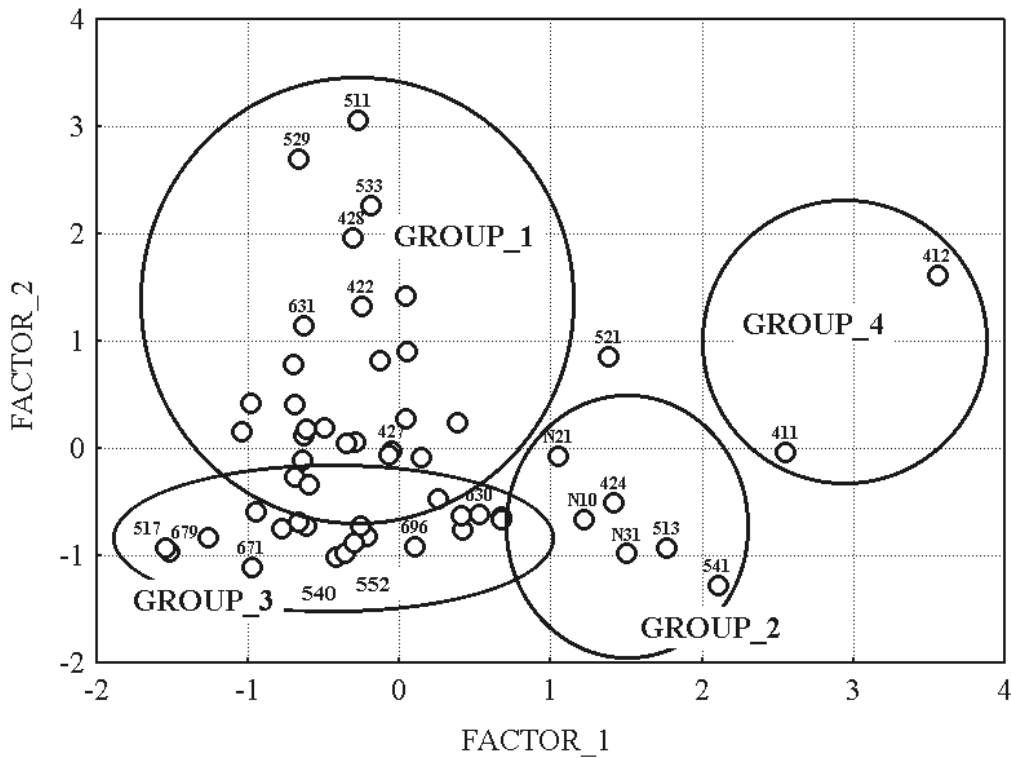


図 3.17 因子スコアの 2 次元分布

3.4.5 電気電子系機器故障の原因

故障の現象（亀裂～接地：12故障）と推定原因（振動～電気：8原因）及び推定理由（設計～燃料油：8理由）をクロス表によって、全機器・要素（Item 3レベル）について電気電子系機器故障と非電気電子系（機械系）機器故障別に表 3.10～13 に示した。表中の上段が故障件数であり、下段が割合（1%以上）であるが、「その他あるいは不明」の項は削除して整理したものである。人間による作業が介在する調査の必然として、この場合にも「その他あるいは不明」データは多数であり、電気電子系機器故障全体では現象の 41.2 [%]、原因の 44.4 [%]となっている。表は、これらのデータを除いてクロス該当のあるものを示したものである。また同時に、それぞれのクロス表に対するコレスポネンス解析結果を図 3.18～21 に示した。

機器区分による特徴が特に明らかな点として、電気電子系機器故障では振動を原因として発生した断線・接地故障が 6.2 [%]、一方非電気電子系機器故障では汚損を原因として発生した汚損・固着・閉塞故障が 9.9 [%]であることが認められる。当然の事ながら、電気電子系機器故障において断線・接地故障は多数を占めるものであり、原因別の累計では 16.9 [%]の多数となっている。

例えば断線・接地故障の場合、図 3.17 で第 1 グループに属している[427:電線故障]などに比較的数量多くの発生が見られと同時に、処置工数や航海への影響によって船舶にもたらす人的時間的損失を発生しており、これらを一次現象として更に大きな故障や火災などへの進展も予想されることから軽視できないものである。

電気電子系機器において振動を原因とする故障の発生は、部品点数が多い機器特性による理由から今後も常に発生し続けるものと考えられる。断線・接地故障に加えて弛緩を考慮するならば、振動による影響対策に関する取り組みが更に必要なことは明らかである。従って、現状の機器本体に対する防震対策に加えて機器内部の固定具などにも配慮した機器設計が必要と考えられる。また、劣化・汚損を原因とする故障への対処としては通常保全作業において不具合状況の見落としを防止することが重要であり、作業計画の立案や使用履歴の管理などによって劣化・汚損状況を常時把握できるような保全実施体制の確立が必要である。

故障発生原因で振動や汚損が多数であることは、橋本の指摘⁽³⁰⁾にあるように小型軽量要素であることを考慮した対策が、現在もなお重要な課題であることを示している。特に、「舶用電気機器は船舶の中核的な機能を果たす」ことによる影響は、例えば遠隔操縦装置故障などに見られるように機械系設備・装置が稼働可能であっても、ひとつの電子機器要素の機能喪失により船舶の航行自体に大きな影響を与えることから明かである。

表 3.11 故障の現象と原因 (電気電子系全機器故障対象)

Cause State	Vibration (振動等)	Fatigue (疲労等)	Corrosion (腐食等)	Deterioration (劣化等)	Heating (発熱等)	Dirt (汚損等)	Wear (衰耗等)	Electrical Cause (電氣的)
Crack (亀裂等)	180/	174/	77/	183/	8/	8/	37/	5/
Modification (変形等)	24/	28/	5/	75/	6/	11/	22/	4/
Slack (弛緩等)	412/1.9	22/	8/	13/	2/	21/	15/	13/
Wear (摩耗等)	88/	67/	17/	132/	6/	12/	209/1.0	10/
Corrosion (腐食等)	—	1/	24/	6/	—	7/	—	—
Leak (漏洩等)	30/	15/	81/	179/	4/	101/	70/	7/
Dirt (汚損等)	7/	1/	2/	33/	3/	558/2.6	11/	3/
Adherence (固着等)	21/	20/	14/	130/	35/	659/3.1	58/	17/
Blockade (閉塞等)	6/	—	2/	5/	—	465/2.2	1/	—
Fire (焼損等)	36/	21/	4/	122/	140/	86/	24/	95/
Disconnection (断線等)	1338/6.2	92/	14/	614/2.9	69/	500/2.3	112/	232/1.1
Grounding (接地等)	183/	13/	33/	301/1.4	48/	529/2.5	52/	949/4.4

※ Failure [case] / Failure Ratio [%]

表 3.12 故障の現象と推定理由（電気電子系全機器故障対象）

Reason State	Design (設計等)	Material (材質等)	Attachment (取付等)	Machining (工作等)	Handling (取扱等)	Setting (設定等)	Aging (経年等)	F.O. (燃料油)
Crack (亀裂等)	45/	160/	103/	46/	31/	3/	450/1.8	6/
Modification (変形等)	10/	31/	26/	9/	9/	3/	138/	—
Slack (弛緩等)	38/	13/	265/1.1	25/	10/	13/	175/	—
Wear (摩耗等)	26/	65/	26/	8/	4/	1/	460/1.9	3/
Corrosion (腐食等)	—	10/	3/	—	1/	—	30/	—
Leak (漏洩等)	23/	67/	45/	49/	10/	9/	411/1.7	11/
Dirt (汚損等)	22/	7/	16/	—	55/	5/	300/1.2	134/
Adherence (固着等)	66/	41/	49/	29/	40/	24/	660/2.7	88/
Blockade (閉塞等)	26/	12/	12/	3/	43/	10/	229/	125/
Fire (焼損等)	35/	43/	61/	15/	30/	3/	364/1.5	3/
Disconnection (断線等)	333/1.4	304/1.2	511/2.1	182/	48/	24/	1778/7.3	7/
Grounding (接地等)	158/	150/	473/1.9	166/	164/	15/	1091/4.5	6/

※ Failure [case] / Failure Ratio [%]

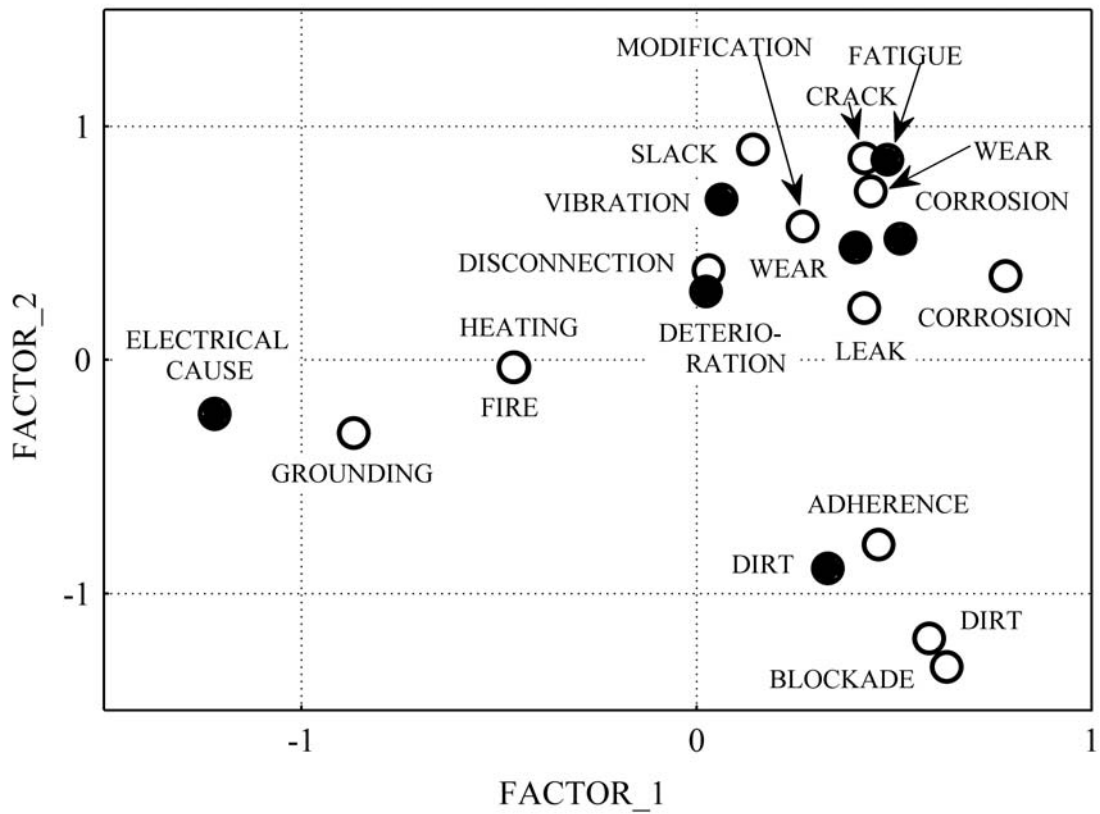


図 3.18 電気電子系機器故障の現象と原因のコレスポンド解析結果

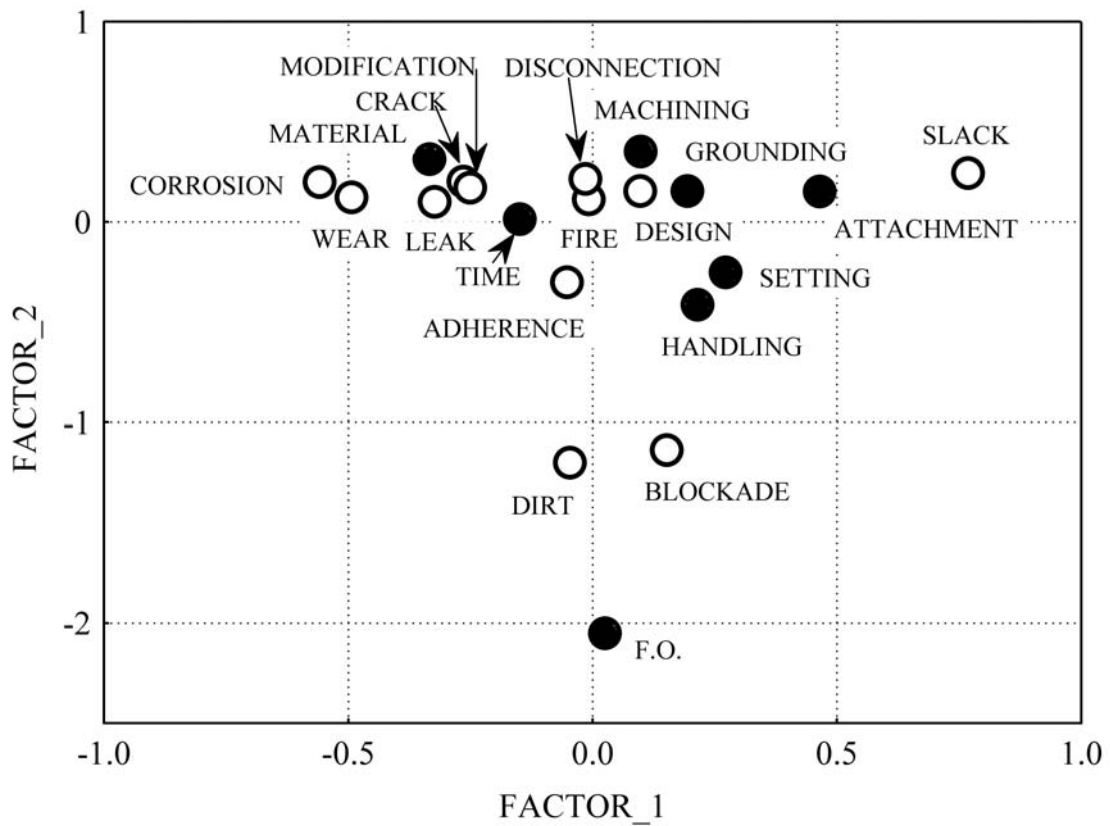


図 3.19 電気電子系機器故障の現象と推定理由のコレスポンド解析結果

表 3.13 故障の現象と原因（機械系全機器故障対象）

Cause State	Vibration (振動等)	Fatigue (疲労等)	Corrosion (腐食等)	Deterioration (劣化等)	Heating (発熱等)	Dirt (汚損等)	Wear (消耗等)	Electrical Cause (電氣的)
Crack (亀裂等)	1209/2.2	1533/2.7	3188/5.7	1088/1.9	114/	64/	648/	4/
Modification (変形等)	91/	120/	83/	264/	56/	70/	112/	5/
Slack (弛緩等)	852/1.5	83/	98/	125/	20/	19/	131/	4/
Wear (摩耗等)	224/	180/	379/	542/1.0	42/	105/	1216/2.2	1/
Corrosion (腐食等)	3/	4/	450/	47/	8/	22/	37/	-
Leak (漏洩等)	398/	198/	2179/3.9	1701/3.0	46/	1486/2.7	883/1.6	2/
Dirt (汚損等)	6/	1/	8/	90/	40/	2220/4.0	58/	1/
Adherence (固着等)	40/	25/	135/	325/	107/	2869/5.1	122/	18/
Blockade (閉塞等)	35/	1/	45/	50/	43/	5542/9.9	20/	2/
Fire (焼損等)	26/	33/	22/	90/	162/	111/	41/	32/
Disconnection (断線等)	187/	19/	5/	112/	17/	148/	28/	82/
Grounding (接地等)	29/	2/	14/	62/	16/	120/	18/	175/

※ Failure [case] / Failure Ratio [%]

表 3.14 故障の現象と推定理由（機械系全機器故障対象）

Reason State	Design (設計等)	Material (材質等)	Attachment (取付等)	Machining (工作等)	Handling (取扱等)	Setting (設定等)	Aging (経年等)	F.O. (燃料油)
Crack (亀裂等)	612/	1858/2.8	843/1.3	670/1.0	178/	19/	5372/8.2	220/
Modification (変形等)	97/	179/	167/	80/	65/	3/	511/	50/
Slack (弛緩等)	107/	86/	658/1.0	84/	135/	17/	503/	17/
Wear (摩耗等)	99/	339/	146/	46/	87/	10/	2312/3.5	174/
Corrosion (腐食等)	15/	134/	13/	9/	11/	6/	463/	24/
Leak (漏洩等)	269/	960/1.5	773/1.2	333/	358/	61/	5296/8.1	721/1.1
Dirt (汚損等)	121/	25/	31/	31/	201/	28/	1026/1.6	927/1.4
Adherence (固着等)	214/	146/	104/	85/	194/	36/	2218/3.4	980/1.5
Blockade (閉塞等)	299/	50/	76/	98/	563/	35/	1642/2.5	2485/3.8
Fire (焼損等)	51/	72/	58/	22/	59/	10/	304/	54/
Disconnection (断線等)	49/	37/	108	24/	28/	16/	375/	13/
Grounding (接地等)	38/	20/	75/	19/	40/	8/	237/	14/

※ Failure [case] / Failure Ratio [%]

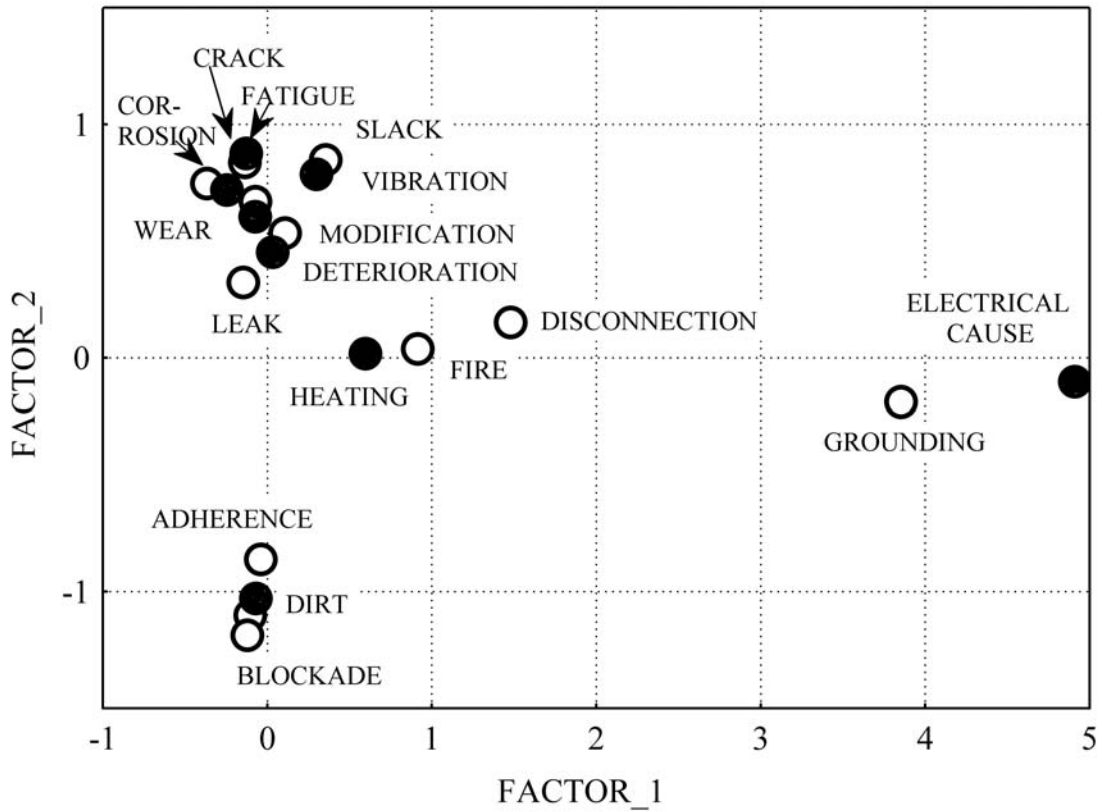


図 3.20 機械系機器故障の現象と原因のコレスポンドンス解析結果

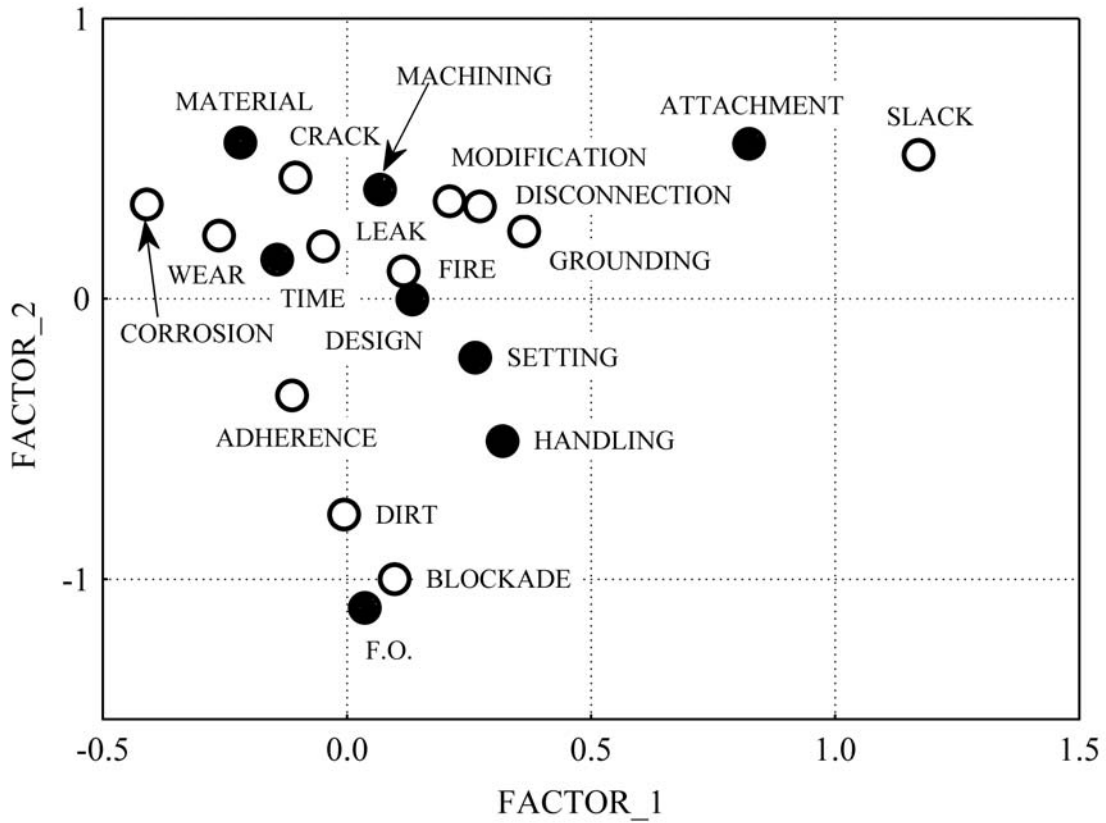


図 3.21 機械系機器故障の現象と推定理由のコレスポンドンス解析結果

3.5 主機系機器故障の特性と評価

3.5.1 ディーゼル及びタービン主機系機器における故障発生状況

表 3.2 に示したように主機系機器故障は発生故障全体の約 9 [%] の発生割合を持つものであり、処置工数と航海への影響時間が大きい特徴を示すものである。船舶信頼性調査において主機系機器は、Item2 レベルの機械・装置分類においてディーゼル・エンジンとタービン・エンジンに区分されるが、主機システムとして比較するために、ここでは（ディーゼル）故障と（タービン+主ボイラ）故障の組み合わせとして捉えて比較するものとした。ここで、1980 年代と 1990 年代別に主機別の故障率と修復処置作業工数の推移状況を図 3.22 に、また配員指数と運航への影響時間の推移状況を図 3.23 に示した。主機ディーゼル本体故障において、故障率については減少の推移を実現しながらも修復処置作業工数は微増の傾向であり、故障発生率は減少しながらも修復作業工数の増大による重故障化、また運航への影響時間の増加による不安全状態の重大化が見られる。主ボイラに関しては、故障率に大きな変動はないが修復処置作業工数に著しい減少があり、配員指数の改善に寄与するものとなっている。また、主機タービンも故障率において減少傾向を示し、処置工数で増加傾向を示している。

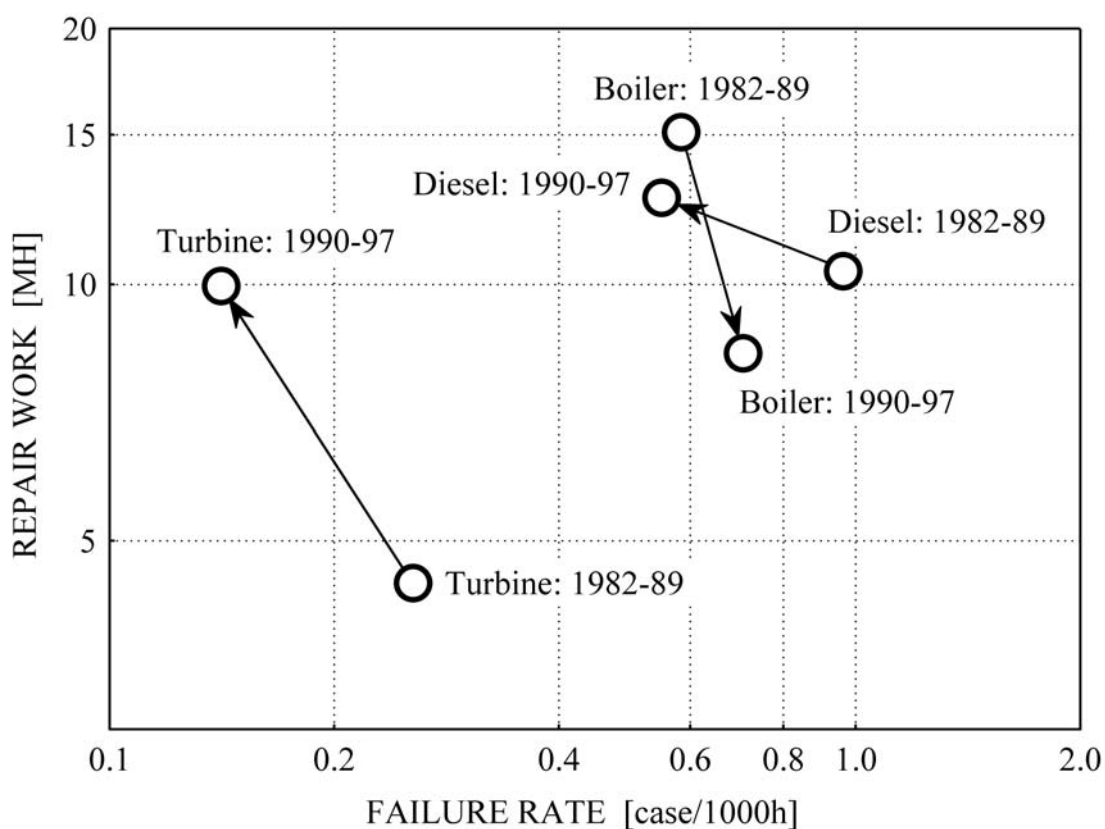


図 3.22 主機種類別の故障発生状況及び年代変化

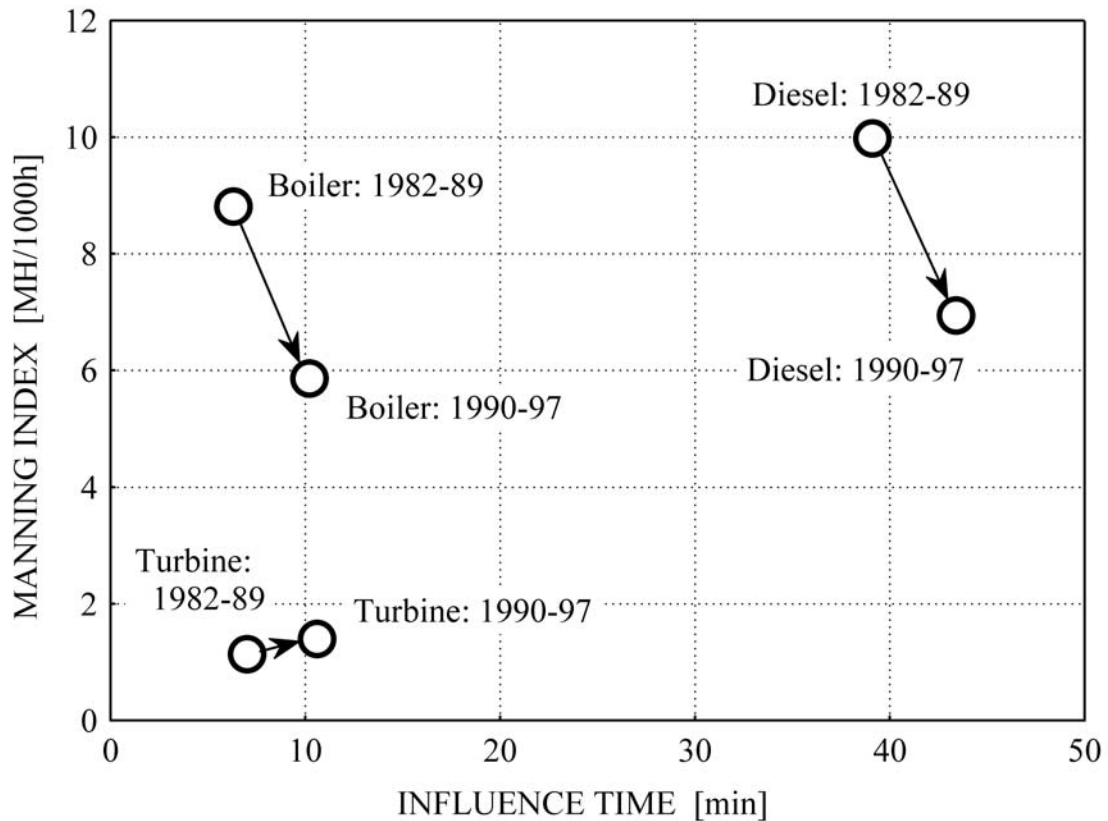


図 3.23 主機種類別の航海への影響時間と配員指数の状況及び年代変化

3.5.2 ディーゼル主機システム機器の信頼性

サービス・タンクを除き、燃料の流れに注目して選択した主機システムを代表する関連機器について、故障発生状況を図 3.24 に示した。また、これらの機器故障の特性と関連を明らかにするために、最近隣法によるツリークラスタリングを実行した結果を図 3.25 に示す。

採用した説明変数を以下に示す。

- ① 各機器の故障数、
- ② 船舶数、
- ③ 経過時間、
- ④ 平均処置人員、
- ⑤ 平均処置時間、
- ⑥ 平均処置工数、
- ⑦ 運航への平均影響時間、
- ⑧ 航海時間に対する延べ影響時間の割合、
- ⑨ 配員指数

クラスター分析は 3 章 3.1 節で述べたように多変量解析における分類手法のひとつ

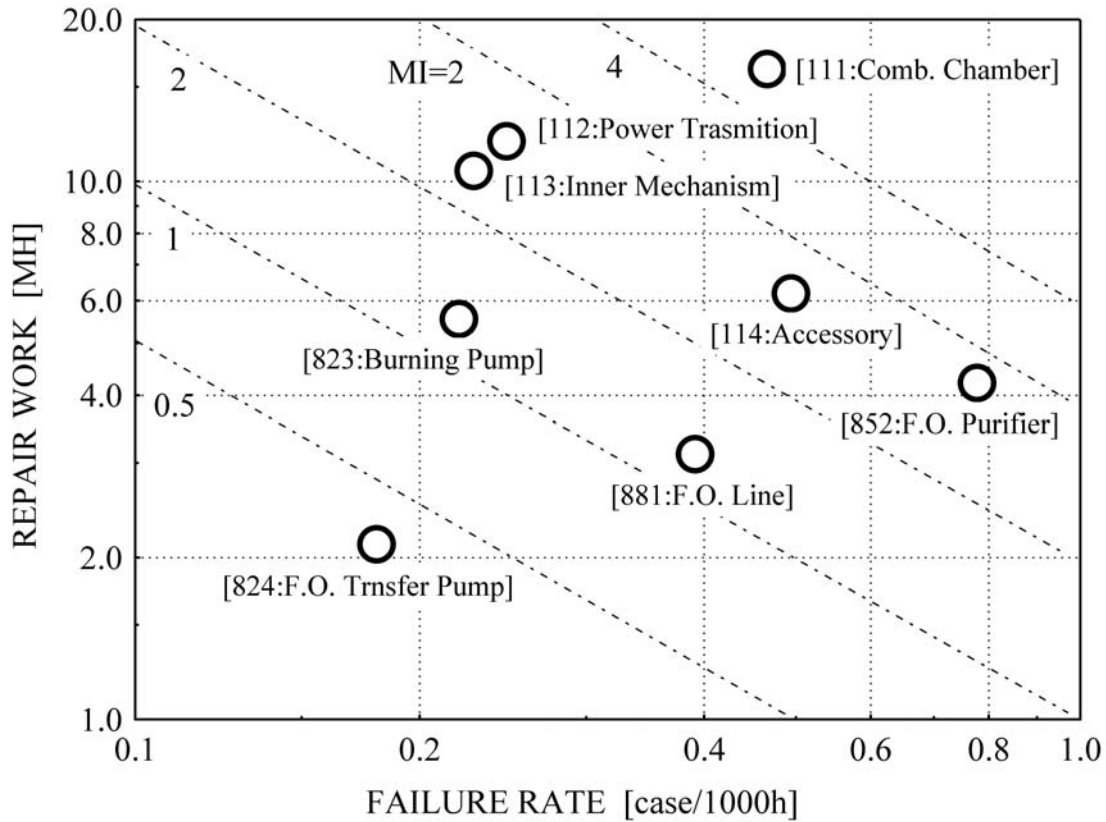


図 3.24 主機システム構成機器・要素の故障発生状況

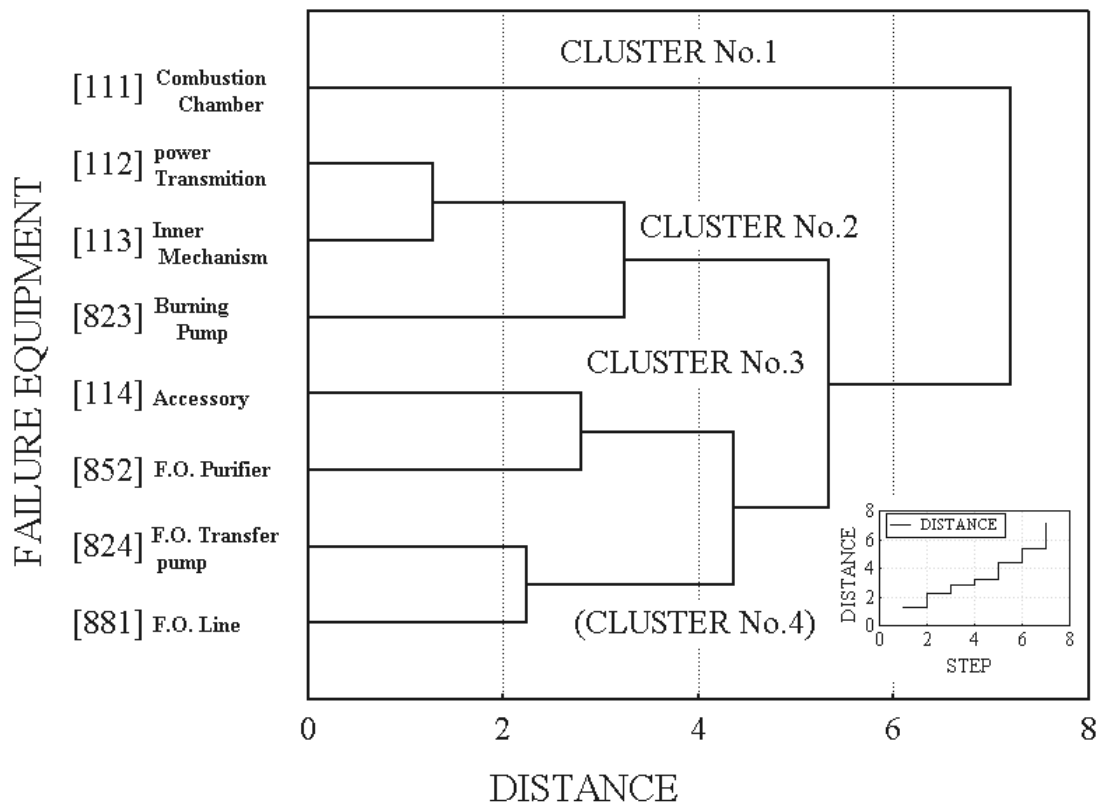


図 3.25 主機システム構成機器・要素故障のクラスタリング結果

であり、情報として多数の変数によって説明されている対象物や事例などに対して、前述したように「似たもの集め」を一定のアルゴリズムによって実施するものである。このアルゴリズムが働く手がかりとなるものは類似度と距離であり、説明変数の数に基づく多次元空間におけるデータ個々の分布状況から類似性の高いものを集めて、ひとつのクラスターを想定することにより情報の要約と構造を明らかにするで、全体の解釈を行うものである。図 3.25 にはクラスター形成過程における結合距離を示した結合距離プロット図を示したが、形成クラスターの判断はこの結合状況を一助として実施されるものである。

これまでに整理されたように、船用機器の故障特性は主機系機器故障に代表される処置工数や運航への影響が大きい故障と、補機系機器故障に代表される故障率は高いが比較的処置工数や運航への影響が小さい故障に大別される。この特徴に従って、クラスター分析においても3つのクラスターの形成が認められる。そして、それぞれの故障特性を顕著に示すものとして、主機系機器と補機 I 系機器故障を代表する形で [112：動力伝達装置] 故障や [852：補機 I 系 FO 清浄機] 故障が強く影響していることが明らかである。特に [111：燃焼室廻り機器] 故障は、故障率と修復処置作業工数の両面において大きな影響を与えるものであり、図 3.24 中に示した配員指数レベルにおいても特徴的に高いものとなっていることから、1つの独立したクラスターとなっている。これらの機器により構成される主機システムは、全体として故障率の高い要素と処置工数の大きな要素の両面を同時に持つことから、船舶の安全な運航の実現を大きく阻害するものであることは言うまでもないが、効率的な安全性確保の観点より評価するならば、配員指数の高い機器を対象とした信頼性向上の取り組みが優先されるものと考えられるものである。

3.5.3 ディーゼル主機における機器・要素故障

Item4 レベル(機器・要素)分類機器における故障発生状況を把握するために、故障発生機器別とその構成割合を主機系ディーゼル・エンジンの燃焼室廻り機器と補機 I 系、燃料油清浄機および潤滑油清浄機について、表 3.14 に示した。燃焼室廻り機器故障においては、発生割合の約 24%を占める排気弁故障を筆頭として各種弁故障が多数を占めているが、ジャケットやライナ、ピストンなど開放作業を伴う重量物作業も数多く発生している状況が明かである。

表 3.15 燃焼室廻り機器における要素故障の発生状況

Item Code (Level 1/2/3)	Item Code (Level 4)	Ratio [%]
Code [111*] Main Engine / Diesel Engine / Device around The Combustion Chamber	1 : Jacket, Liner	10.4
	2 : Piston	10.0
	3 : Cylinder	11.8
	4 : F.O. Valve	14.5
	5 : Safety Valve	4.1
	6 : Starting Valve	3.7
	7 : Exhaust Valve	24.4
	8 : Indicator Valve	11.8
	9 : Packing, Ring	1.6
	0 : Others	8.3

3.6 推進動力システムにおける冗長系の評価

3.6.1 主機システム冗長系の概念

ディーゼル主機システムを冗長系の観点から捉えるならば、主機搭載台数及び気筒数の問題と考えられる。ここで基本的な主機システムを想定するならば、1台の主機がひとつの推進装置を駆動する1機1軸の構成であるが、その他にも2機1軸や2機2軸などの多機多軸によるシステム構成がある。例えば、2機1軸の主機システムでは設置台数により冗長系が構築されているものと考えられるものであり、2機2軸などでは片舷機運転⁽³¹⁾が冗長系の機能を実現したのものと考えられる。

主機システムは、機関設計段階において要求される出力に対して、シリンダー寸法及び数を決定する手順⁽³²⁾をとるものであり、この要求出力は当然航海速度を実現するためのものである。従って、多軸主機システム自体は待機系のない並列冗長系と考えることもできるが、本来の並列冗長系が有する「全てのブロックは同等であり、いずれか1つが機能を維持していれば、システム全体も機能を維持することができる」⁽³³⁾機能、換言するならば100%の機能冗長度を保証したものではない。しかし、例えば片舷機運転であれ、自力航行を実現し目的港へ確実に到達する機能を持つことを評価するならば、船用主機システムは、減速航行を保証した冗長度を持つシステムと考えることができるものである。また、多機1軸システムも主機システムについては多機多軸システムと同様に減速航行を保証した冗長度を持つものと考えられることができるが、軸系までも考慮するならば、1軸であるが故に軸系の機能喪失は直ちに推進機能全体の機能喪失を意味するものであり、致命的な軸系故障発生に対して対象船舶は漂流状況となる可能性を示すものである。

海上航行中において、いわば孤立無援とならざるを得ない船舶の場合、最も致命的な状況は自力航行の望みが絶たれる局面であることから、デッドスローの微速航行であっても推進力の得られることは重要な救いとなるものである。従って、例えば緊急非常時に軸発電機を軸電動機として作動させて推進力を得るシステム⁽³⁴⁾なども考えられており、このようなシステムに関しては主機システムにおけるひとつの待機冗長系と位置付けられるものである。

主機システムにおける冗長系の概念を拡張するならば、多気筒による構成自体もひとつの冗長系としてとらえることができる。すなわち、シリンダーのひとつにでもダウンが発生した場合には主機システムを停止させて、その修復作業に取りかかることは重要であるが、機関の多気筒化が要求出力に対しての機能分担である側面から考えるならば、主機の気筒数は出力減少を前提とした m/n 冗長系と考えられるものである。すなわち、動作不良の段階においても他のシリンダーの動作によって、制限された出力ではあるが主機全体の動作を維持できるからである。

3.6.2 主機故障の発生状況とシステム冗長度の評価

SRIC データによって得られた解析対象のディーゼル主機を製造年月と総気筒数別に図 3.26 に示す。同時に図中に主機の型式・搭載台数・気筒数情報を示した。延べ 195 隻の船舶の主機システム（定格出力 10000[PS]以上）を解析対象としており、2 / 4 サイクルの別では、2 サイクル船 168 隻と 4 サイクル船 27 隻から構成されてい

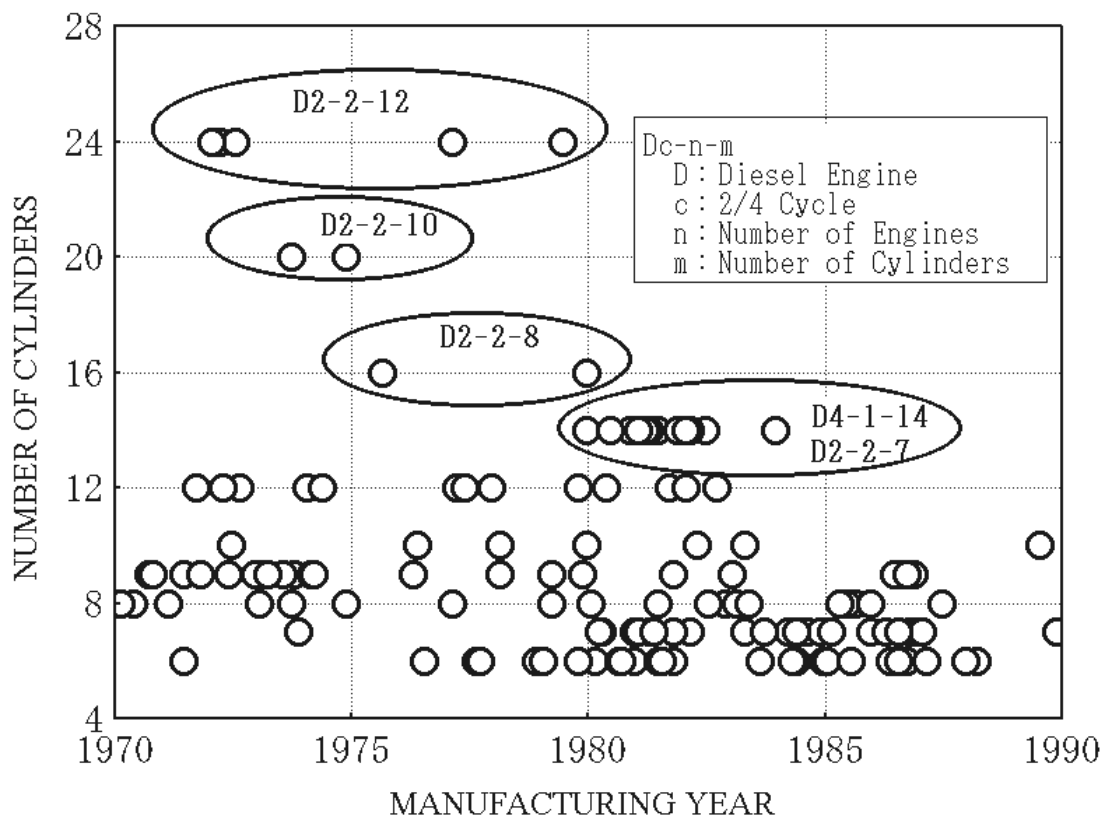


図 3.26 対象船の主機製造時期と総気筒数

表 3.16 型式別ディーゼル主機故障の発生状況

Number of Main Engine	Number of Cylinders	2 / 4 Cycle	Ship [Vessel]	Failure [case]	Failure Rate [case/1000h]	Repair Work [MH]	Manning Index [MH/1000h]
1	6	2	44	911	0.750	9.00	6.75
1	7	2	48	716	0.570	9.10	5.19
1	8	2	22	768	1.151	9.94	11.44
1	9	2	30	862	0.832	7.59	6.31
1	10	2	7	161	0.860	12.84	11.05
1	12	2	5	210	1.347	9.32	12.56
1	12	4	11	293	0.861	4.01	10.88
1	14	4	16	467	0.769	3.64	17.28
2	7	2	3	258	1.586	12.01	19.04
2	8	2	2	92	0.875	17.78	15.55
2	10	2	2	120	0.918	8.87	8.14
2	12	2	5	498	2.211	6.73	14.89

る。また設置台数と気筒数の組み合わせでは、6気筒1台から12気筒2台までのものである。主機2台搭載船は195隻中12隻であり、従って1機1軸のシステムが多数となっている。また、選択された2サイクル主機システムの平均回転数は約110[RPM]、気筒当たりの平均定格出力は約3400[PS]である。

解析対象とした故障は、ディーゼル主機における故障であり、主機廻りの31機器・要素に発生した故障である。使用した故障情報の発生状況を表3.16に示した。解析に使用した主機故障の総数は5356件であり、調査期間は1982年から1997年である。

表3.16に基づき、故障率と修復作業のための処置工数によって整理したものを図3.27に示した。それぞれのプロットは主機システム全体として捉えたものであり、単純に言うならば、同気筒数で機関台数が倍であれば機器要素の点数が倍となったシステムで1セットである。従って、総気筒数の最も多い12気筒機関2台設置(D2-2-12)の主機システムにおいて故障率は大きく、少気筒機関1台システム(D1-1-6、D1-1-7)などが小さい傾向を持つことが明らかであるが、前述のように航行を実現するという目的において機関2台設置の主機システムの方が信頼性的には「強い」システムと考えられるものである。しかし、このような装備の増加はコストや全体としての保全作業の増加をもたらすものであり、信頼度の確保とはトレードオフの関係によって成立しているものである。

並列冗長系のシステムにおいて、システム全体の不信頼度(Fs)は冗長要素それぞれの不信頼度の積であり、従って信頼度(Rs)は以下の通りである。

$$F_s = F_1 \cdot F_2 \cdot F_3 \cdots F_n$$

$$R_s = 1 - (1 - R_1) \cdot (1 - R_2) \cdot (1 - R_3) \cdots (1 - R_n)$$

しかし、主機システムの決定は要求出力や設置スペースの条件が第一義的であるため、同一気筒数機関1台と2台設置のシステムに関して単純に同列に取り扱い、並列冗長度の増加として考えることは困難である。すなわち、例えば気筒当たりの平均出力やボア・ストローク比、回転数などに差異があるためであるが、平均化された2サイクル主機システムにおける機関台数の増加を冗長化のひとつと捉えるものとして、機関1台から2台設置への倍加の影響を評価するために、7・8・10・12気筒2サイクル機関1台と2台の場合の平均値プロット(D2-1-G及びD2-2-G)を図3.27に示した。この平均値においても、機関台数の増加が機器要素の増加であることを反映して、故障率は増加の傾向を示しているが、設置台数の倍加に従ったものではない。すなわち故障率比で1.42である結果は、機関2台から成る主機システムが1台のシステムと比較して信頼性的に「強い」システムであることを示したものである。

故障の特性値として配員指数は、故障率と修復処置工数の値それぞれの積によって得られるものであり、発生故障を質と量の意味において評価する重要な指標値となるものである。この配員指数に関して、7・8・12気筒2サイクル機関2台の主機システムの平均値を求めて2点鎖線により図3.27に示した。信頼度とのトレードオフにより、主機関の型式や気筒数は合理的な計算手順によって決定されていることを前提とするならば、ここで得られた配員指数水準(MI=16.49 [MH/1000h])は最良値では

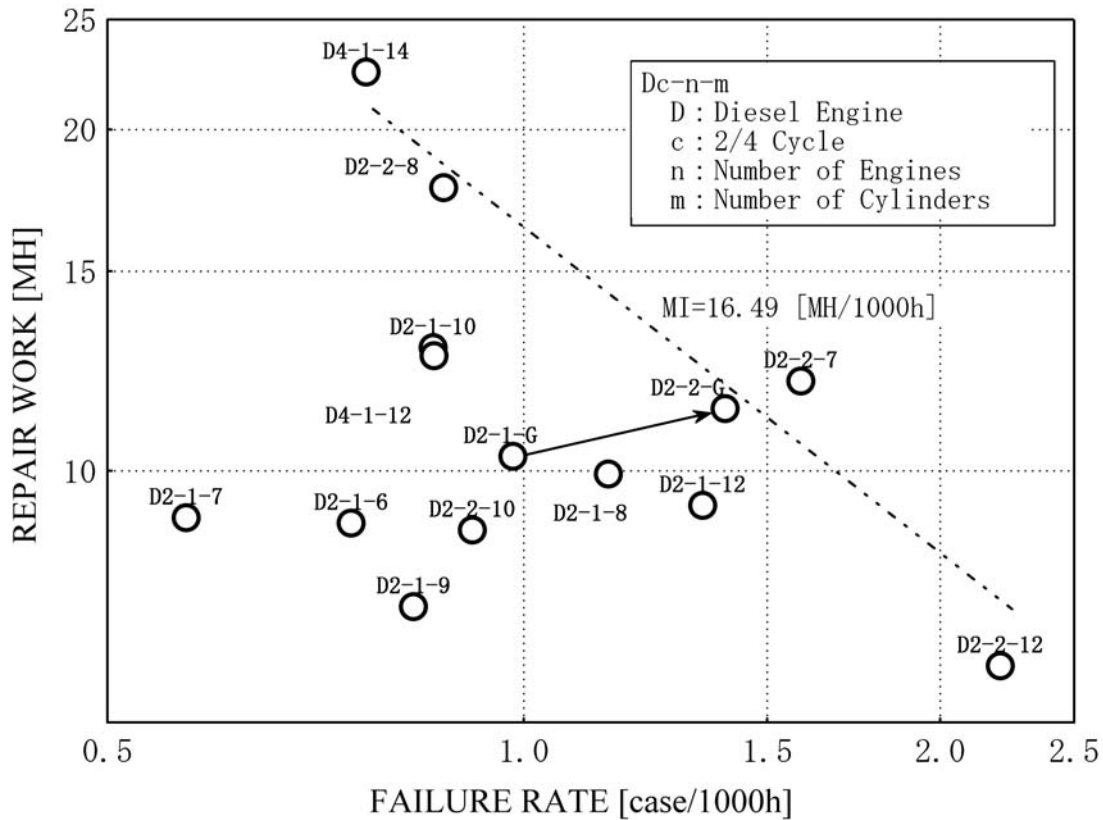


図 3.27 主機型式別の故障発生状況

ないが、現状の保全条件で機関 2 台設置構成主機システムの信頼度の指標として有意なものと考えられる。

気筒当たりの平均値として求めた故障率、処置工数、配員指数の値を主機システムの総気筒数別に図 3.28 に示す。気筒当たりの平均故障率は、総気筒数の増加に対して大きな変化は見られず、微減傾向となっており、平均故障率は 0.095 [case/1000h]、標準偏差は 0.030[case/1000h]である。一方、修復作業の気筒当たりの処置工数は、総気筒数の増加に対して減少傾向を持つことが明らかである。すなわち主機関の複数化や多気筒化により、システムとしての信頼度が高まった結果として大きな保全作業を航海中に要することなく、推進動力システムの機能を維持することができることから、修復作業の処置工数を小さなものにする結果がもたらされたと考えられる。

主機システムに発生する故障によって船舶にもたらされる影響を明らかにすることを目的として、運航総時間に対する修復作業時間総計の割合と航海への影響時間総計の割合を図 3.29 に示した。ここで、影響時間の割合とは、故障発生を起因として生じた減速や主機の停止、あるいは出港遅延状況の指標であり、総航海時間に対する不稼働率を表すものとなる。近年の船舶は少人数化が進行した結果、修復処置作業への投入人員は作業規模に係わらず制限されたものとなっており、従って作業規模は時間要素によって強く支配されている。機関台数や気筒数の増加による機器の増加に比較すれば、図 3.28 の傾向にも示されたように、気筒当たりにおいて作業時間は減少しており、また 7・8・10・12 気筒 2 サイクル機関 2 台設置による平均不稼働率の増加比率

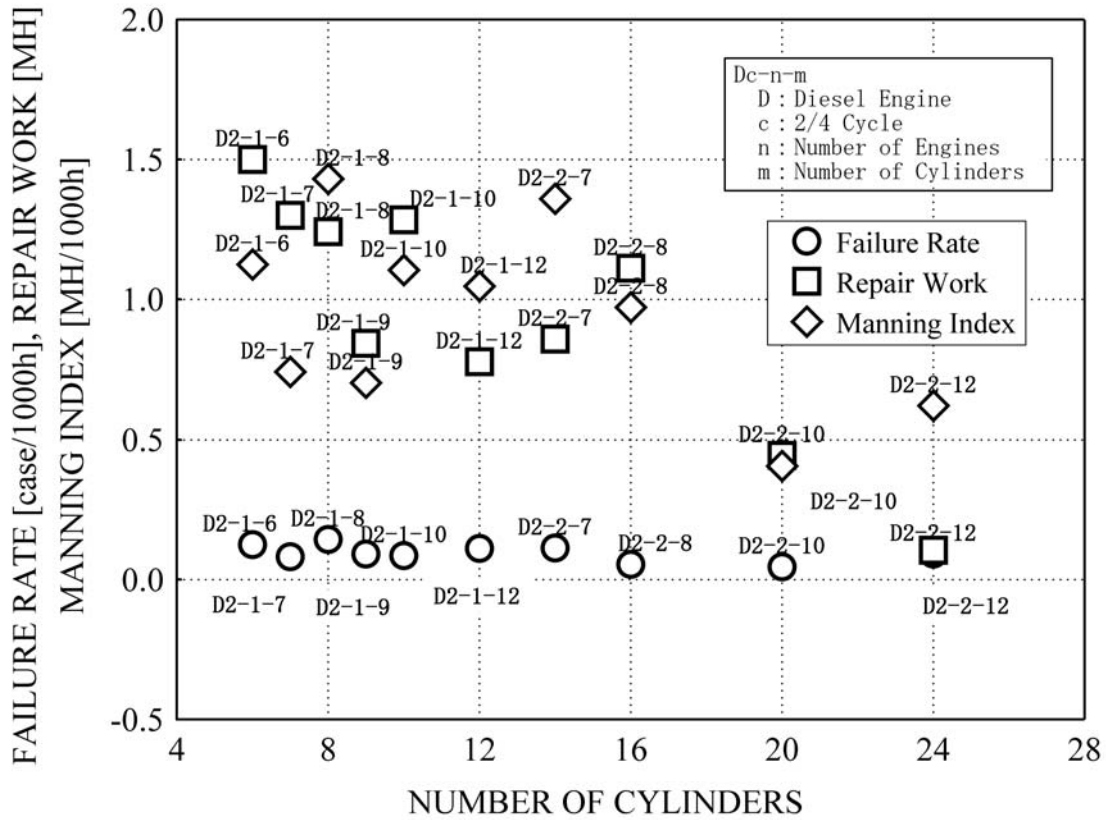


図 3.28 主機気筒数別の故障発生状況

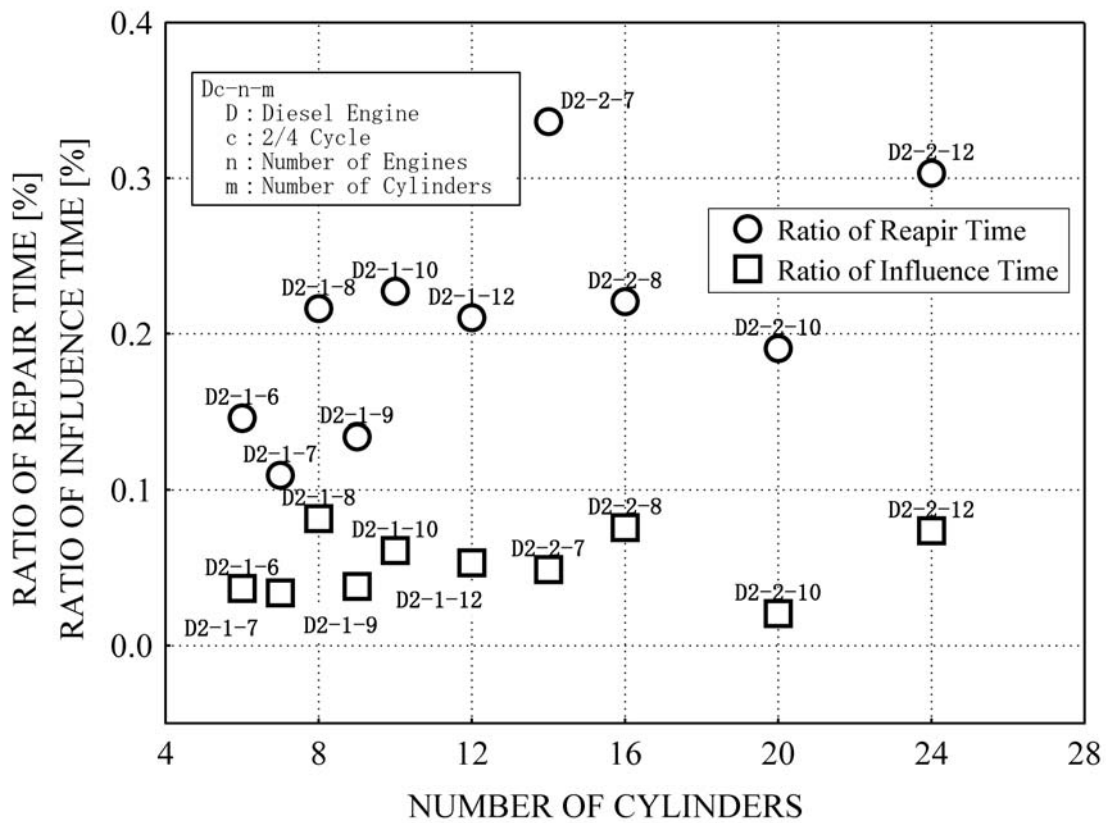


図 3.29 主機気筒数別の修復作業時間及び航海への影響時間の状況

は機関 1 台の条件に対して **0.95** である。すなわち、2 台設置により主機システムの信頼度は増加して航海への影響時間の発生割合は同等の結果となっている。

3.7 舶用機器故障発生による安全運航への影響の評価

3.7.1 故障発生による運航への影響

3章 2.2 節で示したように機械分野別の故障発生状況では、主機系機器故障の平均処置工数と平均影響時間、また発生割合において全体の約 43[%]を占める補機 I 系機器の平均故障率と配員指数が特徴的に大きい値を示している。ここで、主機系機器とは主機本体や付属機器、そして補機 I 系機器とはポンプや清浄機、諸管弁等を代表す

表 3.17 故障別の主機操作

Operation	Failure on Main Engine (主機系機器故障)	Failure on Miscellaneous Equip. (補機 I 系機器故障)
Auto :		
Engine Stop	113	70
Slow Down	1231	145
Hand :		
Engine Stop	208	35
Slow Down	251	30
Others :	5245 [case]	32899 [case]

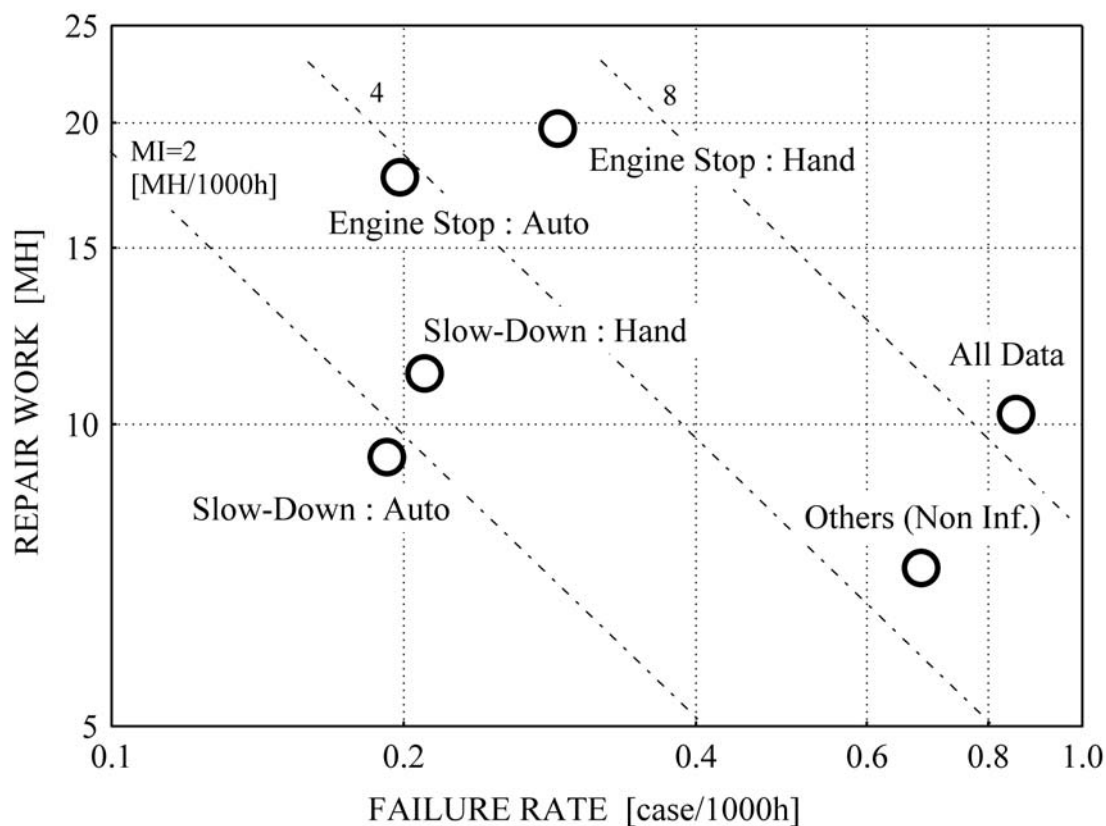


図 3.30 主機系機器故障における主機操作の状況

るものであり、これらの機器が故障発生による機能喪失により船舶の安全運航に大きな影響を与えることは明かである。結果的には航海の遅延などが、故障の発生による運航への影響であるが、航海時間は操船上の対応処置に起因することから、主機操作の対応状況を主機系及び補機 I 系機器故障の比較によって表 3.17 に示した。主機系機器故障の主機の自動及び手動による停止や減速などの影響発生率は約 26[%]である。すなわち主機系機器故障は、推進機能の喪失によって安全な運航の実現を大きく阻害する結果を多くもたらすものであり、いわゆる不安全状態が長く継続する故障である。一方、補機 I 系機器故障は故障率の高さや配員指数で評価されるように故障修復に対する人的時間的損失による副次的作用として安全な運航の実現を阻害するが、主機の自動及び停止や減速などの発生率は約 0.9[%]であり、推進機能の喪失といったような運航への直接的な影響は小さい特徴を持っている。

主機系機器を対象として、主機の停止や減速などの運航操作別に故障発生の状況を図 3.30 に示した。自動操作と手動操作の大別から見るならば、手動操作をもたらしした故障の場合が、故障率においても修復処置作業工数においても、自動操作の場合に比較して上回った値となっている点に注目される。これは、致命的な大規模故障への進展を予兆的な故障に対する十分な対処によって回避していることの表れと考えられるものである。その結果、主機の自動停止となるような故障の規模は制御されたものとなり、予見されない突発的な故障が軽微なものになった状況を示すものである。換言するならば、効果的な保全作業実施の成果の表れと判断されるものである。

機器・要素 (Item3 レベル) を対象とした故障発生の状況から、運航への影響時間による降順上位の結果を表 3.18 及び 3.19 に示した。機械分野故障特性を反映して、機器・要素単位の故障発生状況でも、主機系機器故障が多数頭在する状況が明らかである。潜在的には主軸系機器故障も含まれる状況ではあるが、機器・要素当たりの故障発生数を 30 件以上とする層化を実施した事によって削除されている。しかし、例えば[711：プロペラ]故障では、その平均影響時間は 44.5[min]であり、故障率と修復処置作業工数は小さいが、航海への影響時間において大である特徴が明確である。また、影響時間と同時に配員指数に注目するならば、[863：主復水器]故障が安全な運航を大きく阻害している状況が見られる。

故障発生による運航への影響とは、故障による機器の機能喪失によって船舶にもたらされる直接的な不安全状態の発生と同時に限りのある配員資源から修復処置作業に投入される人的時間的投資もひとつの損失として不安全状態を生起するものである。更には、影響時間は主機の停止や減速の継続を意味するものであることから、これもまた不安全要因のひとつと考えられるものである。

主機系機器故障が影響時間の大きな故障の典型となっているが、一方では航海通信装置系(Item1="N")機器や自動化機器 I 系("5")機器[521：主機遠隔操縦装置]の故障に過大な影響時間の発生が見られる。主機系機器に対して、いわば非機械系である電気電子系機器故障の特徴は、投入作業人員が少ないことから配員指数は小さな値であるにもかかわらず、結果として大きな影響時間をもたらすことにある。すなわち、近年の自動化推進の結果として電気電子系機器が運航に関わる重要な機能を分担していることの反映であり、このような傾向は今後更に増加するものと考えられる。従って、

表 3.18 運航への影響を持つ機器故障（影響時間降順）

Equip. Code (Level-3)	Item Code (Level-1) Equipment Name	Item Code (Level-2) Equipment Name	Item Code (Level-3) Equipment Name	Av. Influence Time [min/case]	Failure Data [case] / [%]
111	Main Engine	Diesel Engine	Device around the Combustion Chamber	50.2	2639 / 3.41
231	Boiler	Exhaust Gas Economizer	Boiler	48.9	210 / 0.27
112	Main Engine	Diesel Engine	Power Transmission Equip.	46.5	305 / 0.34
114	Main Engine	Diesel Engine	Fittings and Accessories	31.5	3333 / 4.31
863	Miscellaneous Equipment I	Heat Exchanger	Main Condenser	30.3	115 / 0.15
113	Main Engine	Diesel Engine	Casing and Inner Mechanism	29.0	262 / 0.34
861	Miscellaneous Equipment I	Feat Exchanger	L. O. Cooler	28.3	77 / 0.10
N13	Navigation, Communication	Navi. Equipment	Auto Pilot	26.6	44 / 0.06
N12	Navigation, Communication	Navi. Equipment	Gyro Compass	22.5	40 / 0.05
887	Miscellaneous Equipment I	Pipe and Valves	Exhaust Gas Line	16.2	78 / 0.10
521	Control Equipment I	Main Engine	Remort Control Equipment	15.2	506 / 0.65

電気電子系機器の機能喪失に対する対処や設計段階での検討が重要となっている。

表 3.19 運航への影響を持つ機器故障の状況

Equip. Code (Level-3)	Failure Rate [case/ 1000h]	Work for Repair [MH]	Manning Index [MH/ 1000h]	Ratio of Influence Time [%]
111	0.446	16.2	7.56	0.043
231	0.145	16.9	2.46	0.019
112	0.247	11.9	2.93	0.030
114	0.495	6.2	3.07	0.028
863	0.459	20.2	9.25	0.040
113	0.228	10.5	2.38	0.018
861	0.257	6.2	1.59	0.030
N13	0.375	3.5	1.29	0.056
N12	1.495	4.2	6.22	0.150
887	0.330	8.8	2.91	0.023
521	0.170	5.4	0.93	0.006

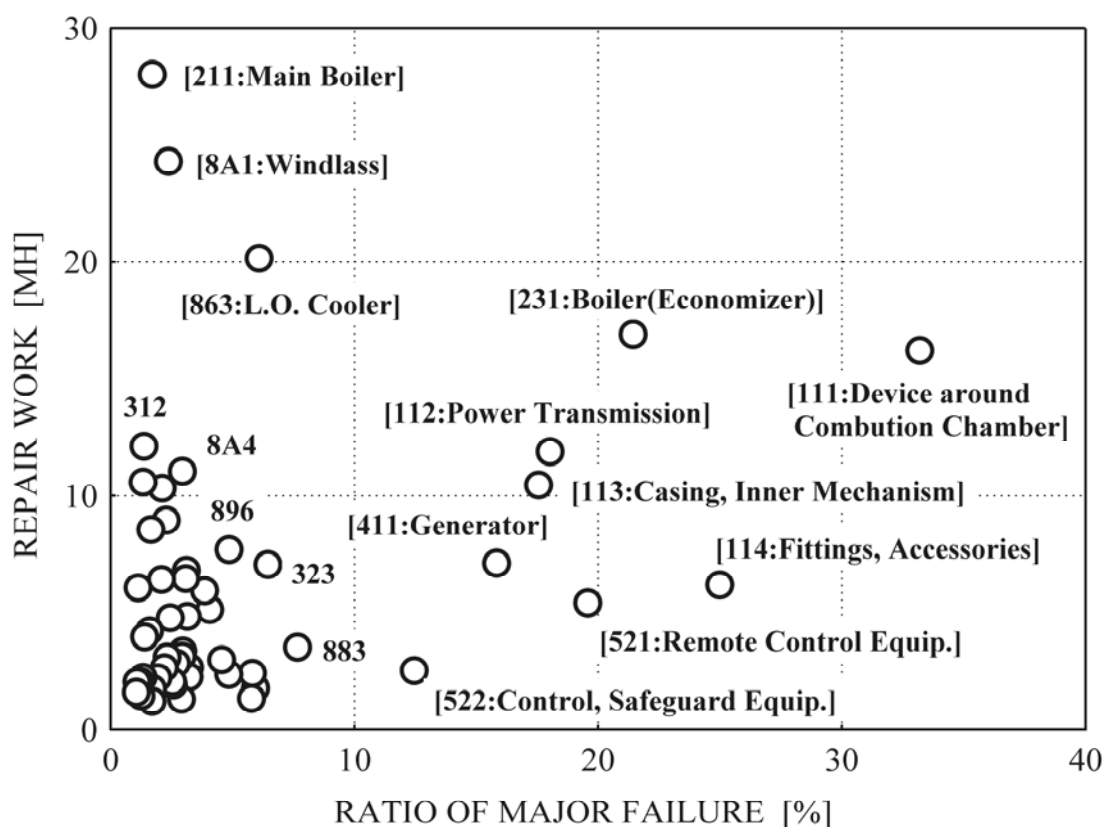


図 3.31 故障機器別の有影響故障割合と修復処置作業工数

3.7.2 多変量解析による運航への影響の評価

故障発生によりもたらされる運航への影響を故障の量と質の側面から評価することを目的として、主因子分析による検討を実施した。対象とした故障データは機器・要素故障 (Item3 レベル) から発生件数 100 件以上の層化により選択された 123 機器・要素に関する故障情報である。

図 3.31 には発生により運航への影響時間を持つ故障の割合(重故障割合)と修復処置作業工数の状況を対象機器毎に示したが、全故障データにおける重故障割合が 3.8[%]であることから、図中における大半の機器が 10[%]以下の小さな重故障割合を示しているが、表 3.18 で高い影響時間を示した主機系の機器などが構成割合においても高い値を示している。一方、運航への影響は小さいが作業工数において大きな値を示す補機 I 系(Item1="8")故障の存在も明らかである。そこで、これらの故障データを対象として主因子分析を行った。

採用した説明変数を以下に示す。

- ① 故障発生件数
- ② 船舶数
- ③ 運航時間
- ④ 平均作業人員
- ⑤ 平均作業時間
- ⑥ 修復処置作業工数
- ⑦ 全平均影響時間
- ⑧ 有影響故障割合
- ⑨ 有影響故障の平均影響時間
- ⑩ 影響時間率
- ⑪ 作業時間率
- ⑫ 配員指数

なお、バリマックス法による回転処理を施した。

分析の結果として得られた因子負荷量の 3 次元分布を図 3.32 に示し、対象機器毎の因子スコアの 3 次元分布を図 3.33 に示した。図 3.32 中に示した固有値プロットの結果より考察するならば、3 つの因子の寄与率が高く、支配的であることが明らかであることから、3 次元表示を採用したものである。ここで、それぞれの因子負荷量から軸の意味付けを試みるならば、第 1 因子軸は作業工数や配員指数によって関連づけられる故障の規模を表すものと考えられる。また、第 2 因子軸は故障件数や運航時間、船舶数に対する相関が高く、故障の量を示すものであることが明らかであり、第 3 因子軸は航海への影響に関わるものを示すと考えられる。従って、この座標系を用いることによって故障を規模・質と量、そして航海への影響の側面より表現することができる。

求められた説明変数の因子負荷量より、対象機器が持つ因子スコアを計算して機器

別に3次元プロットした結果を図 3.25 に示した。第1因子軸に関わる故障としては[211:ボイラ本体]が代表的であり、修復処置作業工数において船舶に対して不安全状態を与えるものである。また第2因子軸に関しては、[852:F.O.清浄機]や[853:L.O.清浄機]などが多発する故障として確認される。

第3因子軸に高い相関を示す機器は、これまでに明らかとなった主機系機器が主体となっているが、[521:主機遠隔操縦装置]や[231:排ガス・エコノマイザ本体]、[863:主復水器]なども総合的に運航への影響を強く持つ⁽³⁵⁾特性を有する故障機器に分類されることが明らかとなった。

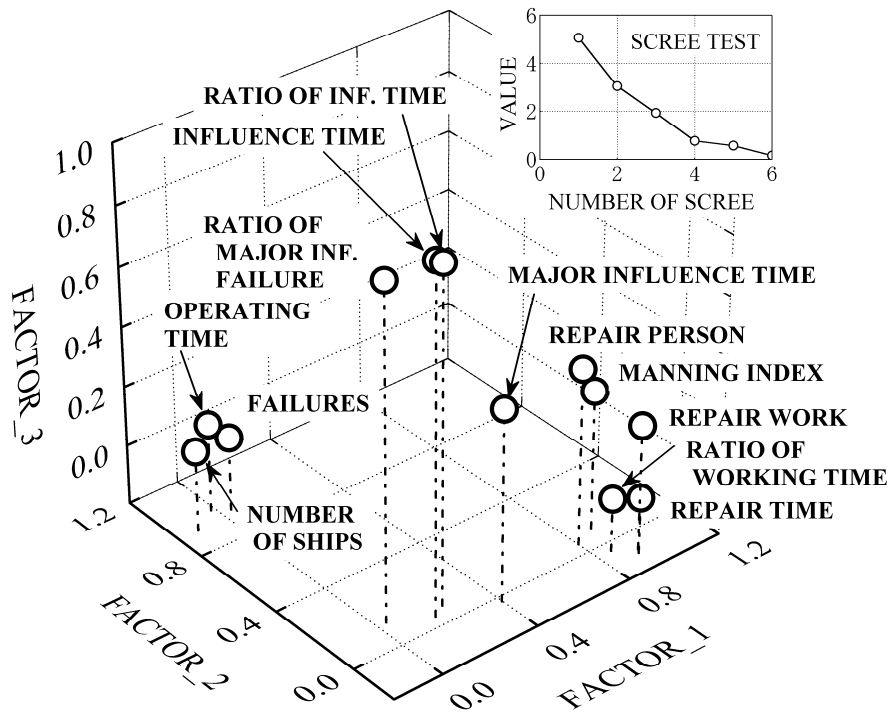


図 3.32 因子負荷量の 3 次元分布

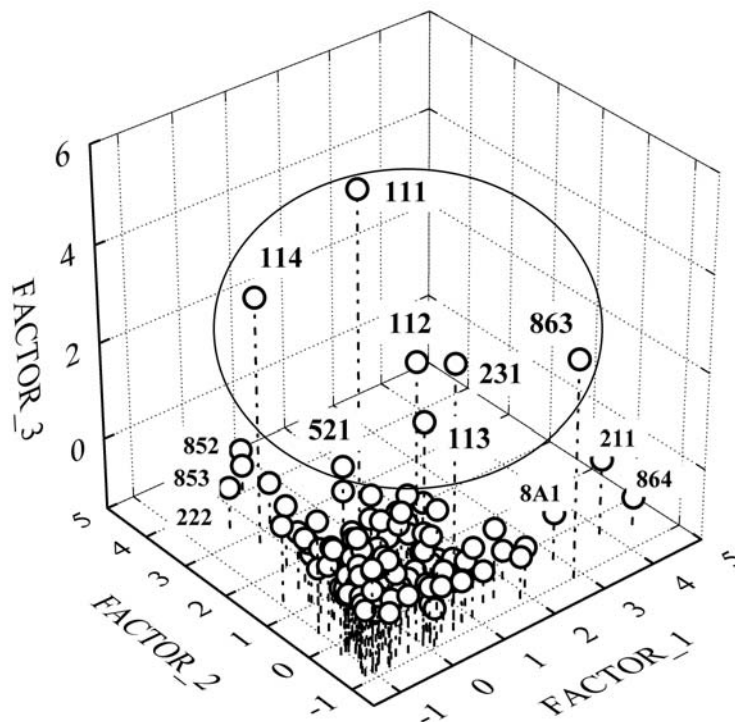


図 3.33 機器別因子スコアの 3 次元分布

3.8 結言

1980年代初頭に造船や海運業界を取り巻いていた厳しい社会情勢を背景として開始された船舶信頼性調査がこれまでに果たした役割は大きく、海事業界や行政に対して貴重な情報を提供してきた。このようなフィールド調査結果を基盤とした船用機器の信頼性に関わる情報の有用性は言うまでもないことである。

我が国の海運業界は、今再び環境問題やコストダウンなどの厳しい諸問題に直面しているが、船用機器の信頼性解析の実施によって運航の安全確保や向上に寄与することは常に重要な課題と考えられるものである。また、本研究において船舶信頼性調査の総括を行うことは、我が国における船用機器信頼性に対する取り組みの成果を明らかにすることであり、構築された船舶信頼性情報データベース・システムが持つ信頼性情報の可能性は計り知れず高い。本研究は、船舶信頼性調査の最終段階における総括の一環として船用機器の信頼性情報の解析を実施したものであり、できうる限り定量的な数値を明示して解析を行った。

船舶信頼性情報によって明かとなった船用機器の故障発生と信頼性・安全性の動向を整理するならば、以下の通りである。

- (1) 1980年代初頭から90年代後半までに船用機器全体での平均故障率はほぼ半減したが、平均処置工数は90年代に入り横ばいから増加傾向に転じている。全機器平均として船用機器の信頼性を評価するならば、1998年水準の平均故障間隔は約276[h]である。
アベイラビリティは90年代前半にピークとなり、その後の修復処置作業時間の増加により低下傾向を示している。
- (2) 発生故障において多数を占めるものは油清浄機を含む補機I系機器で、約43[%]の故障である。調査全期間を通じて、故障発生機器の構成割合に大きな変動は見られないが、近年に至って電気・自動化機器、コンピュータ搭載機器故障の割合が増加傾向にある。
- (3) 故障現象と原因の関係は主観評価ではあるが明確であり、亀裂故障では約21[%]が主機系機器であり約39[%]が補機I系機器であるが、その原因は「腐食」が5.9[%]そして「疲労」が5.8[%]、「振動」が4.2[%]、「劣化」が3.5[%]である。また、電子機器やリモコン装置、各種センサなどを代表する自動化I系機器では「振動」を原因とする断線故障が10.5[%]となっている。
- (4) 機械分野別の機器大分類で故障の特徴を捉えるならば、故障率では補機I系機器が最大であり、修復処置作業工数では主機系故障が最大である。

船舶信頼性情報において、機器・要素のレベルで整理分類される機器は1872種類であるが、特に故障発生の頻出状況に注目して整理するならば、以下の通りである。

- (5) 最も多発している故障は「燃料油清浄機」故障で7.8[%]を占めており、続いて「潤滑油清浄機」故障の6.1[%]、「補助ボイラ付属機器」故障の5.5[%]である。

- (6) クラスタリングによる故障の分類を行うならば、頻出故障は4つのクラスターに分類されるものであり、それぞれ以下のような特徴を持っている。
- ① 高い故障率を持つ故障群で、F.O.やL.O.清浄機など。
 - ② 修復処置作業工数が高く、運航への影響の大きな故障群で、ディーゼル主機の付属機器やS.W.及びF.O.系の諸管弁など。
 - ③ ①と②の中位の特徴を持つ故障群。
 - ④ 最も大きな運航への影響を持つ故障群で、ディーゼル主機燃焼室廻り機器やディーゼル発電原動機燃焼室廻り機器など。
- (7) 最頻出故障である「燃料油清浄機」故障を故障発生要素で見ると、弁シリンダやノズル、ボールの故障が約72[%]である。

(2) に示したように近年になって電気電子系機器の故障が船用機器故障の中で重要な位置を占めるようになってきた。このような傾向は、船舶の少人数化や自動化が進行する状況で今後更に増大するものと考えられる。そこで、特に電気電子系機器に注目した解析を実施した。その結果は以下の通りである。

- (8) 機械系機器の故障率が減少傾向であるのに対して電気電子系機器の故障率は横這いの傾向を持つ。
調査全期間における電気電子系機器の平均故障率は2.117[cas/1000h]であり、平均故障間隔は約472[h]である。
- (9) 電気電子系機器故障は故障特性により4グループに分類されるものであり、それぞれ以下のような特徴を持っている。
- ① 故障率と修復処置作業工数において典型的で多数を占めるグループ。
 - ② 配員指数において高い値を示すグループ
 - ③ 故障率の高いグループ
 - ④ 修復処置作業工数で大きな値を持つグループ
- (10) データロガーやモニター、発電原動機の自動燃焼制御装置、電気器具そして電動機に関わる故障が多発している。また近年では、コンピュータや主機遠隔操縦装置に故障の発生が多い。
- (11) 運航への影響時間では、主機遠隔操縦装置故障などが高い値を持っている。
- (12) 電気電子系機器故障において断線・接地故障は16.9[%]を占める。
- (13) 「振動」を原因とする故障が電気電子系機器では多発しており、設計段階や保全作業における防震免震対策が重要である。
- (14) 電気電子系機器は、船舶の運航に対して重要な機能を果たすようになっている。

このように電気電子系機器故障に注目した評価を実施したが、ソフトウェア故障に対する検討はなされていない。電子系機器の導入は、当然の事ながらソフトウェアを伴うものであり、その故障発生は必然のことである。しかし、機能喪失したソフトウェアに対する復旧作業や保全作業の実施可能な環境を、航行中の船舶が持つ配員資源の中だけで恒常的に期待することは現実的ではない。電子技術の発展は、情報技術や

通信技術の発展でもあることを考慮するならば、これらの技術を導入し陸上支援機能をも加味した保全作業の実現や故障の自動診断などが今後の検討対象と考えられる。

少人数化や自動化の著しい船舶では、電気電子系機器が運航において中枢的な機能分担を果たす様になったが、主機系機器などの機械系機器が安全運航実現のために重要であることは不変の事である。そこで、主機系機器故障に注目した解析結果を整理して以下に示す。

- (15) 1990年代に入りディーゼル主機の故障率は減少傾向であるが、修復処置作業工数や航海への影響は微増傾向である。
- (16) ディーゼル主機システムを構成する機器は、故障の量と質の側面から整理できる。機器故障群の分類において、ディーゼル主機燃焼室廻り機器故障は特異な性状を示すものであり、故障率と修復処置作業工数の両面で高い値を持つ。
- (17) ディーゼル主機燃焼室廻り機器故障を要素分類レベルで見ると、排気弁故障が約24 [%]の多数を占めている。また、ジャケットやライナ、ピストンなどの重量物故障も多発している。

近年の主機関は、V形配置による多気筒化が主流となり、軽量化が進められた。更に、ボア・ストローク比で3.8程度の超ロングストローク型や気筒当たりの出力が4000～5000[PS]の高出力型が主流となっている。主機は重要な機器として、当然の事ながら故障解析⁽³³⁾や信頼性向上のための取り組みは広く実施されているが、現実問題として大きな関心事はコストであり、燃料消費量の節約である事もまた事実である。

安全の確立には冗長性の確保によるアプローチも考えられ、例えば予備機による冗長系が確立された発電システムなどでは冗長度による信頼性評価のアプローチは比較的容易であるが、出力設定や設置スペース、あるいはコストの問題を主眼として選択されている主機システムについての冗長度を考慮することは困難な側面もある。しかし、海上において陸上からの支援を容易く得ることのできない船舶の特殊性を前提として実現すべき機能目的に則することで主機システムについての冗長問題を整理するならば、以下の通りである。

- (18) 船舶の推進動力システムの機能目的は自立的な推進力の確保であり、この視点において多機多軸主機システムは出力条件下で冗長度を有する。
- (19) 主機システムの信頼度は、現状においては機器装備コストや保全作業量とのトレードオフによって成立する。
- (20) 主機システム機器要素の倍加による不信頼度の影響は、運転状況により負荷の分散の結果として軽減される。
- (21) 2機多気筒2サイクル機関故障の配員指数は16.49 [MH/1000h]。
- (22) 2機多気筒2サイクル主機システムの不稼働率は1機の場合とほぼ等しい。

(19) に示したトレードオフは船舶運航のトータル・コストの増大と考えるべきではなく、リスク軽減に対する効果として評価すべき対象と考えられる。この運航にお

ける故障発生によるリスクとは航海の遅延などを意味するものであるが、海難事故の発生までに進展する可能性を持つものである。故障発生がもたらす運航への影響を整理して以下に示す。

- (23) 主機系故障では主機の自動・手動停止や減速をもたらす故障は約 26[%]であり、補機 I 系故障では約 09[%]である。
- (24) 機器・要素分類で運航への影響時間で最大となるものは、ディーゼル主機燃焼室廻り機器故障であり、平均影響時間は 50.2[min]である。
- (25) 故障修復処置作業工数は限られた配員資源からの人的時間的な投資であり、安全運航継続に対する不安全要因である。
- (26) 船用機器の故障は、その規模と量、そして運航への影響の 3つの因子によって表現される。

第3章の参考文献：

- (1) 塩見弘：「信頼性工学入門」、丸善（1995.10）
- (2) 塩見弘：「故障物理入門」、日科技連出版社（1970）
- (3) 栗原謙三：「情報システム化時代の信頼性工学テキスト」、日本理工出版会（200.10）
- (4) ジェームズ・リーズン：「組織事故」、日科技連出版社（2000.8）
- (5) 日本リスク研究学会：「リスク学辞典」、テイビーエス・ブリタニカ（2000.9）
- (6) 若部一鷹、最相力：「リスク管理の秘訣」、共立出版（1996.6）
- (7) ロバート・L・グラス：「ソフトウェア信頼性ガイドブック」、日科技連出版社
- (8) H.W.ルイス：「科学時代のリスク」、昭和堂（1997.4）
- (9) 日本造船振興財団・シップアンドオーシャン財団・運輸省海上技術安全局：「船舶信頼性調査委員会報告書」、（1982.7）、（1983.3～1992.3）
- (10) H.TAMAKI：“A Ship Reliability Investigation System in Japan”、Proceedings of ICMES 90、Paper 3、ICMES（1990）
- (11) 城戸八郎：「船用機関システムの信頼性・保全性解析及び評価手法に関する研究」、学位論文（2001.1）
- (12) 桐谷伸夫：「船用機器の信頼性と運航への影響」、日本航海学会論文集第103号、pp.111-118、日本航海学会（2000.9）
- (13) 桐谷伸夫：「船用機器の信頼性と運航への影響Ⅱ 一船用機器故障の実態と主成分分析による船舶信頼性情報の統計的考察一」、日本航海学会論文集第104号、pp.63-69、日本航海学会（2001.3）
- (14) 桐谷伸夫：「船用機器の信頼性に関する統計的考察と安全管理 一船舶信頼性情報データベースによる主機システム機器故障の信頼性評価一」、日本船用機関学会誌 Vol.35 No.12、pp.833-840、日本船用機関学会（2000.12）
- (15) 桐谷伸夫：「船用機器の信頼性に関する統計的考察と安全管理 一電気電子系機器故障の特性と評価一」、日本マリンエンジニアリング学会誌 Vol.36 No.1、pp.40-48、日本船用機関学会（2001.1）
- (16) 桐谷伸夫：「冗長性のある推進動力システムの信頼性・安全度解析 一JSIC データに基づく運航実績と安全性評価一」、信学技報 SSS2000-17、pp.19-24、電子情報通信学会（2000.8）
- (17) N.KIRIYA and T.HASHIMOTO：“Failure Analysis of Marine Electric and Electronic Equipment by Ship Reliability Database System in Japan”、Proceedings of IMECE 2000、pp.44-50、IMECE（2000.9）
- (18) 橋本武：「船用機関システムの信頼性設計と保全性管理に関する研究」、学位論文（1985.11）
- (19) 塩見弘、隻哲朗：「信頼性データ解析」、日科技連（1998.12）
- (20) 運輸省海上技術安全局：「船舶信頼性調査委員会報告書 一本報告書の読み方について一」、pp.113-122、（1992.3）

- (21) 柳繁：「アベイラビリティと交換理論」、信頼性ハンドブック、pp.57-61、日科技連（1997.4）
- (22) 実務教育研究所：「現代統計実務講座 I、II」
- (23) 竹内啓他：「統計学事典」、東洋経済新報社（1989）
- (24) 菅民郎：「多変量解析の実践」、pp.118-159、現代数学社（1999.3）
- (25) 奥野忠他：「多変量解析法 クラスタ分析」、pp.391-411、日科技連（1978.4）
- (26) 岡山大学環境理工学部垂水研究室：「統計数値表」、WWW サイト
- (27) 奥野忠他：「多変量解析法 主成分分析」、pp.160-257、日科技連（1978.4）
- (28) 奥野忠他：「多変量解析法 因子分析」、pp.324-372、日科技連（1978.4）
- (29) 涌井良幸、涌井貞美：「多変量解析」、日本実業出版（2001.1）
- (30) 橋本武：「船用電気機器の信頼性と保全性の評価」、日本船用機関学会誌 Vol. 11 NO. 1 pp. 47-59、日本船用機関学会（1976. 1）
- (31) 練習船教育後援会：「練習船実習生用教科参考資料」
- (32) 長尾不二夫：「内燃機関講義 上」、養賢堂（1987）
- (33) 増田昭彦：「冗長構成設計法」、信頼性ハンドブック、pp.162-167、日科技連（1997.4）
- (34) 橋本武：「船用発電システムにおける冗長系の実績とその考察」、日本船用機関学会誌 Vol.35 No.2、pp.147-152、日本船用機関学会（2000.2）
- (35) 星野次郎：「機関損傷解析と安全対策」、成山堂書店（1999.8）

4章 船用機器のシステム信頼性解析

4.1 緒言

海上を航行する船舶は、様々なサブ・システムから構成される大規模プラントあるいは自己完結したひとつの巨大システムと考えられものである。すなわち、基本的に船舶は大洋を自らの能力のみによって航行して目的港に到着することが義務付けられた存在であり、そのために必要な機器設備や運航システム、そして人員や資材が搭載されている。この自己完結性あるいは自律性の要件こそが他の陸上施設と最も異なる特徴であり、例えばシステムとして必然である故障発生により重要機器が機能喪失となって運航上の致命的な危機状態が生起されたとしても、陸上施設のように短時間で容易に他者の支援や資材の提供を受けることは困難である。従って、船舶は装備された資材や機材、そして人的時間的な配員資源を効率的に活用することによって自らの能力で危機状態からの復旧を図らなければならない。ひとたび重要機器の機能喪失により衝突や座礁などの海難事故が起きてしまえば、人的被害や経済的な被害のみならず自然環境に対しても甚大な被害を与えてしまうことは、これまでの数多くの経験からも明らかであり、船舶の安全運航実現のために船用機器の高信頼度化は必須の第一要件である。そこで、このような観点より船用機器の信頼性向上を目的とした種々の調査報告や故障解析が実施されてきた。特に、「船舶信頼性調査委員会」による調査活動では長期間に及ぶ船用機器の信頼性に関わるフィールド・データの収集と信頼性解析を実施した結果⁽¹⁾、船用機器の故障特性などを定量的に明らかにすると同時に、船舶信頼性情報データベース・システム (SRIC Database System) の構築が実現されている。このような船用機器個々の信頼性に注目した取り組みが重要なものであることは言うまでもないが、機器レベルの信頼性評価の結果を背景として、船舶がひとつのシステムであることに視点を置いた総合的なリスク・安全評価やシステム信頼性評価実施の重要性もまた明らかなことである。

本章は、船舶がいくつものサブ・システムから構成される大規模プラントであることを前提として、確率論的な安全評価の立場より船舶を構成するサブ・システムとして特に重要な推進機能の維持に関わる船用機器システムに注目した定量的なシステム信頼性解析を実施したものである。

4.2 システム信頼性解析と GO-FLOW 解析

4.2.1 確率論的安全評価とシステム信頼性解析

陸上プラントのみならず建築物や航空機など、あらゆるシステムの構築や運用において、その安全性やリスクを考える事が必須の要件であることは言うまでもない。そのために通常は、想定される外的条件や使用条件を考慮して十分な強さや安全性を対象システムに与えるべく設計や施工・管理がなされているが想定条件に対して十分に安全であること、すなわちリスクが極めてゼロに近いことを評価した結果と考えられる。換言するならば、想定条件に対する決定論的安全評価の結果を拠り所として、対象システムの安全が担保されていると考えるものである。しかし、実際には想定条件と同時に決して皆無とは言えない想定外の状況に対しても、そのリスクや安全性の評価結果が明確となるような信頼性評価のアプローチこそがより有効な取り組みであり、実利性が高いものである。このような観点において、システムに与えられる環境条件や使用条件に対して顕在・潜在するリスクを確率的な分布として定量的に取り扱う手法である確率論的安全評価(PSA: Probabilistic Safety Assessment)は、決定論的な安全評価に対して大きな有用性を持つものである。

定量的なリスクや安全性の評価のために、例えば原子力プラントのような複雑な大規模システムの信頼性に対する評価手法として、フォールト・ツリー(FT)解析^{(2)~(5)}などが定量的解析・評価において広く利用されている。このFT解析は、システム信頼性解析手法⁽⁶⁾のひとつとして考えられたものであるが、歴史的に見るならば1960年代に米国におけるミサイル兵器開発において端を発したシステム安全工学の発達と共に進展した安全評価手法である。その後、航空宇宙産業の分野から始まったFT解析は原子力産業、更には一般産業分野においても広く適用されることが認識されるようになった。特に、1974年米国原子力委員会が実施した商業用原子力プラントの災害危険性の評価に関わる報告書(ラスムッセン報告: Rasmussen Report)において、FT解析が広く利用されたことによって社会的にも大きな認知を得るに至った。このようにFT解析は、広い産業分野において多年にわたる実績を持つものである。

ここでFT解析の実施手順の概要を整理するならば、以下の通りである。

- (1) 対象システムの機能や工程を把握し、予想される災害を幅広く調査した上で解析すべき災害を決定する。
- (2) 解析目標である災害に関係する機器の不良状態について、その原因と影響を詳細に調査する。
- (3) FTを作成し、機器の不良状態などの発生確率をデータとして与えて数式化されたFTにおいて災害の発生確率を計算する。
- (4) 計算された災害発生確率やFTを解析することによって、システムの安全評価や有効な対策を策定する。

FT解析は、フォールト・ツリーの構築を主体として解析を実施することでシステム

の信頼性評価を行うものであり、このフォールト・ツリーは対象システムを単純な事象の論理的な合成により表現して頂上現象である故障や異常現象の発生を表現したものである。すなわち、頂上現象を AND や OR などの論理ゲートによって階層的に結合された基本事象の集合としてフォールト・ツリーにより図化したものであり、構成基本事象それぞれに事象の発生確率を与えることによって、システム全体の評価を実施するものである。この FT 解析に対して対象システムに発生すると考えられる異常・故障を徹底的に洗い出し、それらの発生シーケンスの全てを定性的に評価する作業がイベント・ツリー(ET)解析と位置付けられる。

ET 解析は、大規模で複雑なプラントにおける事故シーケンスの展開を明らかにする上で有効な解析方法であり、起因事象を出発点として機能上の成功・失敗に対応させて事故のシーケンスをイベント・ツリーとして図化するものである。

実際の信頼性評価作業の実施においては、ET 解析と FT 解析を組み合わせることで、すなわち対象システムが持つリスクの全体像と故障発生シーケンスを ET 解析によって把握して問題点を明らかにする事が第一段階であり、次に FT 解析によって評価を行うことが、システム信頼性解析においては重要なアプローチ例となっている。

4.2.2 GO-FLOW 手法の概要

前述した FT 解析はこれまでの適用実績において優れた手法であることは確かであるが、FT 自体の作成には高い熟練度が必要であると同時に、各事象のシーケンスやツリー構造を検証することが容易でない側面を持っている。一方、電気回路などを対象としたシステム信頼性解析手法のひとつである GO 法⁽⁷⁾を基にして開発された GO-FLOW 手法^{(8), (9), (10), (11)}は、GO-FLOW チャートと呼ばれるシステム・モデル図を専用エディターによって解析対象システムと対比しながら作成して解析を実施するものであり、より扱いやすく考えやすい手法となっている。このように GO-FLOW 手法は、解析対象とするシステムを機器や機能をモデル化した GO-FLOW オペレータとそれを結ぶ信号線によって表現されるシステム・モデル、すなわち GO-FLOW チャートを作成して定量的に信頼性を評価するものであり、海上技術安全研究所(平成 13 年 4 月 1 日国土交通省船舶技術研究所より改組)松岡らによって開発されたシステム信頼性解析手法のひとつである。

GO-FLOW チャートを構成するオペレータは、前述したようにシステムを構成する機器要素や機能をモデル化したものであり、基本的には図 4.1 に示すように主入力信号：S、副入力信号：P、出力信号：R の三種類の入出力系を持つものであるが、信号発生器や論理ゲートなどのような特別な入出力系を持つものもある。例えば、ここで図 4.1 に示したオ

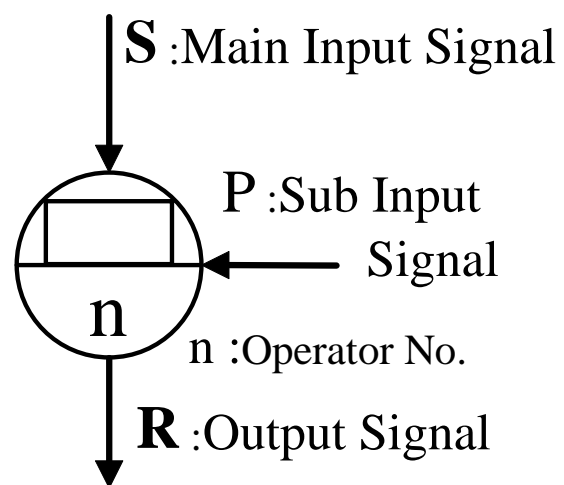


図 4.1 オペレータの入出力関係

オペレータは、タイプ 35 オペレータと呼ばれるものであり、動作機器の故障発生をモデル化したものである。すなわち、主入力信号が存在する場合に故障が発生する事を意味している。また、副入力信号は事前に定義したタイム・ポイントによる時間経過を与えるものである。これらの機能によって、タイプ 35 オペレータは例えば電球が点灯中に切れることやポンプ運転中の故障による停止などをモデルするものであり、主信号に対して作用するデータとしてタイプ 35 オペレータには故障率： λ が与えられるものとなっている。

様々な機器や機能をモデル化するために、GO-FLOW 手法にはいろいろなタイプのオペレータが標準装備されているが、主なオペレータを図 4.2 に示した。図中、例えばタイプ 21 オペレータは機器が動作開始以前に設定された確率によって既に故障状態になることを表現したものである。またタイプ 25 オペレータは信号の発生器を示し、タイプ 26 オペレータは閉状態から変化するバルブを示したものである。タイプ 35 オペレータは動作機器の故障発生をモデル化したものであり、タイプ 37 オペレータは開状態のバルブが時間経過と共に故障を発生して閉状態になることを表現している。更には、論理ゲートをモデル化したオペレータとして AND ゲート、そして OR ゲートや NOT ゲートをモデル化したオペレータなども用意されている。これらのオペレータを単独、あるいは複数組み合わせる事によって機器の動作や機能、そして故障発生を表現することが可能となっている。

GO-FLOW チャートにおいて、流れのシーケンスを表現するためにオペレータ間を結合するものが信号線である。ここで信号線を通る信号とは、燃料などの液体や電流、情報、指令、時間経過量などの広い概念により適用することができる。そして、流れる信号は強度と表現される量を伴うものであり、この強度は信号が存在する確率に対応したものとなっている。このように GO-FLOW 手法は、モデル化されたオペレータに対して故障発生に関わるデータを与えてチャートを作成し、信号線によって表現されたオペレータと信号線の繋がりを流れる信号を処理することによってシステム全体の動作を評価するものである。また、GO-FLOW 手法ではシステムの時間変移をタイム・ポイントの設定によって求めることも可能である。加えて、機器の正常あるいは異常状態の変化を取り込んだシステムの解析が可能であることから、修理作業の結果や保全作業の実施を導入したシステムの変移を表現することも可能である。

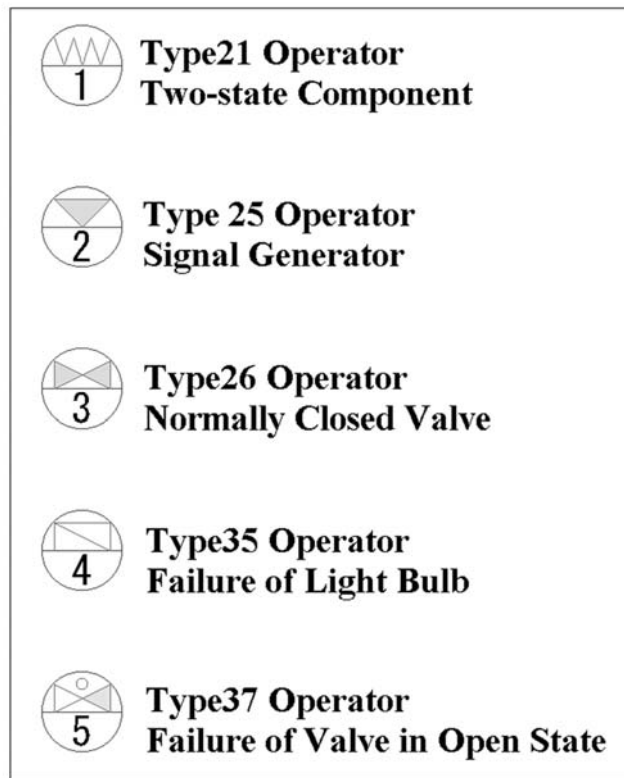


図 4.2 主な GO-FLOW オペレータ

GO-FLOW の基本動作原理を図 4.1 に例示したタイプ 35 オペレータにおける入出力関係に注目して示すならば、以下の通りである。

$$R(t) = S(t) * \exp \left\{ -\lambda \sum_i \sum_{t_k \leq t} P_i(t_k) \min[1.0, S(t_k) / S(t)] \right\}$$

- R(t) : 出力信号強度
- S(t) : 入力信号強度
- P(t) : 副入力信号強度
- t : タイム・ポイント
- k : 遅延タイム・ポイント
- λ : 故障率

現在、GO-FLOW 手法に用意されている標準オペレータは、終端あるいは中継端子として利用するダミー・オペレータを除き 14 種類であり、これらのオペレータを解析対象モデルとの対応により設置して信号線により結合することによって GO-FLOW チャートが完成される。解析プログラムは、その GO-FLOW モデルを事前設定されたタイム・ポイントに従って上流から下流へと信号強度をオペレータの定義に基づく計算を実施して追跡することによって系としてのモデルが持つ成功確率を明らかにするものである。このように、解析実施手順としての GO-FLOW 手法は、第一にエディターによるシステム・モデリングを実施して、次に解析プログラムを実行、出力結果の評価を行うものとなっている。そのためにソフトウェアとして GO-FLOW 手法解析プログラムには、チャート・エディターや解析支援システムが用意されており、作業者の労力の軽減が達成されていることも大きな特徴のひとつと指摘できるものである。

4.3 システム信頼性解析と評価

4.3.1 推進プラントのF Tモデリング

船舶における推進プラントを対象としたシステム信頼性解析^{(12),(13),(14)}の実施を目的として、推進機能を安全に機能させるために関わるサブシステムの異常・故障発生と全体での不具合発生・運転異常との関係の概念を整理して図 4.3 に示した。すなわち、推進プラントは下位システム（サブシステム）のいずれかひとつにでも異常が発生すれば、推進プラントの運転に異常が発生することを意味したものである。図示した各サブシステムは、それぞれにあるいは連携して本船の推進機能に関わるものであるが、当然システム全体に対する影響度には大小がある。例えば、1機1軸船であれば主機本体や主軸系の重大で致命的な故障の発生が直ちに推進機能喪失を意味することは明らかであるが、サブシステムの機能によっては保全作業実施により機能復旧させるための時間的な余裕や運転状態の軽減による対処も可能と考えられる。逆に言うならば、故障発生により直接推進機能の喪失に直接影響するようなサブシステムに対する安全評価は系全体に対しても効果的である。そこで、特にディーゼル主機の正常運転に基づくプロペラの推進機能維持に注目した関連サブシステム群を船用機器システムとし

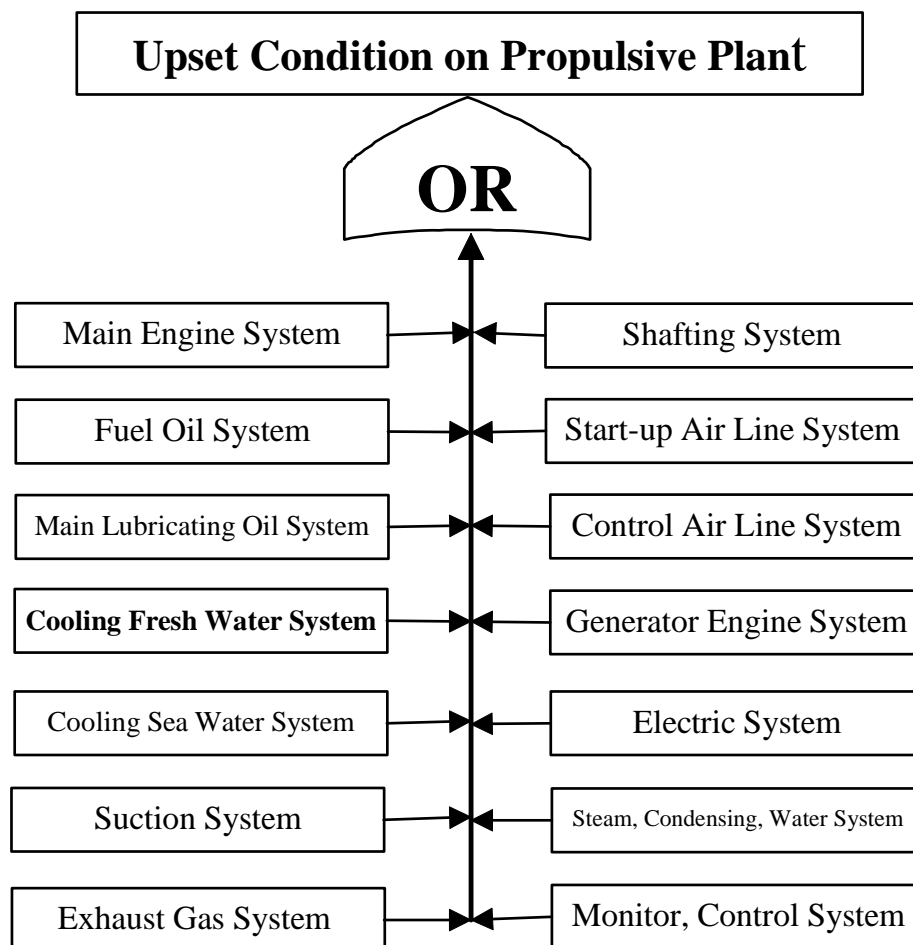


図 4.3 推進プラントのサブ・システム構造

て考え、後述する GO-FLOW モデリング（GO-FLOW チャート作成）と解析の対象とした。ここで、図 4.3 に示した推進プラントを構成するサブシステムを整理するならば以下の通りである。

- (1) 主機サブシステム
- (2) 燃料油系サブシステム
- (3) 主潤滑油系サブシステム
- (4) 冷却清水系サブシステム
- (5) 冷却海水系サブシステム
- (6) 吸気系サブシステム
- (7) 排気系サブシステム
- (8) 軸系サブシステム
- (9) 起動空気系サブシステム
- (10) 操縦空気系サブシステム
- (11) 発電原動機系サブシステム
- (12) 電気系サブシステム
- (13) 蒸気・復水・給水系サブシステム
- (14) 監視・制御装置系サブシステム

ディーゼル主機の正常運転の維持に直接関わり影響の大きな主機システム構成サブシステムの重要性は明かであるが、船用機器故障のフィールドデータの状況から考慮するならば、特に燃料油系油清浄機関連の故障が頻出している点にも注目される。すなわち故障機器の40%以上は補機系の機器であり、油清浄機故障は全体の約8%の多数を占めているからである。燃料油系清浄故障の特質は、「軽微だが頻出するもの」と指摘することができるが、年変動において処置工数に増加傾向が表れていることや発生割合が全期間を通じてほぼ横這い状態であることなどを考えるならば、船舶の安全評価において主機システムのみならず燃料油系サブシステム故障に対する評価もまた重要と考えられる。

4.3.2 船用機器システムの GO-FLOW モデリング

船舶運航において果たすべき機能で最優先事項は、推進機能の確保である。すなわち、いかなる船舶においても貨物や旅客の安全輸送を実現するための前提条件となるものは、決して推進機能を喪失することなく航行を継続して目的港に到着することである。従って、船舶を対象とした信頼性評価の取り組みのひとつとして推進機能確保の観点より、図 4.3 に示した推進プラントのサブシステムの中で異常発生に対する保全対応の余裕が少なく、直接的に主機本体の正常運転維持に強く影響して更にはプロペラの推進機能維持を阻害するようなサブシステムに注目した船用機器システムの概念モデル^{(15),(16)}を燃料油の流れに従う系統により図 4.4 に示した。また、このモデルを対象として作成した主機システムの GO-FLOW モデル (GO-FLOW チャート) を図 4.5 に示した。このモデルは、前述したように主機サブシステムに注目しながらも関連するサブシステムで特に影響の強い機器を取り込んで作成したモデルである。

GO-FLOW 手法は基本的に対象システムの動作成功確率を追跡するものであることから、図 4.3 において主機プラント異常運転を頂上事象とするツリーとして故障発生 OR 接続で結ばれていたサブシステムが、正常運転の AND 接続で結ばれている点に特徴がある。

モデル全体の流れとしては、燃料油タンク (Fuel oil chamber) から移送された燃料油が燃料噴射弁に至る流れに対して、清水冷却装置と燃料油循環系そして主機コントローラや制御装置などが機能する事の表現がモデルの左部分であり、これらの正常状態が GO-FLOW チャートにおいては No.24 の Type30AND オペレータで評価されるものである。そして 4 種類の機器要素によって表現された主機本体と潤滑油タンク (Lubricating oil tank) からの潤滑油系が機能していることを No.24 の AND オペレータによって評価し、さらに主軸系機器が正常機能していることを評価して、システム全体の正常運転確率を求めるものである。

GO-FLOW モデリングにおいて採用した故障率やアベイラビリティなどのデータは、船舶信頼性情報に基づくものである。船舶信頼性情報は、船用機器に関わる膨大なフィールド・データの解析によって、機器それぞれについて故障率などを明らかにしたものであり、定量的なシステム信頼性解析には不可欠の要素である。換言するならば、このように機器毎にフィールド・データを背景とした意味のある故障データを設定することは、システム信頼性解析の精度を高めるためにもひじょうに重要な要件である。その一例として、図 4.6.1 にモデリングにおいて採用した主な機器の故障率を修復処置作業工数と配員指数によるマルチ・チャートとして示した。また、図 4.6.2 には発生により主機の停止や減速をもたらす機器故障 (重故障: 運航への影響時間を発生する故障) に注目した信頼性データを示した。すなわち、この重故障のデータをシステム解析に導入した場合には、システムとしての異常状態のみならず、故障発生の結果として船舶が主機の停止や減速によって直接的に影響されるリスクを評価することができるものである。

ディーゼル主機に関わる 4 機器要素について、故障データをまとめて表 4.1 に示した。ここで機器の特定は階層構造の船舶信頼性情報機器コード表に従って実施されて

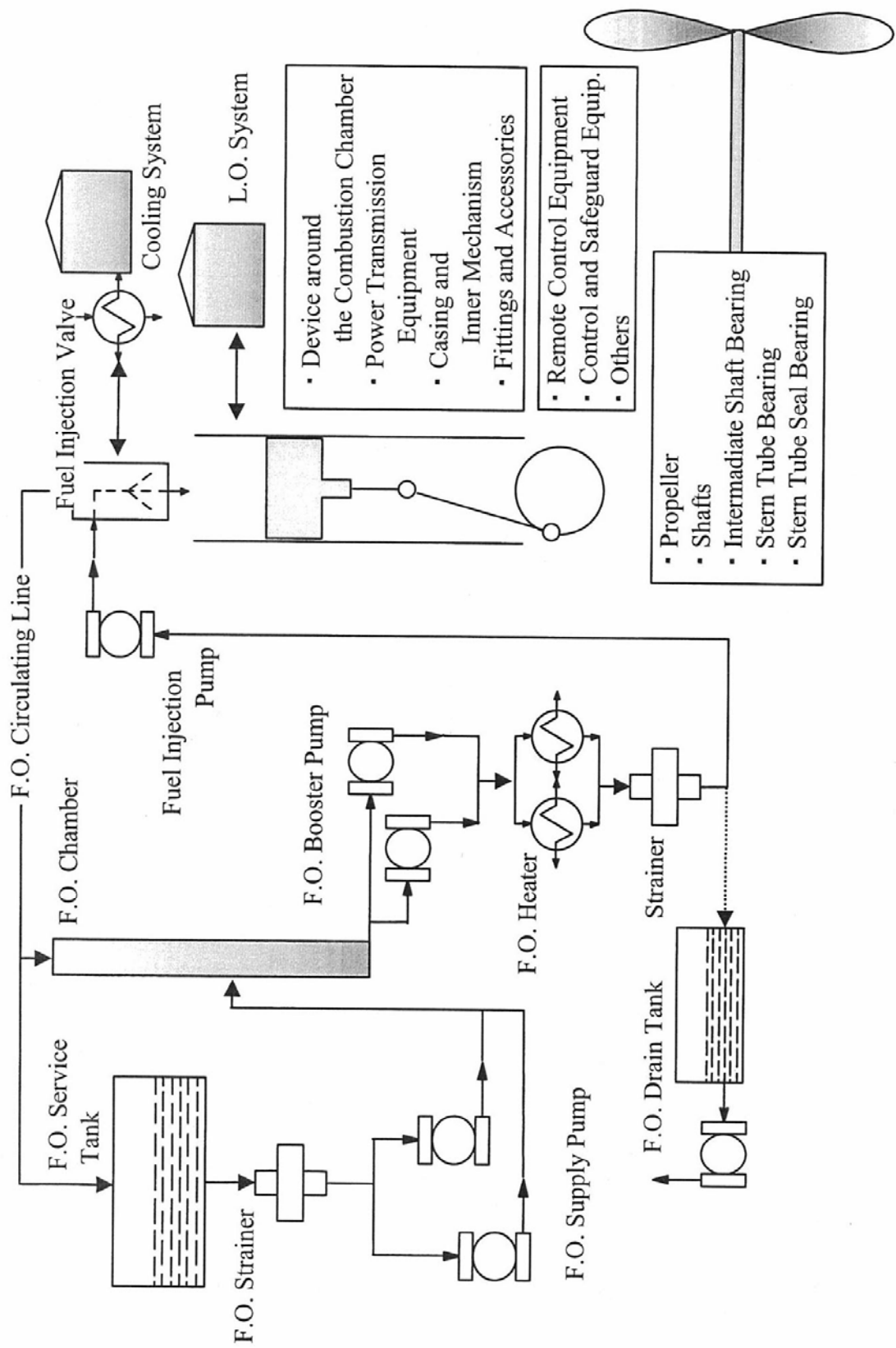


図4.4 船用機器システム信頼性モデルの概念

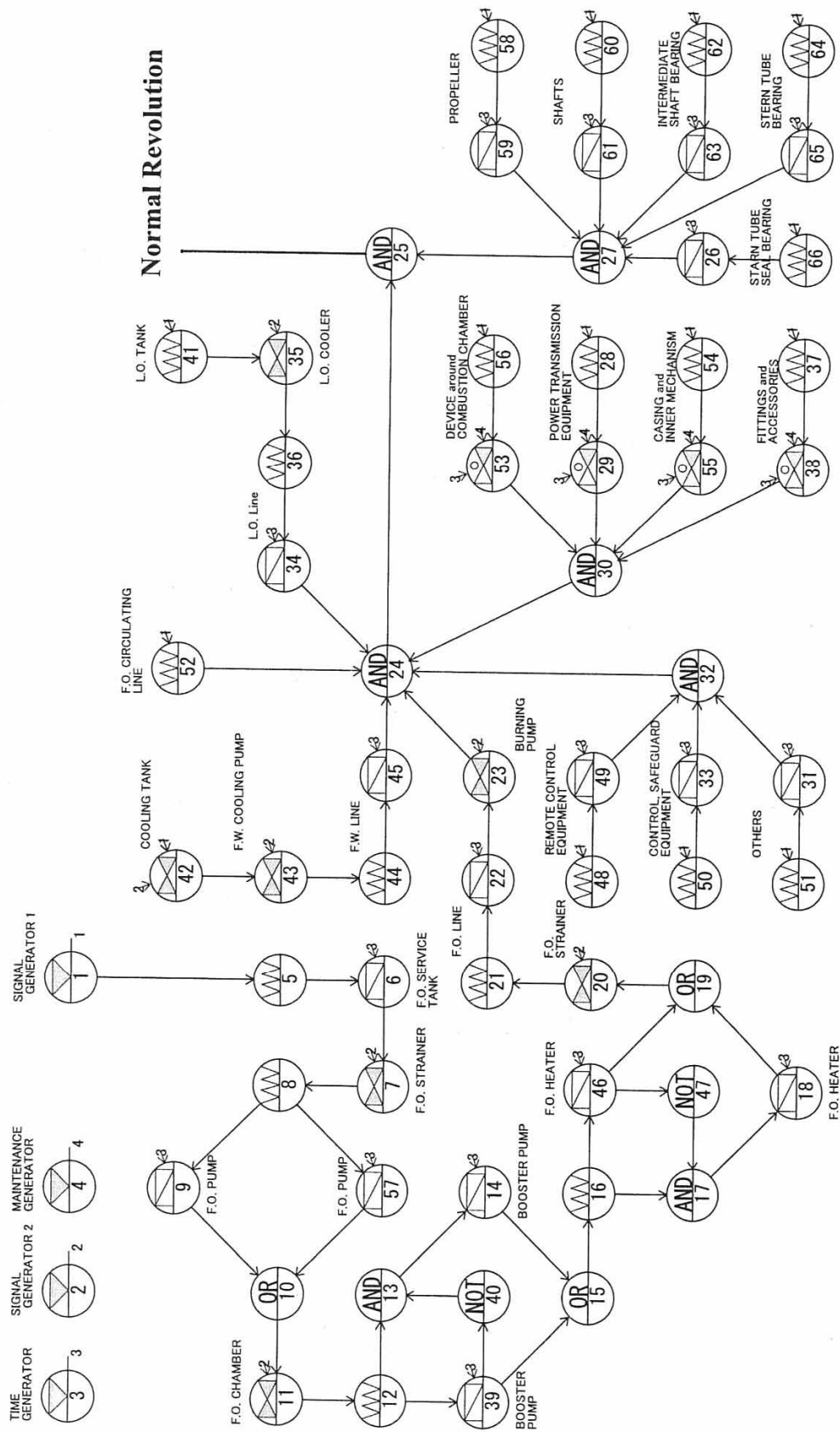


図 4.5 主機システムの GO-FLOW モデル (GO-FLOW チャート)

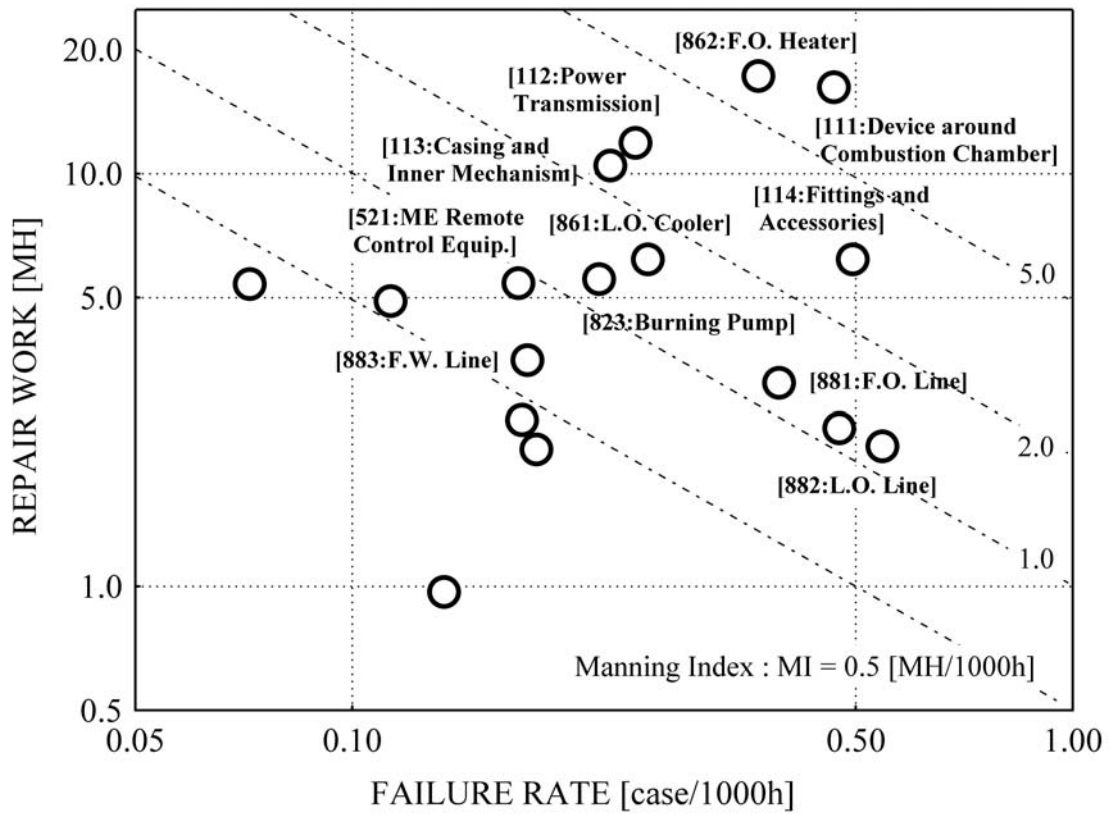


図 4.6.1 システム構成機器の信頼性データ

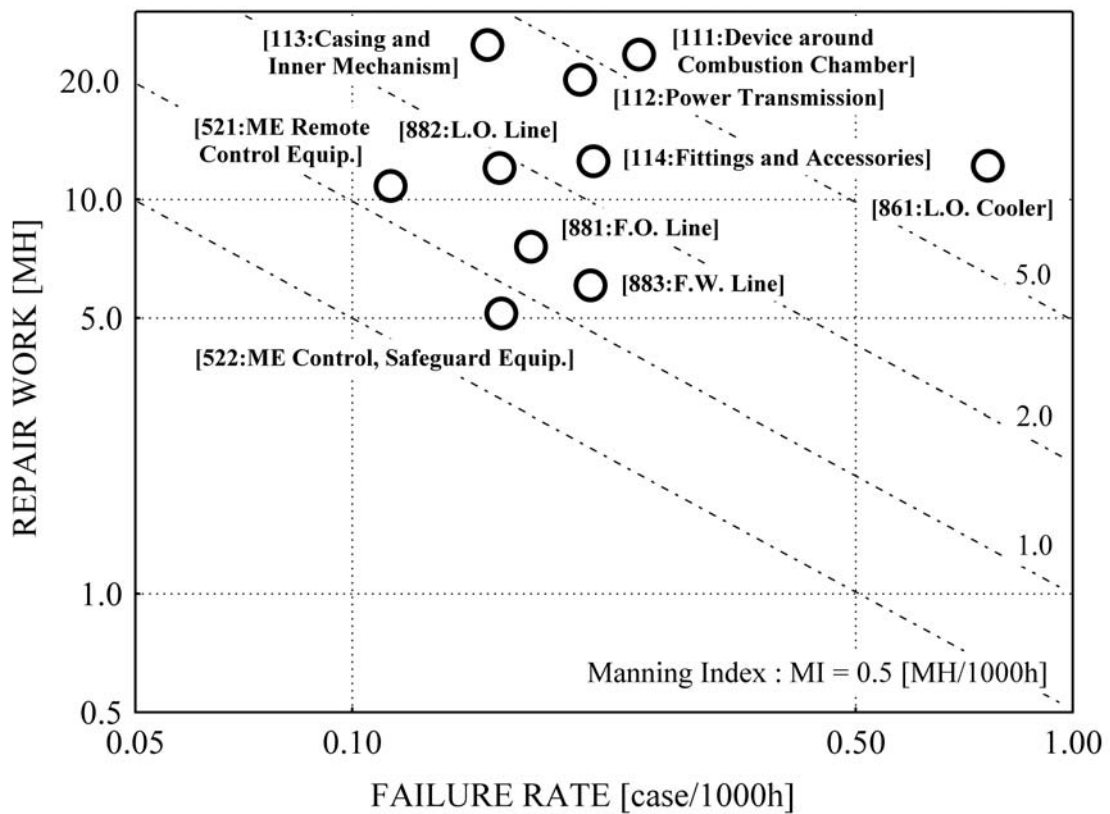


図 4.6.2 システム構成機器の信頼性データ (重故障)

表 4.1 ディーゼル主機構成機器要素の信頼性データ

Item Level 1 (機械分野分類)	Item Level 2 (機械装置分類)	Item Level 3 (機器・要素分類)	Failure Data	
			Rate[case /1000h]	Availability
1 : Main Engine	1 : Diesel Engine	1 : Device around Combustion Chamber	0.466	0.99888
		2 : Power Transmission Equipment	0.247	0.99944
		3 : Casing and Inner Mechanism	0.228	0.99947
		4 : Fittings and Accessories	0.495	0.99926

おり、表中に示したようにピストンやジャケット、シリンダカバー、燃料弁などは、[111 : 主機/ディーゼル原動機/燃焼室廻りの機器]となっている。このようにして機器毎の故障データが得られることから、船舶信頼性情報は GO-FLOW チャートを作成する上において、各オペレータにフィールド・データを背景とした実用的な故障データを提供することができるものである。

4.4 システム信頼性解析に基づく船用機器システムの安全評価

4.4.1 船用機器システムにおける機器信頼性向上の効果

構築した船用機器システム GO-FLOW モデルの各オペレータに対して前述した船舶信頼性情報に基づく信頼性データを入力して解析した結果を図 4.7 に示した。構築したシステムモデルにおいて、システムの正常運転に対する成功および故障確率はそれぞれに 1000 時間以上で上限・下限値に漸近する傾向（1000 時間運転での故障確率 0.9887）が明らかである。すなわち、この船用機器システムは 1000 時間以上の運転時間経過により構成機器のいずれかに異常が発生して系全体の正常状態の継続が阻まれることを意味するものである。また、運転時間が約 157[**Hr.**]経過によってシステムの故障確率が 0.5 となることが明らかとなった。このように GO-FLOW 手法による解析では、時間の経過とシステムの信頼性が定量的に表現され評価の対象とできる点に大きな有効性と可能性を持つものである。

図 4.6 と表 4.1 から明らかなように、主機システムの GO-FLOW モデルを構成する機器要素はそれぞれに固有の故障特性を持つものであるが、故障率と配員指数においてディーゼル主機に関わる 4 機器要素が特に高い値を示している。系としての故障確率は各要素の故障確率のブール代数和であることから、これらの機器の故障がシステム全体に対しても大きな影響を与えていることが明かである。すなわち、故障率に注目するならば、[111：燃焼室廻りの機器]故障などの主機系機器故障が高い値を示している。またアベイラビリティにおいては、他と比較して低い値となっている。従って、これらの機器の高信頼度化が主機関連サブシステム全体の安全性向上に寄与することは明らかであり、保全作業の効率化や高度化によるアベイラビリティの向上もまた同様である。そこで、GO-FLOW 手法が持つモデルの設定変更が容易である特性を利用して、故障率や稼働率が向上した場合のケース・スタディを実施した。

信頼性向上を想定したケース・スタディの設定条件としては、オペレータの故障率の最大値を 0.3[**case/1000h**]にすることを採用した。これは、図 4.6.1 において機器の大別を考え、故障しやすい機器の故障率を比較的故障し難いグループの水準まで高めることによって、信頼性を向上させると同時に副次的にアベイラビリティも向上した状況を想定したものである。解析の結果は図 4.8 に示したように、定量的には当然の結果として個々の機器の信頼性向上はシステム全体の故障確率の低下に反映しているが、経過時間の表現を含めて定量的な評価が可能である点に GO-FLOW 手法の有効性が明かである。すなわち、この事例において解析対象モデルとして採用したシステムを構成する各機器の故障率の最大値を 0.3[**case/1000h**]とするならば、システム全体の故障確率の低下は運転 240 時間の時点で約 9[%]の信頼性向上結果として表れることが明かとなった。また図 4.9 に示したように、重故障データ導入の場合にはシステムの正常運転継続が阻まれる確立は 0.9434 であることが明かとなった。ここで重故障データによる故障確率とは、現実に主機の停止や減速が船用機器故障の発生を起因として生ずる可能性を示したものである。

船用機器個々の信頼性向上がシステム全体にもたらす効果を定量的に評価すること

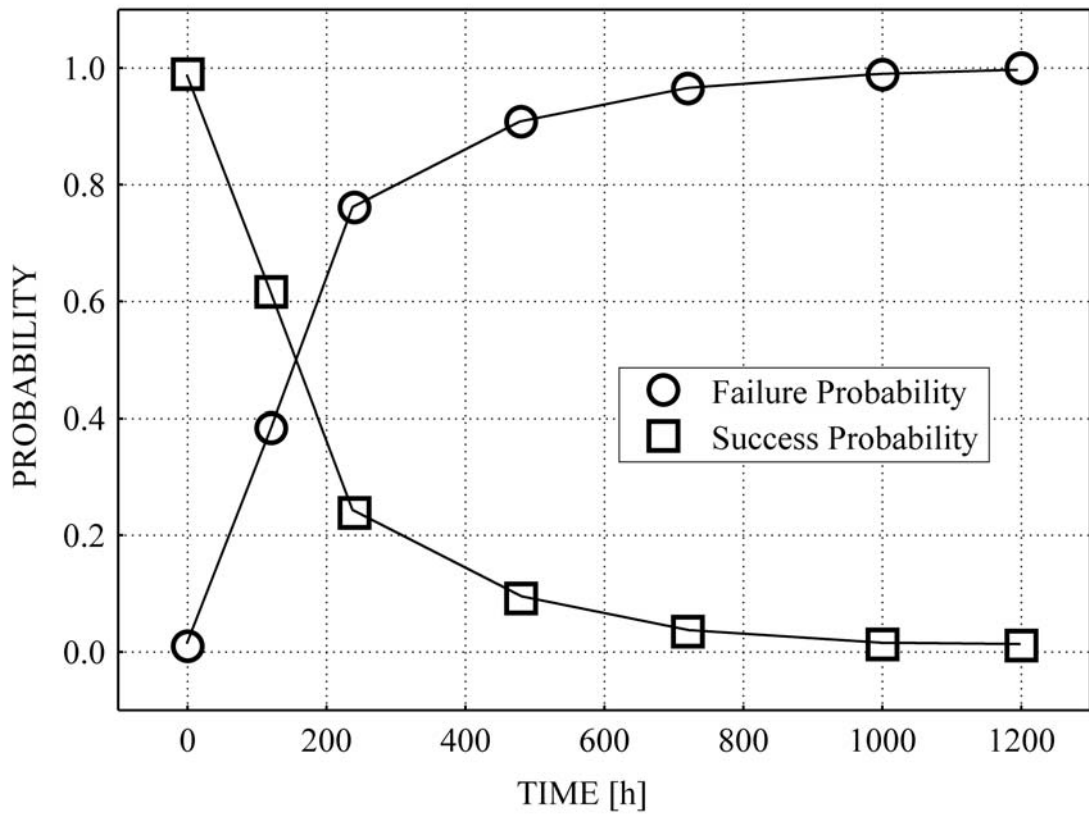


図 4.7 船用機器システム・モデルの安全評価結果

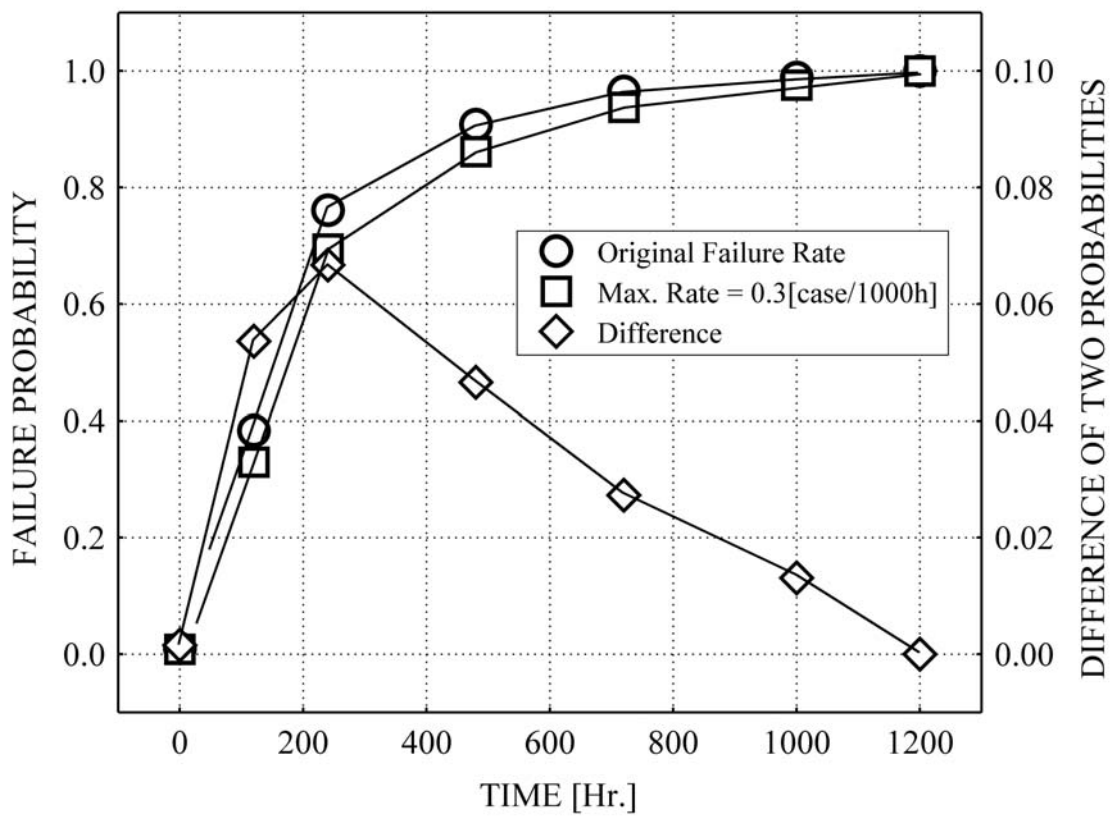


図 4.8 機器信頼性向上に基づくシステムの安全評価結果

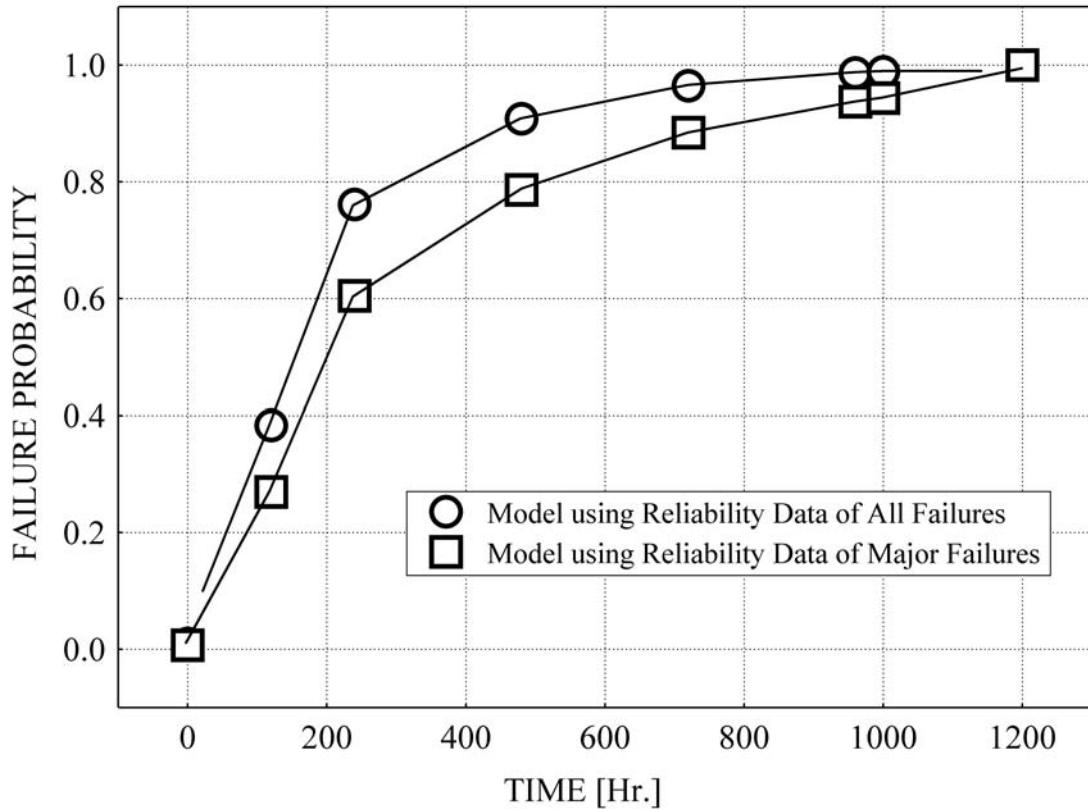


図 4.9 重故障発生によるシステムの安全評価結果

は、搭載機器の選択と船舶の安全の関わりを明らかにする上で実利的にも大きく役立つことから、このような適用に対して GO-FLOW 解析の持つ可能性は高いものと指摘できる。例えば、新たな機器の搭載計画など対してモデルによる設置効果や影響の評価など、種々の適用が期待されるものである。しかし、コストなどの経済的な要素を考慮するならば、主機系機器などの大幅な信頼性向上は決して容易なことではない社会状況であることも事実である。従って、修復率の向上によってもたらされるアベイラビリティの向上によるシステムの安全確保などに視点を置くことなども現実的な選択のひとつであると考えられる。換言するならば、定量的なシステムの故障発生確率の評価を導入した戦略的で効率的な保全計画の立案である。また、設計段階での定量的なシステム信頼性解析の可能性を考えるならば、設定された全体システムの信頼性実現のためにどの程度の機器を選択すべきかなどの判断や事前評価にも有効なものと考えられる。

4.4.2 船用機器システムにおける冗長系の効果

多くのシステムには、安全性向上を目的として重要機器の機能確保のために多重化による冗長系の設置があり、当然の事ながら船舶の主機システムにも導入されている。船舶の場合、推進機能の喪失は最も致命的な状態であることから、個々の機器における異常や故障発生があったとしても主機停止へと影響することがないように冗長系が

考えられている。従って、主機システム全体の信頼性を評価するためには、冗長系に対する検討が不可欠の要件と考えられる。

ここで、一般的な冗長系を整理するならば、以下に示すように分類⁽¹⁷⁾される。

- (1) 常用冗長系：並列に結合されて機能分担により冗長性を維持する。
 - ① 並列冗長系
 - ② m/n 冗長系
- (2) 待機冗長系：故障発生まで予備機として待機状態にあり、故障発生後機能する。
 - ① 熱予備冗長系
 - ② 温予備冗長系
 - ③ 冷予備冗長系

システムの信頼性評価において、冗長系の正確な評価はシステム全体評価の精度を大きく左右する要素であることから、GO-FLOW モデリングにおいても重要な要素である。そこで、GO-FLOW 手法による冗長系表現の検討を目的として図 4.10 に示す機器 (Valve と Meter) の冗長系を GO-FLOW モデルによって表現して解析を行い、GO-FLOW によるモデルを図 4.10 に示し、解析結果を図 4.12 に示した。冗長系の表現は図 4.10 左側の OR ゲートによるものが並列冗長系となるものであり、右側の NOT+AND ゲートによるものが待機冗長系に対応するものである。解析は2つの機器 (Valve と Meter) が、それぞれの冗長方式により直列にある場合、そして機器のモデル化をタイプ 35 および 37 オペレータで行った場合である。タイプ 37 オペレータの場合には、タイムポイント毎に保全効果に対応する運転経過時間制御による機能復帰の副入力を与えることができるが、ここでは保全実施の設定を行っていない。

比較の対象として冗長系を設置しない場合、すなわち機器が直列一列に繋がれたモデルの故障確率変化を示したが、図 4.12 に示されたように冗長系設置による故障確率軽減の効果は明かである。しかし、タイプ 37 オペレータによる待機冗長系モデルでは機器の運転に関わりなく時間経過と共に設定故障確率によって故障が進展することから、結果として OR ゲートによる並列冗長系と短い時間経過では大差ないものとなるが、タイプ 35 オペレータを用いた NOT+AND ゲートによる場合は運転状態を評価するため待機冗長系が成立し、故障確率を軽減する効果が顕著となっている。このように待機冗長系による安全性向上の効果は

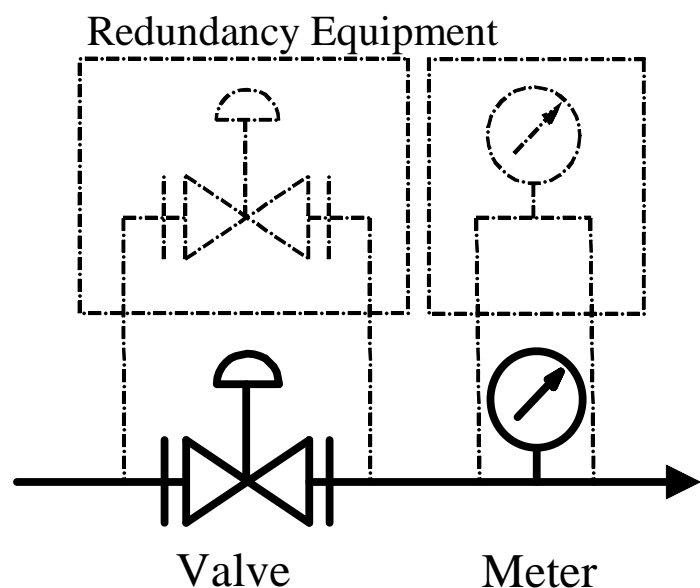


図 4.10 冗長系設置の概念

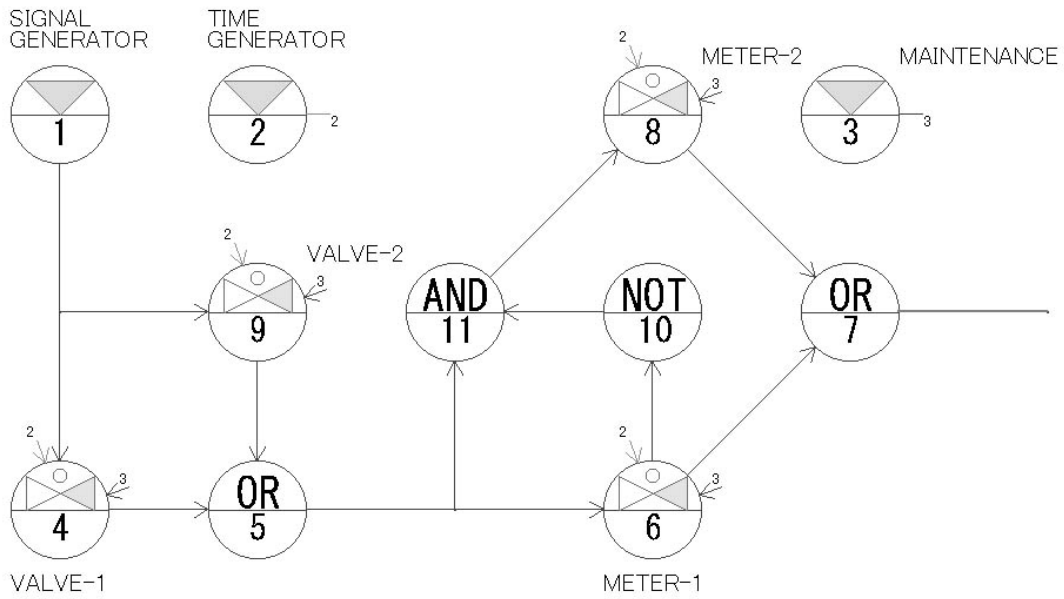


図 4.11 冗長系の GO-FLOW モデリング

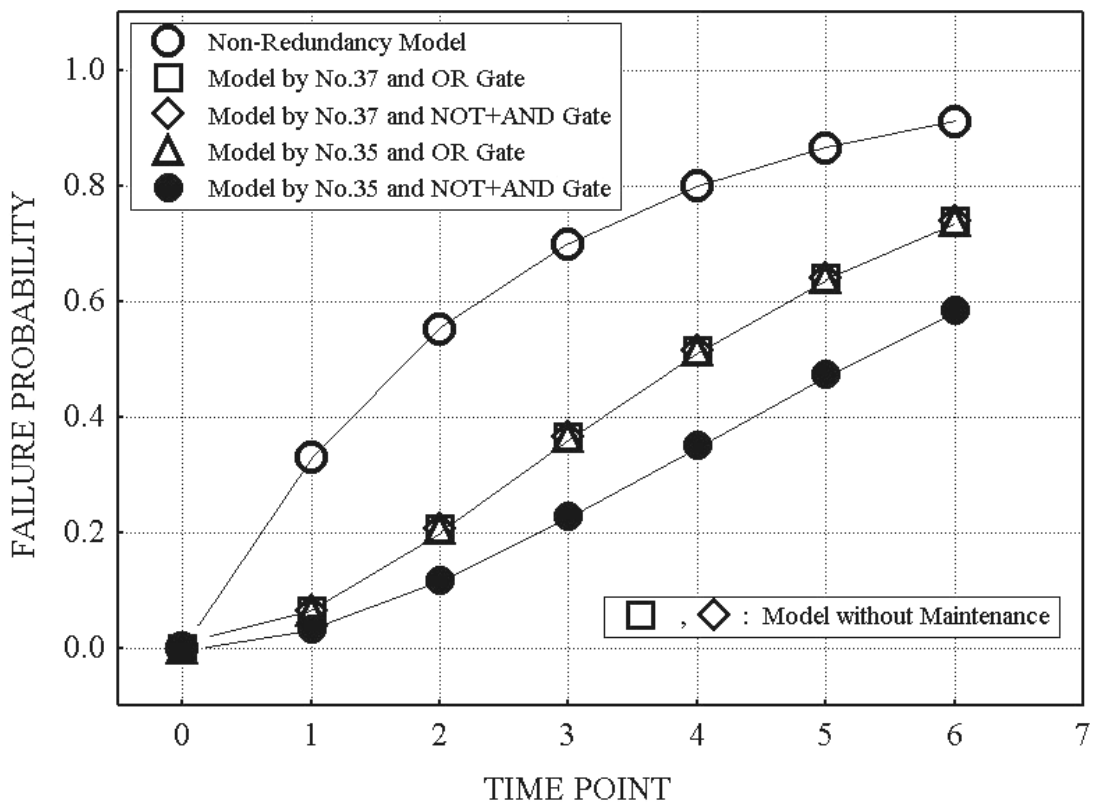


図 4.12 冗長系 GO-FLOW モデリングによる安全評価結果

明かとなったが、視点を変えるならば冗長系の定量的評価を可能にする GO-FLOW 手法の有効性を示したものである。

図 4.5 に示したように解析対象として考えた船用機器システムの GO-FLOW モデルに設定した冗長系は、燃料油移送ポンプとブースター・ポンプそして加熱装置の 3 装

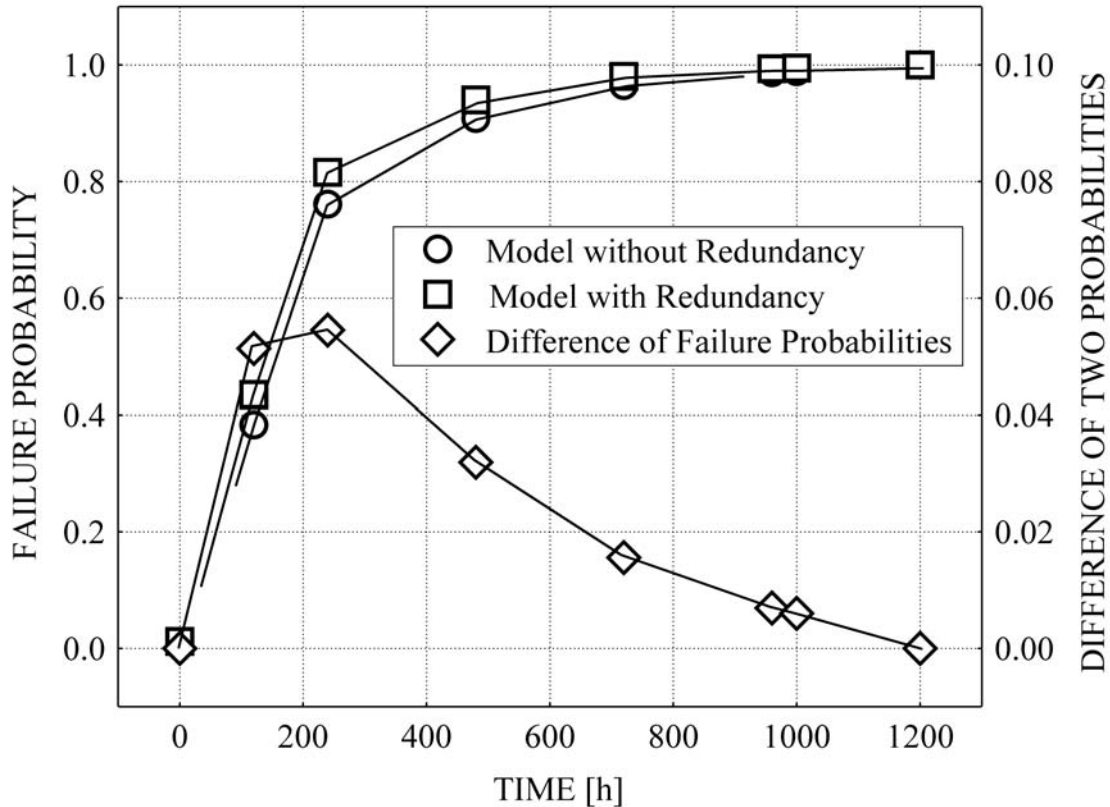


図 4.13 冗長系設置の効果

置であり、タイプ 35 オペレータを用いた NOT+AND ゲートによる待機冗長系を想定したが、プログラム上の制限により燃料タンクからの移送ポンプについては待機冗長を並列冗長としてモデル化した。

構築した船用機器システムのモデルを対象として GO-FLOW 手法による冗長系設置効果解析を実施した結果を図 4.13 に示す。特に船用機器システム自体の信頼性を評価すると共に冗長系設置の効果を明らかにすることを主眼として解析を実施した。図に示されたように、主機システムの正常運転に対する故障確率は運転 1000 時間以上で上限値に漸近する。すなわち、主機システムは 1000 時間以上の運転時間経過により構成機器のいずれかに異常が発生して系全体の正常運転の継続が阻まれることを意味している。また冗長系設置の効果は、運転 240 時間経過時点で故障確率を約 6.7[%] 低減する結果として表われている。しかし現実には、当然のことながら保全の実施があり、系としてのシステムの故障を防止するべく適切な保全がシステムにとって弱点となる機器に対して施されることによって、系全体の故障確率を安全水準に保つようにされていることは言うまでもない。検討した冗長系の評価は、機械系機器のみならず、電気電子系機器においても重要な課題である。特に自動化が進められた最新の船舶において電気電子系機器が運航の中核となることは明らかなことであり、重要機器の冗長化の効果とコストとの関係を判断するためにも定量的な安全評価が持つ意義は高いものである。

4.4.3 GO-FLOW モデルにおける保全作業の表現と効果

保全計画立案の視点から考えるならば、限りのある配員資源を有効に活用するためにも機器の信頼性とメンテナンス効果を定量的に評価することが重要であり、特にモデルの条件設定が容易な GO-FLOW 手法による確率論的安全評価実施の有用性は明かである。言うまでもなく、船舶信頼性情報から得られる故障発生データは故障保全のみならず通常の一般保全作業実施の上に発生した故障の情報に基づくものであり、換言するならば現状の保全作業が故障発生に対する完全な予防の役割を果たすまでに至っていないことを示したものである。当然の事ながら、故障ゼロの実現は困難なことではあるが、より効果的な保全計画立案は実施されなければならない。従って、定量的な保全の評価を実施することが重要と考えられる。

保全の効果を評価するために、図 4.5 に示した船用機器システム GO-FLOW チャートにおいて、主機サブシステムを解析対象としてタイプ 37 オペレータによって表現した GO-FLOW モデルを解析した結果を図 4.14 に示した。

保全実施の効果はタイプ 37 オペレータの副入力機能を利用し、実経過時間に応じて生ずる故障確率の増大が保全の実施により軽減されることを、いわば若返り効果として捉えて見掛けの経過時間を再入力することによって与えるものである。採用したモデルでは、それぞれの各タイムポイントにおける運転時間を副入力機能によって 1/2 および 1/3 復帰させることによって、保全実施によるこの若返り効果を表現したものである。換言するならば、これは時間経過による劣化を考慮したものであるが、

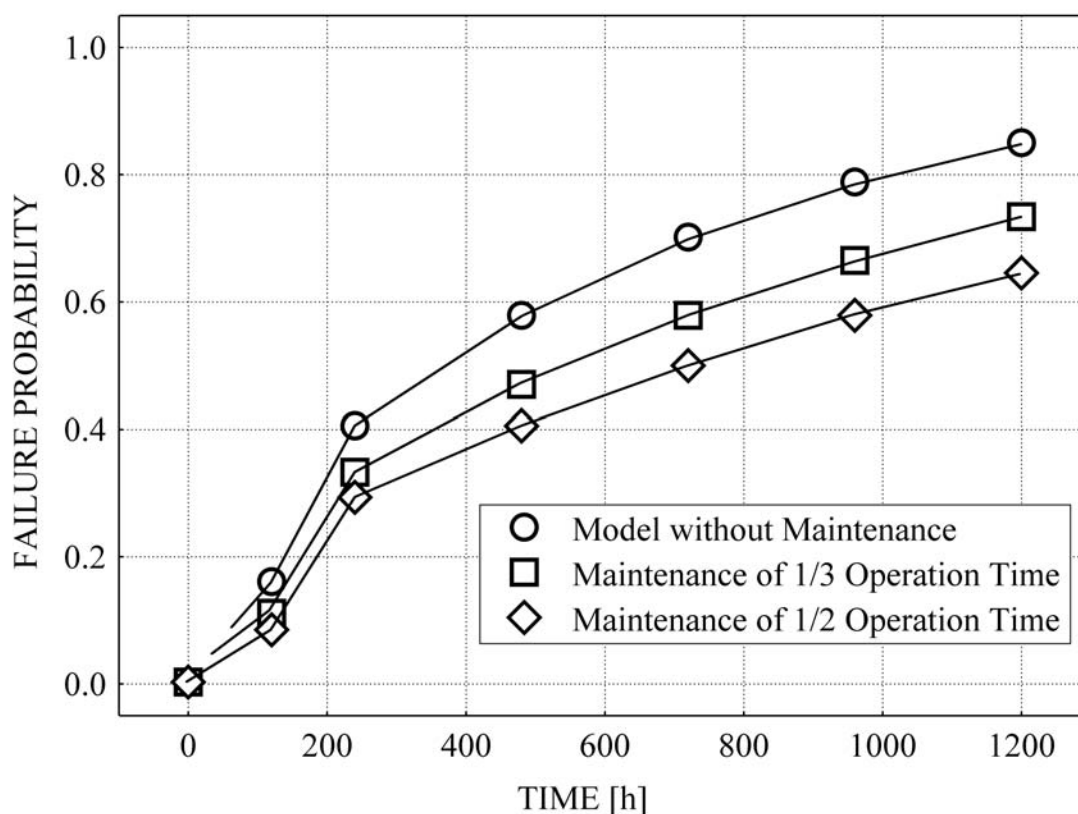


図 4.14 主機サブシステムにおける保全の効果

例え保全作業において部分取り替えが行われても他との関連を考慮するならば、完全なゼロ・リセットはない、すなわち運転開始時の初期状態には復帰しないと考えたものである。

図に示されるように保全の効果は明かであり、運転時間 1/2 復帰の保全実施効果は運転 1000 時間において約 26[%]の故障確率軽減の結果として表われている。従って逆に言うならば、GO-FLOW 手法を用いることによって系全体の目標故障確率に対して必要な保全水準を推定することも可能となるのである。

4.5 結言

船舶をひとつのシステムとして定量的な信頼性評価を実施することは本研究の主眼とするものである。特にフィールド・データをバックグラウンドとした信頼性データに基づき、PSA の立場より GO-FLOW 法により船舶をモデル化して評価を実施した例は稀有なものであると同時に、実利的にも高い価値を持つものと考えられる。本章において実施した GO-FLOW 手法によるシステム信頼性解析は、対象システムの安全評価をタイムポイントにおける故障確率として動的な定量的評価を実施できる点に優れた特徴を持っており、またモデルの修正や評価が容易であることは作業の効率性を高めるばかりでなく、システムを構成する機器や装置個々の信頼性とシステム全体との関わりや効果を評価する上で役立つものである。従って、システム全体の安全水準を前提とした設計段階での機器の選択余地の判断や事前評価などへの応用も可能であり、より現実的なシステム評価手法としての可能性は高いものと考えられる。

システムを構成する機器要素個々の信頼性向上がシステム全体に与える効果や冗長系設備の設置効果、更には保全作業の効果に視点を置いた解析・評価を実行したが、特に冗長系の評価は、機械系機器のみならず電気電子系機器においても重要な課題となっている。自動化が進められた船舶において電気電子系機器が運航の中核となることは明らかなことであり、その効果とコストとの関係を判断するためにも定量的な安全評価が持つ意義は高いものと考えられる。また保全計画立案の視点から考えるならば、限りのある配員資源を有効に活用するためにも機器の信頼性とメンテナンス効果を定量的に評価することが重要であり、確率論的安全評価の有用性は明かである。

コストなどの経済的な要素を考慮するならば、主機系機器などの大幅な信頼性向上は決して容易なことではない社会状況であることも事実であるが、例えば修復率の向上によってもたらされるアベイラビリティの向上によるシステムの安全確保などに視点を置くことなども現実的な選択のひとつであると考えられる。換言するならば、定量的なシステムの故障発生確率の評価を導入した戦略的な保全計画の立案である。また、設計段階での定量的なシステム信頼性解析の可能性を考えるならば、設定された全体システムの信頼性実現のためにどの程度の機器を選択すべきかなどの判断や事前評価にも有効なものと考えられる。

GO-FLOW 手法を用いて船用機器システムの信頼性評価を実施した結果を整理するならば、以下の通りである。

- (1) 巨大プラントや大規模システムの安全評価においては、個々の機器の信頼性評価と共に系全体を考えたシステム信頼性評価が必要であり、定量的なアプローチとしての確率論的安全評価の実施が重要である。
- (2) GO-FLOW 手法は、システム信頼性解析の手段として対象システムのモデリングや解析の容易さからひじょうに有効な解析手段となる。
- (3) 船舶の推進プラントを構成する船用機器システムを定義して GO-FLOW 解析を実施した結果、運転 1000 時間経過によるシステム構成機器のいずれかに故障が発生する確率は 0.9887 であり、故障確率 0.5 は運転経過時間で約 157[h]である。

また、主機の停止や減速をもたらす重故障率を導入した場合、運転 1000 時間経過におけるシステムの正常稼働維持を阻害する確率は 0.9434 である。

- (4) GO-FLOW 手法を用いることによって、システムの部分改善の効果や影響を定量的評価として運転経過時間を含めた表現により得ることができる。
- (5) 船用機器システム構成機器の最大故障率を 0.3[case/1000h]に設定した場合、システム全体の安全性向上に反映して運転 240 時間におけるシステムの故障確率は約 9[%]減少する。
- (6) 船用機器システムの安全評価においては、故障率に加えてアベイラビリティをモデル化することによって、船内予防保全作業の効果を評価することが重要である。
- (7) GO-FLOW 手法を用いることによって、システムの冗長系設置の効果や影響を定量的評価として、運転経過時間を含めた表現により得ることができる。
- (8) 主機システムに冗長系を設定した場合、運転 240 時間におけるシステムの故障確率は約 7[%]減少する。
- (9) 保全作業実施の効果は、GO-FLOW 手法において機器毎の運転時間の復帰表現によって評価することができる。
- (10) 運転時間 1/2 復帰によって表現された保全実施の効果は、運転 1000 時間において約 26[%]の故障確率軽減の結果として表われる。

第4章の参考文献：

- (1) 日本造船振興財団・シップアンドオーシャン財団・運輸省海上技術安全局：「船舶信頼性調査委員会報告書」、(1982.7)、(1983.3～1992.3)
- (2) 井上威恭監修：「FTA 安全工学」、日刊工業新聞社 (1979.4)
- (3) 栗原謙三：「信頼性工学テキスト」、日本理工出版 (2000.10)
- (4) 日本信頼性学会編：「信頼性ハンドブック」、日科技連出版社 (1997.4)
- (5) 塩見弘他：「FMEA、FTA の活用」、日科技連出版社 (2001.2)
- (6) 阿部俊一：「システム信頼性解析法」、日科技連出版社 (1987.4)
- (7) W. V. Gately and R. L. Williams : GO Methodology Overview、EPRI NP-765 (1978)
- (8) 松岡猛：「確率論的安全評価のためのシステム信頼性解析方法の研究」、船舶技術研究所報告、運輸省船舶技術研究所 (1988)
- (9) 松岡猛、小林道幸：「原子炉システムの信頼性解析手法 GO-FLOW の開発研究」、船舶技術研究所報告 Vol.31 No.6、船舶技術研究所 (1994)
- (10) 松岡猛：「システム信頼性解析手法 GO-FLOW」、CRC 総合研究所 (1996.3)
- (11) 松岡猛：「システム信頼性解析手法 GO-FLOW」、日本造船学会誌 No.837、日本造船学会 (1999)
- (12) シップアンドオーシャン財団：「FTA 故障解析」、pp.69-76、船舶信頼性調査委員会報告書 (1984.3)
- (13) シップアンドオーシャン財団：「FTA 法による信頼性解析」、pp.66-71、船舶信頼性調査委員会報告書 (1992.3)
- (14) 桐谷伸夫：「船舶信頼性情報を利用したフォールトツリー・モデルと GO-FLOW 解析の検討」、日本船用機関学会誌、Vol.33 No.4 pp.287-293 (1998)
- (15) 桐谷伸夫：「GO-FLOW 手法による船用主機システムの信頼性評価」、安全工学協会誌、安全工学協会 (2002.2)
- (16) 桐谷伸夫：「GO-FLOW 手法による船用機器システムの確率論的安全評価」、マリンエンジニアリング学会誌、マリンエンジニアリング学会 (2002.3)
- (17) 増田昭彦：「冗長構成設計法」、信頼性ハンドブック、pp.162-167、日科技連 (1997.4)
- (18) 松岡猛他：「確率論的安全評価法とその海洋分野への応用 —タイタニック号事故を例として—」、平成 11 年度船舶技術研究所講演会講演集、船舶技術研究所 (1999.11)
- (19) T.Matsuoka, N.Mitomo and H.Matsukura : "A Reliability Analysis of Man-Machine System (Holdup Tank System) by GO-FLOW", Proceedings of International Topical Meeting, PSAM-V (2000.11)
- (20) 大和祐幸：「安全を確立をとおして見る —船舶の確率論的安全評価手法について—」、数学セミナー Vol.40 No.6/477 pp.45-51、日本評論社(2001.6)

5章 総括

本研究は、船用機器の信頼性解析と評価の実施を目的として船舶信頼性調査の総括を含め、フィールド・データ収集計画立案から実施、データベース・システムの構築、更には情報解析まで過程をまとめたものである。従来、このような調査が船社の枠を超えて実施されることは困難であった。従って、いわば業界横断的にほぼ 20 年の長期にわたり実施された船舶信頼性調査は、画期的なものであると同時に世界にも他に例を見ないものである。また集積された情報が、データベース・システムと言う形ある成果としてまとめ上げられたことは、信頼性情報の利用技術におけるひとつの可能性を具現化したものであり、実証例としての価値も十分に高い。しかし、このシステムが一朝一夕に構築されたのではない事を特記したい。すなわち、アンケート形式によるフィールド・データ調査は回答者の多大な協力が必須であり、この協力が得られなければデータベース・システム構築は単なるフレーム・ワークとなり、情報解析は虚構のものとなるからである。この観点において、本研究において実施された船舶信頼性調査と船舶信頼性情報データベース・システム構築は大きな意義を持つものである。船舶信頼性調査は 20 世紀と共に終焉を迎えるに至ったが、これまでに果たした役割は社会的にも学術的にも十分に大きなものであった。また、行政への貢献としてもまた種々の成果をあげてきたことは忘れることのできないものである。

本研究は、船舶信頼性調査に基づく評価として船用機器の信頼性及び安全運航について 1982 年から 1999 年までの長期間にわたる調査・解析の成果をデータベース・システム構築を含めてまとめたものであり、その過程は以下の 3 段階に整理できる。

- (1) 第 1 段階：フィールド・データ調査計画の立案と実施、
及びデータベース・システムの設計と構築（第 2 章）
- (2) 第 2 段階：船用機器信頼性情報の統計解析の実施と評価、
及び数理解析の実施と評価（第 3 章）
- (3) 第 3 段階：フィールド・データに基づく信頼性情報を導入したシステム
信頼性解析の実施と評価（第 4 章）

第 1 段階における成果は、フィールド・データの集積と船舶信頼性情報データベース・システム (SRIC Database System) の構築であり、最新のシステムはパーソナル・コンピュータをハードウェアとして汎用 RDB エンジンにより駆動される高機能なデータベース・システムとなっている。しかし初期設計が 20 年前のコンピュータ技術が未成熟であった時代のものであった事などにより、内部データ構造には過去の来歴にとらわれた制約も数多く残っている。従って、システムとして現在の技術や設計思想を充分に取り入れることが実現できなかった。このような状況を省みると共に情報通信技術の発展を考慮して、船用機器の信頼性に関わるデータベース・システムの将来像を展望するならば、ネットワーク型の故障監視・診断システムの要素として機能すると同時に予測保全計画立案までを実行するシステムが考えられる。

第 2 段階においては、構築された船舶信頼性情報データベース・システムに集積整

理された約 11 万 4700 件に及ぶ船用機器の故障と警報発生に関わる情報を対象とした解析と評価を実施した。調査期間における船用機器の故障発生状況の動向を要約するならば、1982 年以降、船舶において故障の発生は減少傾向を示して推移し半減に至ったものと指摘できる。この間に船舶を取り巻く環境変化には、主機の低質油使用への移行や少人数化・混乗化など、厳しいものばかりがあったことを考慮するならば、これまでの信頼性向上への取り組みは十分に評価できるものであるが、他面において原因の明らかな清浄機故障などが未だに多発している現状があることも事実である。少人数化による配員資源減少の運航条件の中で、保全作業をいかに効率的に実施するかが課題となっていることを認識して、予防保全から更に進めて予測保全との最適組み合わせを考えた RCM (Reliability Centered Maintenance) の導入が船舶の安全運航実現に対して重要な要件となっている。故障の発生が船舶の安全運航の実現に及ぼす影響には、機器の機能喪失によって発生する不安全状態だけでなく、限られた配員資源を故障修復に投資する事によって副次的に発生する不安全状態もあることを考えるならば、より効率的で戦略的な RCM の実施が必要である。

近年、船用機器の故障発生割合で増加が見られるものは電気電子系機器の故障である。船舶の自動化や近代化は、搭載電気電子系機器の増大を意味するものであることから、これらの機器に対する信頼性向上が求められている。特に電気電子系機器が船舶運航の中核機能を果たすようになってきていることから、冗長系設置などを含めた取り組みが必要である。また、電気電子系機器故障に対する修復処置作業時間が比較的大きな状況を考慮するならば、信頼性向上や多重化のみならず陸上支援性などを導入したディペンダビリティの確立が必要となっている。

第 3 段階では、船舶をひとつの大規模システムとして捉える事を前提として、システム信頼性解析の観点より解析と評価を実施した。特にシステム全体の持つリスクを定量的に評価する確率論的安全評価 (PSA : Probabilistic Safety Assessment) を実施する事を目的として、GO-FLOW 手法を用いた解析を実施した。本研究で対象としたモデルは、主機燃料油の流れに注目して構築したものであり、推進動力プラントを構成する船用機器システムを想定したものである。

GO-FLOW モデリングにおいて各機器に導入した信頼性データは、船舶信頼性情報の解析から得られたものである。すなわち、フィールド・データに基づく信頼性データを設定したモデルを構築したものであり、より現実的な定量的システム評価として高い可能性を持つものと考えられる。従って既存システムを対象とした評価に止まらず、システム全体の安全水準を前提とした設計段階での機器の選択余地の判断や事前評価などへの応用も可能であることが明かとなった。また保全計画立案の視点から考えるならば、限りのある配員資源を有効に活用するためにも機器の信頼性とメンテナンス効果を定量的に評価することが重要であり、この点において GO-FLOW 手法はモデルに保全効果が容易に導入できるなどの優れた性能を持つ事から大規模システムの確率論的信頼性評価の有効な手段であることが明かとなった。

船舶を対象とした確率論的信頼性評価の観点より GO-FLOW 手法による定量的信頼性評価例は未だ数少なく、加えてフィールド・データに基づいた信頼性データを導入した事例も希少なものであり、本研究において初めて実施されたものである。

謝辞

船舶信頼性調査がほぼ 20 年の長きにわたり継続できたことは、繁忙な日常業務に加えて調査の実務に御協力を頂いた数多くの方々の御協力によるものである。データ解析者として、調査票の記入者氏名欄に感謝することしかできずに日々心苦しく感じるばかりであった。船舶信頼性調査研究の総括として、第一にこれらの方々に心よりの謝意を表すものである。

本研究に携わることになった契機は、船舶技術研究所システム技術部元部長の村山雄二郎氏のお計らいによるものであり、その御厚情に厚く御礼を申し上げる次第である。また、村山氏の後任としてシステム技術部長に就任された伊藤泰義氏には本論文をまとめることの意義を御教示頂く伴に種々の貴重な御助言を頂き、心よりの感謝の意を表します。船舶技術研究所システム技術部元安全信頼性研究室長の金井康二氏には信頼性研究を遂行するにあたり多大な御厚情と御指導を頂いたことに深く感謝申し上げます。さらには、現システム技術部長の松岡猛氏には数々のお取計らいとシステム信頼性解析に関わる御教授や GO-FLOW 手法についての御指導を頂いたことあらためて謝意を表します。

海技大学校城戸八郎先生には、船用機器や搭載設備に関する貴重な御助言や資料の御提供を頂いたことに御礼申し上げます。

本論文の執筆に際して御指導を頂いた神戸商船大学西川榮一教授、西田修身教授そして今井昭夫教授に厚く御礼申し上げます。

本研究の遂行ならびに本論文の執筆に際して、神戸商船大学橋本武教授より終始変わらぬ温かい御指導を頂戴したことに心よりの感謝の意を表します。

主な記号

SRIC	; 船舶信頼性データベース・システムの通称名
DB	; データベースの略称
RDB	; リレーショナル・データベース・システムの略称
EWS	; ワークステーションの略称
GUI	; グラフィック・ユーザー・インターフェースの略称
Item	; 船舶信頼性調査における機器大分類（機械分野別）、Item1～9,N の 10 区分
Level	; 船舶信頼性調査における機器分類の階層的な深さ、Level1～4 の 4 階層
IT	; Information Technology の略称で、インターネット技術などの最新情報技術を示す。
RCM	; Reliability Centered Maintenance の略称で、事後保全と予防保全そして予測保全、さらにはこれらの最適な組み合わせを実施する保全概念。
BtoC	; 企業と顧客の関係におけるビジネスモデル (B2C)
BtoB	; 企業間のビジネスモデル (B2B)
LAN	; Local Area Network の略称
λ	; Failure Rate 故障率 [case/1000h]
μ	; Repair Rate 修復率 [1/h]
MTBF	; Mean Time Between Failure の略称で、平均故障間隔。
MTTR	; Mean Time To Repair の略称で、平均修理時間。
mh	; 保全作業量を示すもので、投入作業人員と投入時間の積 [man*hour:MH]。
Rm	; 故障修復保全作業への投入人員 [man]
Rt	; 故障修復保全作業への投入時間 [hour]
MI	; Manning Index 配員指数 [MH/1000h]
MR	; Manning Resource 配員資源の略称で、船舶において保全作業に投資可能な人的時間的資源の概念。
A	; Availability アベイラビリティ
Z	; 区分判別指標値（否定される前提において Z_0 ）
Fs	; Unreliability 不信頼度
Rs	; Reliability 信頼度
PSA	; Probabilistic Safety Assessment 確率論的安全評価
FTA	; Fault Tree Analysis フォールト・ツリー解析
ETA	; Event Tree Analysis イベント・ツリー解析

資 料

資 料 目 次

1.	船舶信頼性情報に基づく舶用機器の信頼性	1
2.	船舶信頼性情報機器コード表	14
3.	船舶信頼性調査調査票（航海記録、故障及び警報発生状況）	31

故障機器のコード表 (Code Table of Failure Equipment) : A/U 4-2 Form

ITEM 1	ITEM 2	ITEM 3	ITEM 4
1 主機 Main engine	1 ディーゼル 原動機 Diesel engine	1 燃焼室回りの機器 Device around the combustion chamber	1 ジャケット及びライナ Jacket and liner 2 ピストン Piston 3 シリンダ・カバー Cylinder cover 4 燃料弁 F.O valve 5 安全弁 Safety valve 6 起動弁 Starter valve 7 排気弁 Exhaust valve 8 指圧器弁 Indicator valve 9 パッキン又はリング Packing or ring 0 その他 Others
		2 動力伝達装置 Power transmission equipment	1 クランク軸及び軸受 Crank journal & bearing 2 クランクピン及び軸受 Crank pin and bearing 3 クロスヘッド及び軸受 Crosshead and bearing 4 各種歯車及びチェーン Gears and chain 5 各種カム軸及びカム Cam shafts and cam 6 動弁機構 Driving valve gear 7 原則装置及びカップリング Reduction gear and coupling equipment 8 ピストンロッド Piston rod 0 その他 Others
		3 ケーシング、 内部機構 Casing and inner Mechanism	1 ケーシング Casing 2 掃気室 Scavenging room, valve and pump 3 ランタン機構 Lantern device 4 ピストン冷却装置、テレスコ機構 Piston cooling and telescopic device 0 その他 Others

故障機器のコード表 (Code Table of Failure Equipment) : A/U 4-2 Form

1 主 機 Main engine	1 ディーゼル 原動機 Diesel engine	4 付属機器 Fittings and Accessories	1 调速機 Governor 2 過給機及び補助ブローア Turbo changer and aux, blower 3 燃料ポンプ F.O injection pump 4 燃料高圧管及び同継手 F.O injection pipe and flange 5 空気冷却器 Air inter cooler 6 シリンダ注油器 Cylinder oil lubricator 0 その他 Others
	2 タービン 原動機 Steam turbine	1 高圧タービン H.P turbine 2 低圧タービン L.P turbine 0 その他 Others	1 タービン・ロータ及び動翼 Turbine rotor and blade 2 蒸気室及びケーシング防熱 Steam chamber and insulated casing 3 仕切板及び蒸気ノズル Diaphragm and nozzle 4 ジャーナル軸受 Journal bearing 5 スラスト軸受 Thrust bearing 6 各種パッキン Packings 0 その他 Others
		3 減速装置 Reduction gear equipment	1 各種歯車 Gears 2 各軸受 Bearings 3 注油装置 Lubricating-oil device 4 各種継手 Couplings 0 その他 Others

故障機器のコード表 (Code Table of Failure Equipment) : A/U 4-2 Form

<p>1 主 機 Main engine</p>	<p>2 タービン原動機 Steam Turbine</p>	<p>4 付属機器 Fittings and accessories</p>	<p>1 调速器 Governor 2 抽気逆止弁 Bleeder valve 3 前後進ノズル弁・ケーシング AH,AS maneuvering valve, and casing 4 グランド蒸気管制弁 Gland steam control valve 5 直結潤滑油ポンプ Lub. Oil pump coupled with M/E 0 その他 Others</p>
<p>2 ボイラ Boiler</p>	<p>1 主ボイラ Main boiler 2 補助ボイラ Aux,boiler 3 排ガス エコノマイザ Exhaust gas economizer</p>	<p>1 ボイラ本体 Boiler</p>	<p>1 ドラム Drum 2 過熱器 Super heater 3 各チューブ Tubes 4 チューブプレート Tube plate 5 安全弁 Safety valve 6 肌付弁及び cocks Boiler attached valve and Cock 7 缶水関係 (ゲージグラス及び諸弁) Boiler water instrument; e.g.gauge glass andvalves 8 各種パッキン及びケーシング防熱 Packings and insulated Casing 0 その他 Others</p>
		<p>2 付属装置 Fittings and accessories</p>	<p>1 空気予熱器 Air preheater 2 送風機 Forced draft fan 3 低圧蒸気発生器 L. P. steam generator 4 スート除去装置 Soot cleaning devices (制御装置は自動化機器を参照) Control device refers to ode No.535.</p>

故障機器のコード表 (Code Table of Failure Equipment) : A/U 4-2 Form

<p>2 ボイラ Boiler</p>	<p>1 主ボイラ Main boiler</p> <p>2 補助ボイラ Aux,boiler</p> <p>3 排ガス エコノマイザ Exhaust gas economizer</p>	<p>2 付属装置 Fittings and accessories</p>	<p>5 填熱装置 Burning device (A.C.C は自動化機器を参照) A.C.C. refers to Code No. 533.</p> <p>6 自動給水加減弁 (本体) Feed water control valve (only body)</p> <p>0 その他 Others</p>
<p>3 発電 源動機 Generator Engine</p>	<p>1 ディーゼル 原動機 Diesel engine</p>	<p>1 燃焼室回りの機器 Device around the combustion chamber</p>	<p>1 ジャケット及びライナ Jacket and liner</p> <p>2 ピストン Piston</p> <p>3 シリンダ・カバ Cylinder cover</p> <p>4 燃料弁 F.O valve</p> <p>5 安全弁 Safety valve</p> <p>6 起動弁 Starting valve</p> <p>7 給気弁及び排気弁 Suction and exhaust Valve</p> <p>8 指圧器弁 Indicator valve</p> <p>9 パッキンまたはリング Packing or ring</p> <p>0 その他 Others</p>
		<p>2 動力伝達装置 Power transmission equipment</p>	<p>1 クランク軸及び軸受 Crank journal and Bearing</p> <p>2 クランクピン及び軸受 Crank pin and bearing</p> <p>3 各種歯車 Gears</p> <p>4 カム軸およびカム Cam shaft and cam</p> <p>5 動弁機構 Driving valve gear</p> <p>6 ピストンロッド Piston rod</p> <p>0 その他 Others</p>

故障機器のコード表 (Code Table of Failure Equipment) : A/U 4-2 Form

3 発電 原動機 Generator engine	1 ディーゼル 原動機 Diesel engine	3 ケーシング及び 内部機構 Casing and inner mechanism	1 ケーシング Casing 0 その他 Others
		4 付属機器 Fitting and accessories	1 调速器 Governor 2 過給機及びブロワ Turbo changer and blower 3 燃料ポンプ F.O injection pump 4 燃料高圧管及び同継手 F.O injection pipe and Flange 5 空気冷却器及び潤滑油 冷却器 Air inter cooler and L.O Cooler 6 シリンダ注油器 Cylinder oil lubricator 7 潤滑油ポンプ及び冷却ポンプ L. O pump and F. W cooling pump 8 各種管及び弁 Pipes and valves 0 その他 Others
	2 タービン 原動機 Steam turbine	1 タービン本体 Turbine	1 タービン・ロータ及び動翼 Turbine rotor and blade 2 ケーシング及びノズル Casing and nozzle 3 各種軸受 Bearings 4 各種パッキン Packings 0 その他 Others
		2 減速装置 Reduction gear equipment	1 各種歯車 Gears 0 その他 Others
		3 付属機器 Fittings and accessories	1 调速器 Governor 2 各種弁及びコック Valves and cocks

故障機器のコード表 (Code Table of Failure Equipment) : A/U 4-2 Form

3 発電 源動機 Generator engine	2 タービン原動機 Steam turbine	3 付属機器 Fittings and accessories	3 直結潤滑油ポンプ Lub. oil pump coupled with T/G 0 その他 Others
	3 非常用 ディーゼル 原動機 Emergency diesel engine	1 本体 Diesel engine	0 その他 Others
		2 付属機器 Fittings and accessories	0 その他 Others
4 電気機器 Electric equipment	1 電気装置 Electric equipment	1 発電機 Generator 2 電動機 Motor	1 固定子 Stator 2 回転子 Rotor 3 軸及び同継手 Shaft and coupling 4 軸受 Bearing 5 ブラシレス励磁機 Brushless exciter 0 その他 Others
		2 電気装置 Electric equipment	1 各種配電盤 Switch boards 2 始動器 Starter 3 自動動機投入装置 Auto synchronizing device 4 自動負荷分担装置 Auto load sharing device 5 静止形励磁機 (自動式) Static exciter
		6 トランス Transformer	1 本体 Body

故障機器のコード表 (Code Table of Failure Equipment) : A/U 4-2 Form

<p>4 電気機器 Electric equipment</p>	<p>2 電気装置 Electric equipment</p>	<p>7 電線 Electric cable 8 電気器具 Electric apparatus</p>	<p>2 導体 Conductor 3 被覆部及び絶縁部 Sheath and insulation 0 その他 Others</p>
<p>5 自動化機器 I Control equipment</p>	<p>1 全般 General</p>	<p>1 データログ Date logger 2 モニタ Monitor 3 コンピューター Computer 4 アナシエータ Annunciator 5 自動記録装置 (アナログ) Auto. recorder 6 火災探知装置 Fire detector 7 延長警報装置 ExTension alarm Devices 0 その他 Others</p>	<p>1 電源回路 Electric source circuit 2 リレー、タイマ Relay and timer 3 プリント版、電子部品 Printed board and electric component 4 駆動機械部、制御モータ Link motion and control Motor 5 配線ターミナル、コネクタ Wiring terminals and connector 6 警報、表示装置 (ブザーランプ,同回路) Alarm parts and indicator 7 指示計 Indicator 8 センサ Sensor 0 その他 Others</p>
	<p>2 主機 Main engine 3 ボイラ Boiler 4 ディーゼル発電 原動機 Diesel generator engine 5 ターボ 発電原動機 Turbo generator engine 6 主軸系機器 Shafting equipment</p>	<p>1 遠隔操縦装置 Remote control equipment 2 制御・保護装置 Control and safeguard equipment 3 自動燃焼 制御装置 A.C.C 4 自動給水制御装置 F.WC 5 スート除去装置 Soot cleaning device 0 その他 Others</p>	<p>1 自動切換装置 Auto. Change-over device 2 リンク機構駆動機器 Control device of link motion 3 空気系統機器 Control device of air and Pneumatic line 4 電気制御機器 Electric control apparatus 5 作動油系統機器 Control device of Hydraulic oil line 6 蒸気系統機器 Control device of steam line 7 燃料系統機器 Control device of fuel oil line 8 潤滑油系統機器 Control device of lub. Oil line 0 その他 Others</p>

故障機器のコード表 (Code Table of Failure Equipment) : A/U 4-2 Form

<p>5 自動化 機器 I Control equipment</p>	<p>2 主機 Main engine 3 ボイラ Boiler 4 ディーゼル 発電原動機 Diesel Generator engine 5 ターボ 発電原動機 Turbo generator engine 6 主軸系機器 Shafting equipment</p>	<p>9 監視装置 Monitor</p>	<p>1 指示計 Indicator 2 電気系統機器 Electric apparatus 3 温度センサ Temperature sensor 4 圧力センサ Pressure sensor 5 液面センサ Level sensor 6 塩分センサ Salinity sensor 7 フレーム・アイ Flame eye 8 スモーク・インディケータ Smoke indicator 0 その他 Others</p>
<p>6 自動化 機器 II Control equipment</p>	<p>1 ポンプ Pump 2 空気圧縮装置 Air Compressor 3 清浄機 Purifier 4 熱交換機 Heat Exchanger 5 造水装置 Distiller 6 諸管弁 Pipes and Valves 7 廃油焼却炉 Incinerator 8 甲板補機 Deck machinery 9 タンク Tank A 係船装置 Mooring Machinery B 揚貨装置 Cargo handling machinery 0 その他 Others</p>	<p>1 制御保護装置 Control and safeguard equipment 0 その他 Others</p>	<p>1 自動切換装置 Auto, change-over device 2 リンク機構駆動機器 Control device of link motion 3 空気系統機器 Control device of air and pneumatic line 4 電気系統機器 Electric control apparatus 5 作動油系統機器 Control device of hydraulic oil line 6 蒸気系統機器 Control device of steam line 7 燃料系統機器 Control device of fuel oil line 8 潤滑油系統機器 Control device of lub. Oil line 0 その他 Others</p>

故障機器のコード表 (Code Table of Failure Equipment) : A/U 4-2 Form

<p>6 自動化 機器Ⅱ Control equipment</p>	<p>1 ポンプ Pump 2 空気圧縮装置 Air compressor 3 清浄機 Purifier 4 熱交換機 Heat Exchanger 5 造水装置 Distiller 6 諸管弁 Pipes and Valves 7 廃油焼却炉 Incinerator 8 甲板補機 Deck machinery 9 タンク Tank A 係船装置 Mooring machinery B 揚貨装置 Cargo handling machinery C 油濃度計 Oil content meter 0 その他 Others</p>	<p>9 監視装置 Monitor</p>	<p>1 指示計 Indicator 2 電気系統機器 Electric apparatus 3 温度センサ Temperature sensor 4 圧力センサ Pressure sensor 5 液面センサ Level sensor 6 塩分センサ Salinity sensor 7 フレーム・アイ Flame eye A 濃度センサ Oil content sensor 0 その他 Others</p>
<p>7 主軸系 機器 Shafting equipment</p>	<p>1 主軸系機器 Shafting equipment</p>	<p>1 プロペラ Propeller 2 各軸 Shafts 3 中間軸受 Intermediate shaft bearing 4 船尾管軸受 Stern tube bearing 5 船尾管シール装置 Stern tube seal device 6 ターニング装置 Turning gear device 0 その他</p>	<p>1 本体 Body 0 その他 Others</p>

故障機器のコード表 (Code Table of Failure Equipment) : A/U 4-2 Form

8 補機 I Miscellaneous equipment	1 ポンプ Pump	1 冷却清水ポンプ F.W. cooling pump 2 復水ポンプ Condensate pump 3 ドレインポンプ Drain pump 4 缶水循環水ポンプ Boiler water circulating pump 5 給水ポンプ Feed water pump 6 蒸留水ポンプ Distilling pump 7 ブラインポンプ Brine pump 8 主 (補) 循環水ポンプ Main (Aux.) circulating pump 9 冷却海水ポンプ S.W. cooling pump	1 ケーシング Casing 2 軸受 Bearing 3 インペラ、マウスリング、スリーブ Impeller, mouth ring and sleeve 4 ピストン、同リング、同ロッド Piston, ring and rod 5 メカニカルシール Mechanical seal 6 各種パッキン Packings 0 その他 Others
	2 ポンプ Pump	1 海水 サービスポンプ Sea water service pump 2 消防・雑用ポンプ Fire and G.S. pump 3 噴燃ポンプ Burning pump 4 燃料移送ポンプ F.O. transfer pump 5 ビルジポンプ Bilge pump 0 その他のポンプ Others	1 ケーシング Casing 2 軸受 Bearing 3 インペラ、マウスリング、スリーブ Impeller, mouth ring and sleeve 4 ピストン、同リング、同ロッド Piston, ring and rod 5 メカニカルシール Mechanical seal 6 各種パッキン Packings 0 その他 Others
	3 ポンプ駆動用 タービン Steam turbine for driving pump (苛油、バラスト ポンプ装置は 甲板補機参照)	1 給水ポンプ用 タービン Steam turbine for feed water pump 0 その他 Others	1 调速機 Governor 2 ジャーナル及びスラスト軸受 Journal bearing and thrust bearing 3 注油管及び孔、潤滑油冷却器 Lubricating tube and nozzle, L.O. cooler 4 ラビリンス・パッキン Labyrinth packing 0 その他 Others

故障機器のコード表 (Code Table of Failure Equipment) : A/U 4-2 Form

8 補機 I Miscellaneous equipment	4 空気圧縮機 Air compressor	1 主空気圧縮機 Main air compressor 2 補助圧縮機 Aux. air compressor 3 制御用 空気圧縮機 Control air compressor 0 その他 Others	1 安全弁 Safety valve 2 吸・吐出弁 Suction and delivery valve 3 自動弁 Un-loader valve 4 弁及びコック Valve and cock 0 その他 Others
	5 清浄機 Purifier	1 D.O.清浄機 D.O. purifier 2 F.O.清浄機 F.O. purifier 3 L.O.清浄機 L.O. purifier	1 フリクションライニング、 クラッチ継手 Friction lining and clutch 2 各種軸受け Bearings 3 歯車 Gear 4 ボール Bowl 5 弁シリンダ及びノズル Cylinder valve and nozzle 6 バルブ及びコック Valve and cock 7 温調弁 Temperature control valve 0 その他 Others
	6 熱交換機 Heat exchanger	1 主機潤滑油冷却器 L.O. cooler for M/E 2 ボイラ燃料加熱器 F.O. heater for boiler 3 主復水器 Main condenser 4 大気圧復水器 Atomos. condenser 5 給水加熱器 Feed water heater 6 緩熱器 Desuperheater 7 ドレンクーラ Drain cooler 8 タンク クリーニング加熱器 Tank cleaning heater 9 ディ・オイラ冷却器 Deoiler cooler 0 その他 Others	1 冷却管及び加熱管 Cooling and heater pipe 2 各種パッキン Packings 3 付属弁及びコック Fitting valve and cock 0 その他 Others

故障機器のコード表 (Code Table of Failure Equipment) : A/U 4-2 Form

8 補機 I Miscellaneous equipment	7 造水装置 Distiller	1 本体 Body	1 加熱器 Heater 2 冷却管 Cooling water tube 3 弁及びコック Valve and cock 0 その他 Others
		2 付属装置 Fittings and accessories (各ポンプはポンプ の項参照)	0 その他 Others
	8 諸管弁 Pipes and valve (制御機器は自 動化機器参照)	1 燃料油系統 F.O. line 2 潤滑油系統 L.O. line 3 清水系統 F.W. line 4 海水系統 S.W. line 5 蒸・排気系統 Steam and exhaust steam line 6 空気系統 Air line 7 排ガス系統 Exhaust gas line 8 給水・缶水・ 復水系統 Feed water, boiler water and condensate water line 9 ビルジ系統 Bilge line 0 その他 Others	1 管 Pipe 2 フランジ及び継手 Flange and joint 3 弁及びコック Valve and cock 4 ストレーナ Strainer 5 パッキン Packing 0 その他 Others

故障機器のコード表 (Code Table of Failure Equipment) : A/U 4-2 Form

<p>8 補機 I Miscellaneous equipment</p>	<p>1 甲板補機 Deck machinery (制御機器は自 動化機器参照)</p>	<p>1 糧食冷凍機及び 糧食庫 Provision refrigerator and chamber 2 冷房用冷凍機 Air conditioning refrigerator 3 貨物冷凍機 Cargo refrigerator 4 冷凍コンテナ Refrigerating container 5 イナート・ガス・ システム Inert gas system 6 操舵機 Steering engine 7 荷油ポンプ及び バラストポンプ Cargo oil, ballast pump and turbine A 原油洗浄システム Crude oil washing system 0 その他 Others</p>	<p>1 本体 Body 2 その他 Others</p>
	<p>A 係船揚貨装置 Mooring and cargo handling machinery (制御機器は自 動化機器参照)</p>	<p>1 ウインドラス Windlass 2 ムアリング Mooring 3 スラスター Thruster 4 カーゴクレーン Cargo crane 5 カーゴウィンチ Cargo winch 6 ポンプユニット Pump unit 0 その他 Others</p>	<p>1 本体 Body 2 その他 Others</p>

故障機器のコード表 (Code Table of Failure Equipment) : A/U 4-2 Form

<p>8 補機 I Miscellaneous equipment</p>	<p>0 その他 Others</p>	<p>1 空気除湿装置 Dehydrater (Control air dryer) 2 廃油焼却炉 Incinerator A A/C ブレンダー A/C blender B 通風機 (ホールドファン、 エンジンルーム ファン) Ventilating fan (Hold fan, engine room fan) C 防食・防汚装置 (鉄イオン発生器及 び M.G.P.S) Anti corrosion and Anti fouling control system (Ferrous ion generator, M.G.P.S) E 缶水・清水処理装置 (薬品注入装置) Boiler water, Fresh water Treatment system 0 その他 Others</p>	<p>1 本体 Body 2 その他 Others</p>
<p>8 補機 II Miscellaneous equipment</p>	<p>1 燃料油系統 タンク Tank of F.O. line</p>	<p>1 F.O.ドレンタンク F.O. drain tank 2 F.O.スラッジタンク F.O. sludge tank 3 F.O.セーブオール タンク F.O. saveall tank 4 燃料弁冷却水・油 タンク Fuel valve cooling tank 5 A 油、C 油、ボイラ セツトリングタンク Settling tank of diesel oil, fuel oil and boiler fuel oil 6 A 油、C 油、ボイラ サービスタンク Service tank of diesel oil, fuel oil and boiler fuel oil 0 その他 Others</p>	<p>1 本体 Body 2 ヒーティングコイル Heating coil 3 ゲージグラス Gauge glass 4 フロート Float 5 弁及びコック Valve and cock 6 各種パッキン Packings 0 その他 Others</p>

故障機器のコード表 (Code Table of Failure Equipment) : A/U 4-2 Form

<p>8 補機 II Miscellaneous equipment</p>	<p>2 潤滑油系統 タンク Tank of L.O. line</p>	<p>1 主機潤滑油 重力タンク Gravity tank for M/E 2 過給機潤滑油 重力タンク Gravity tank for turbo charger 3 ターボ発電原動機 サンプタンク Sump tank for turbo generator engine 4 シリンダ油 重力タンク Cylinder oil Gravity tank 5 弁腕注油タンク L.O. tank of rock arm 6 主機、発電原動機 L.O. ドレンタンク L.O. drain tank for M/E and D/G engine 7 清浄機 L.O. スラッジタンク Sludge tank for purifier 8 船尾管軸受重力 及びサンプタンク Gravity and sump tank for stern tube bearing 0 その他 Others</p>	<p>1 本体 Body 2 ヒーティングコイル Heating coil 3 ゲージグラス Gauge glass 4 フロート Float 5 弁及びコック Valve and cock 6 各種パッキン Packings 0 その他 Others</p>
--	--	---	--

故障機器のコード表 (Code Table of Failure Equipment) : A/U 4-2 Form

8 補機 II Miscellaneous equipment	3 清水、冷却水、 給水、復水系統 タンク Tank of F.W. cooling water, feed water and condensate water line	1 冷却清水 膨張タンク F.W. cooling expansion tank 2 ピストン冷却 清水タンク Piston cooling expansion tank 3 清浄機温水タンク Hot water tank for purifier 4 カスケードタンク (給水系統) Cascade tank of feed water line 5 清水圧力タンク Pressurized fresh water tank 6 蒸留水タンク Distilled water tank 7 大気圧 ドレンタンク Atmospheric drain tank 0 その他 Others	1 本体 Body 2 ヒーティングコイル Heating coil 3 ゲージグラス Gauge glass 4 フロート Float 5 弁及びコック Valve and cock 6 各種パッキン Packings 0 その他 Others
	4 空気系統 タンク Tank of air line	1 主空気槽 Main air reservoir 2 制御空気槽 Control air reservoir 0 その他 others	1 本体 Body 2 弁及びコック Valve and cock 3 各種パッキン Packings 0 その他 Others
	5 ビルジ系統 タンク Tank of bilge line	1 ビルジタンク Bilge tank 2 ビルジセパレータ Bilge separator 0 その他 Others	1 本体 Body 2 弁及びコック Valve and cock 3 各種パッキン Packings 0 その他 Others
	0 その他の タンク Other tank	0 その他 Others	0 その他 Others

故障機器のコード表 (Code Table of Failure Equipment) : A/U 4-2 Form

N 航海通信装置 Navigation and communication equipment	1 通信装置 Navigation equipment	1 マグネットコンパス Magnetic compass 2 ジャイロコンパス Gyro compass 3 オートパイロット Auto pilot 4 測程儀 Log equipment 5 測深儀 Sounding equipment 0 その他 Others	1 本体 (CRT ディスプレイ) Equipment (CRT display) 2 警報・表示装置 Alarm and indicator 3 電源部分 Electric source unit 4 プリント基板、電子部品 Printed board, Electronic component 5 器内配線 Wire and code in cabinet 0 その他 Others
	2 無線航法装置 Radio navigation equipment	1 レーダー Radar 2 航行衛星用受信装置 NNS receiver 3 衝突予防装置 ARPA 4 ロラン LORAN 5 デッカ DECCA 6 オメガ OMEGA 7 方向探知機 Direction finder 0 その他 Others	1 本体 (CRT ディスプレイ) Equipment (CRT display) 2 警報・表示装置 Alarm and indicator 3 電源部分 Electric source unit 4 プリント基板、電子部品 Printed board, Electronic component 5 器内配線 Wire and code in cabinet 0 その他 Others
	3 無線通信装置 Radio communication equipment	1 無線送信機 Transmitter 2 無線受信機 Receiver 3 携帯型無線機 Portable radio equipment 4 VHF 電話機 VHF telephone 5 空中線 Antenna 6 マリサット MARISAT 7 船内操船指令装置 Interior comm. system for announcement 8 非常用電源装置 Emergency source of power 0 その他 Others	1 本体 Body

航海日記録
Voyage Log

船級番号 Classification No.	次航数 Voyage No.
□□□□□□	□□□

船名 : _____
Name of Ship
記入者 : _____
Signature

航海開始 Start voyage	19□□年、□□月、□□日、□□時
航海終了 Finish voyage	19□□年、□□月、□□日、□□時

航海 Navigation Time	□□□□ 時間 Hour
停泊 Port	□□□□ 時間 Hour
累計 Total	□□□□ 時間 Hour

※ 連続した航海のそれぞれが、日単位程度で短い場合は1ヶ月程度を目安に集計したもので航海をまとめても可。
※ 故障及び警報発生の有無に関わらず航海記録の記載は実施する。

① 一連番号 Serial No.		② 発生年・月・日・時刻 Date		<u>故障及び警報発生状況</u> Failures and Alarms on Equipments				
No. □□□		19□□年、□□月、□□日、□□時						
③ 船の状況	④ 運航への影響	⑥ 発見の発端	⑦ 警報発生箇所	⑧ 故障機器	⑨ 故障機器の状態	⑩ 故障の原因	⑪ 故障の推定理由	⑫ 故障の処置
<input type="checkbox"/> 1 M0 航海中 <input type="checkbox"/> 2 非M0 航海中 <input type="checkbox"/> 3 航海中スタンバイ <input type="checkbox"/> 4 M0 停泊 仮停泊 <input type="checkbox"/> 5 非M0 停泊 仮停泊 <input type="checkbox"/> 6 入渠中	<input type="checkbox"/> 1 主機の自動停止 <input type="checkbox"/> 2 主機の手動停止 <input type="checkbox"/> 3 主機の自動減速 <input type="checkbox"/> 4 主機の手動減速 <input type="checkbox"/> A その他航海への影響 <input type="checkbox"/> B 入渠中	<input type="checkbox"/> 1 警報にて発見 <input type="checkbox"/> 2 当直中、通常見回り時発見 <input type="checkbox"/> 3 チェックリスト点検中に発見 <input type="checkbox"/> 4 船内作業時に発見 <input type="checkbox"/> 5 陸上作業時に発見	□□□ ※ コード 詳細記述 : _____	□□□□ ※ コード 詳細記述 : _____	<input type="checkbox"/> 11 亀裂、折損 <input type="checkbox"/> 12 切損、欠損 <input type="checkbox"/> 13 破口 <input type="checkbox"/> 12 変形、屈曲、剥離、膨出 <input type="checkbox"/> 13 弛緩、脱落 <input type="checkbox"/> 14 摩耗、偏摩耗 <input type="checkbox"/> 15 腐食 <input type="checkbox"/> 16 漏洩 <input type="checkbox"/> 17 汚損 <input type="checkbox"/> 18 固着 <input type="checkbox"/> 19 閉塞 <input type="checkbox"/> 20 塗膜、垢付、溶解、火災 <input type="checkbox"/> 21 電気損傷：断線 <input type="checkbox"/> 22 電気損傷：接地、短絡 <input type="checkbox"/> 99 その他、ゴースト、不明	<input type="checkbox"/> 11 振動 <input type="checkbox"/> 12 疲労 <input type="checkbox"/> 13 腐食、点食、浸食 <input type="checkbox"/> 14 劣化 <input type="checkbox"/> 15 発熱、高温 <input type="checkbox"/> 16 汚損 <input type="checkbox"/> 17 喪失 <input type="checkbox"/> 20 電氣的 <input type="checkbox"/> 99 その他原因不明	<input type="checkbox"/> 1 設計不良 <input type="checkbox"/> 2 材質不良 <input type="checkbox"/> 3 取付不良 <input type="checkbox"/> 4 工作不良 <input type="checkbox"/> 5 取扱い不良 <input type="checkbox"/> 6 設定不良 <input type="checkbox"/> 7 経年劣化 <input type="checkbox"/> 9 その他不明 <input type="checkbox"/> A 燃料油に起因するもの	<input type="checkbox"/> 1 修理、部品交換 <input type="checkbox"/> 2 開放掃除 <input type="checkbox"/> 3 調整、増締め <input type="checkbox"/> 4 予備機へ切り換え <input type="checkbox"/> 5 自然復原 <input type="checkbox"/> 6 正常状態へ(補油、補水、ビルジ排出、タンク切換) <input type="checkbox"/> 7 修理待機 <input type="checkbox"/> 9 その他、放置等
⑤ 影響時間 □□ * 10 (min.)		⑥ 修復処置作業工数 □□ (man) * □□.□ (hour)			※ 推定理由は、2つまで選択可。			
※ 「④運航への影響」による主機停止・減速時間、遅延時間等。				※ 処置に要した人数と時間。				