舶用機器の信頼性と運航への影響—II. —舶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—

桐 谷 伸 夫*

Reliability of Ship Equipment and Influence of Failures on Navigation—II. —Actual Situation of Ship Equipment Failures and Statistical Study of SRIC Information by PCA—

Nobuo KIRIYA

Abstract

SRIC is a relational database system (RDB) constructed by the some data tables and many useful functions to analyze the reliability of ship equipment. The present database system has just become a useful system included 114707 field data about the failures and alarms of ship equipment pass the long time investigation. It become clear that the average failure rate of the whole of ship equipment was 7.246 [Occ./1000Hr.] and the average work for repair was 5.0 [Man * Hr./Occ.] through the statistical analysis by using SRIC information.

This paper reports the latest results of statistical analysis by SRIC database system and the influence on the ship navigation by the failure occurrence. The principal component analysis (PCA) also was applied to clear the relation between the failure and the influence. And, the remarkable facts had been clarified through the use of the multivariate analysis.

1. はじめに

舶用機器高信頼度化への取り組みの目的は、ひとつには運航における安全の確立であり、自動化船・少人数化船の実現であった。M0船の出現以来、多くの自動化機器の開発によって船舶の少人数化は大きく促進されるものとなり、近年の厳しい国際状況を背景として船舶運航の少人数化はより一層推進されている。このような少人数化と共に進められた混乗化の流れや燃料の低質化などを考慮するならば、安全運航の実現には更なる舶用機器の高信頼度化による対応が重要と考えられる。このような観点から、「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⁽¹⁾が始められて、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長期にわたり実施されてきた。

1992年3月の最終報告書をもって調査委員会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情報資源を更に将来に繋げるために、運輸省海上技術安全局技術課を窓口として運輸省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が継続されている。この船舶信頼性調査の活動成果のひとつが船舶信頼性情報データベース (SRIC Database system) の構築である。SRICは、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として構築されたものであり、

* 正会員 国土交通省船舶技術研究所 (〒181-0004 東京都三鷹市新川6-38-1)

集積された船用機器に関する警報発生や故障発生などの信頼性データは、他に例を見ることのない膨大なものとなっている。また最新のコンピュータ技術を導入することにより、データベースとしても高機能で使い勝手の良いシステムとなっている。

本論は、最新の船舶信頼性情報データベースによって得られる信頼性情報を用いて、船用機器故障の発生状況の評価と故障発生によって本船にもたらされる不安全要因の検討を行うものである。前報⁽²⁾においては特に頻出する機器故障に注目して、故障発生によって本船にもたらされる影響を人的時間的損失の側面から評価すると同時にクラスタリングを解析手法として船用機器故障が内包する特性を明らかにすることを目的とした。本論では対象機器の絞り込みを緩和して、より多くの機器における発生故障の特性を多変量によって評価することを目的とした主成分分析を実施した。

2. 船舶信頼性情報による信頼性評価

2.1 SRICデータベース・システムの現況

船舶信頼性調査委員会の活動終了以降も実施されてきた調査業務は、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、システムの更新や信頼性解析などの研究業務は継続されており、若干のデータ更新も随時行われている。前報以降追加されたデータを含めたSRICにおける船用機器の故障情報の状況（2000年8月1日現在）と全期間平均統計値を表1に示した。集積整理された信頼性データを分類するならば、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種類であり、総数は約11万4700件である。この内、船用機器の故障発生に関するデータは7万7420件であり、全体の約68%を占めている。このような膨大なフィールド・データの集積は希有なものであり、これまでも数多くの解析に供された実績を持っている。^{(3),(4),(5),(6)}

最新データにより全期間全故障データを対象として平均故障率を求めるならば、7.246 [Occ./1000 Hr.] であり、平均故障間隔 (MTBF) として表すならば、約138 [Hr.] である。また、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処置作業人数は1.8人であり、平均処置作業時間は1.7時間であることが明らかとなった。更に、個々の故障修復に投入された故障処置工数 (Man・Hour: MH) の全平均は5.0 [MH] となっている。同時に示した配員指数 (Manning Index: MI) は36.22 [MH/1000Hr.] を示している。この配員指数は、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ることから、故障に対する質と量の2つの側面を同時に表す重要な指標値である。

ここで本船舶信頼性調査で使用している平均故障率: λ を以下に示す。

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

$N(t)$: 全故障数 [Occ.]

t : 対象機器の累積動作時間 [1000Hr.]

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。

表1に示したように調査全期間を通じて解析対象とした船舶は265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別個の船舶として処理することによって空白期間がもたらす誤差の発生を軽減した。その結果、調査対象となった見かけ上の延べ船舶数は360隻である。

表1 船用機器故障発生の概況

Total Data	(Occurrences)	114707
Failure Data	(Occurrences)	77420
Ships	(Vessels)	265
Av. Failure Rate	(Occ./1000 Hr)	7.246
Av. Repair Work	(Man*Hr/Occ.)	5.0
Av. Influence Time	(Min/Occ.)	4.9
Av. Manning Index	(MH/1000 Hr)	36.22

2.2 船用機器故障の発生状況

SRICにおける故障発生機器の特定は、機能や用途、そして設置場所を考慮して分類整理された4段階 (Item1/2/3/4) の機器コードによって実施されており、第1段階Item1の機械分野分類では10系統の大分類 (Item1="1": 主機系機器~"N": 航海通信系機器) に区分されている。例えば、この主機系機器 (Item1="1") の分類は主機としてのディーゼルあるいはタービン原動機を構成する装置や機器、そして部品要素を代表した分類である。このような階層構造の考えに基づいた分類方法を採用した結果、第4段階Item4の要素分類までの機器コードによる全分類では1872要素が特定されるようになっている。このItem1レベルによる機械分野別の故障発生状況を10系統の機械分野名と共に、表2に示した。また、それぞれの故障率と故障修復処置作業工数、そして配員指数の状況を機械分野名と共に図1に示

表 2 機械分野別の故障発生状況

Equipment Category (Item Code Level-1)	Failures / Ratio [Occ.]/[%]	Failure Rate [Occ./1000Hr]	Ratio of Failure with Repair Work [%]	Repair Work [MH/ Occ.]	Ratio of Fail. with Influence [%]	Av. Inf. Time [Min/ Occ.]	Manning Index [MH/ 1000Hr]
1 Main Engine (主機系)	7048 / 9.1	0.856	85.8	10.3	26.1	142	8.78
2 Boiler (ボイラ系)	7149 / 9.2	0.834	94.8	4.9	1.9	222	4.10
3 Generator Engine (発電原動機系)	5241 / 6.8	0.704	93.9	6.3	1.7	96	4.40
4 Electric Equipment (電気系)	4129 / 5.3	0.533	89.4	3.9	1.6	91	2.09
5 Control Equipment I (自動化 I 系)	10813 / 14.0	1.135	91.8	2.2	3.8	56	2.52
6 Control Equipment II (自動化 II 系)	5119 / 6.6	0.605	95.7	2.1	0.7	79	1.26
7 Shafting Equipment (主軸系)	425 / 0.6	0.207	78.8	1.6	1.9	134	0.34
8 Miscellaneous Equip. I (補機 I 系)	33179 / 42.9	3.211	94.8	5.5	0.9	129	17.54
9 Miscellaneous Equip. II (補機 II 系)	2930 / 3.8	0.401	94.9	2.3	0.8	126	0.92
N Navi. & communication (航海通信系)	1387 / 1.8	0.721	81.0	3.6	1.1	229	2.60

図 1 機械分野別故障の故障率と作業工数

す。

Item1レベル分類における故障発生状況に注目するならば、最多発する故障は補機 I 系(Item1="8")故障であり、全発生故障の約43%を占めている。この補機 I 系区分は、油清浄機や諸管弁そしてポンプ等の機器を代表する区分であり、特に油清浄機故障の多発が顕著である。故障件数の多さに従い、故障率においても補機 I 系故障が最大となっている。故障機器に対する修復処置作業工数では、主機系("1")が最も多く、他の9機械分野系故障に比較しても明確な差異を示すものである。また、主機系故障の特徴は航海への影響を持つ故障の発生割合においても明らかである。ここで、航海への影響とは故障発生による主機の停止や減速、あるいは出港遅延

などを意味するものであり、副次的にもたらされる影響時間と共に報告されるものである。主機系故障は平均影響時間も大きく、機器の機能喪失による不安全度のみならず安全な航行を阻害する時間的な要素も大きいことが指摘されるものである。平均影響時間において最大値を示すものは主軸系("7")故障となっているが、故障率は最も低い値である。

図 1 から明らかなように、主機系故障と補機 I 系故障は故障率と修復処置作業工数において対極的な存在を示すものであるが、故障発生に対する損失は本船が潜在的に持つ人的時間的資源(配員資源: Manning Resource)を投資して実施されることを前提とするならば、配員指数において大である補機

図 2 機械分野別故障の影響時間率と作業時間率

表 3 A 航海への影響を持つ故障の発生状況

Equip. Code (Level-3)	Item Code (Level-1) Equipment Name	Item Code (Level-2) Equipment Name	Item Code (Level-3) Equipment Name	Av.Influence Time [Min./Occ.]	Failure Data [Occ.]/[%]
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 Accessoties	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	Heat 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	Remote Control Equipment	15.2	506 / 0.65

I 系故障の発生による損失がより重大と考えられる。また図 2 には、全航海時間に対する影響時間と修復処置作業時間の割合(影響時間率、作業時間率)を示した。当然の事ながら主機系故障と補機 I 系故障の特徴が明らかであるが、主軸系故障の作業時間割合の特徴もまた明確となっている。この作業時間は、スペースなどの作業環境条件による制限はあるものの、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、配員資源を含めた問題として更に検討が必要と考えられる。

3. 故障発生と安全運航への影響

3.1 故障機器と航海への影響

Item3レベルの242機器・要素を対象として故障発生の状況を求めて、平均影響時間による降順上位の結果を表 3 A 及び B に示した。表 2 や図 1, 図 2 の結果を反映して、機器・要素単位の故障発生状況でも主機系機器が平均影響時間において多数顕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。

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本船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。ま

表 3 B 航海への影響を持つ故障の発生状況

Equip. Code (Level-3)	Failure Rate [Occ./1000Hr]	Av. Repair Work [MH/Occ.]	Manning Index [MH/1000Hr]	Ratio of Influence Time [%]
111	0.466	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

た、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、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。

3.2 主機系機器故障による航海への影響

主機系機器を対象として、主機の停止や減速などの影響別に故障発生の状況を表 4 及び図 3 に示した。自動操作と手動操作の大別から見ると、手動操作をもたらした故障の場合が、故障率においても作業工数においても、自動操作の場合に比較して

表 4 影響別の主機故障の発生状況

Failure Influence on Navigation	Failure Rate [Occ./1000Hr.]	Av. Repair Work [MH/Occ.]	Manning Index [MH/1000Hr.]	Ratio of Total Inf. Time [%]
Engine Stop				
1 : Automatic Operation	0.198	17.7	3.49	0.056
2 : Hand Operation	0.288	19.7	5.68	0.081
Slow-down				
3 : Automatic Operation	0.192	9.3	1.79	0.040
4 : Hand Operation	0.210	11.2	2.36	0.062
0 : Others (Non Influence)	0.683	7.2	4.90	0.001

図 3 主機への影響別の故障率と作業工数

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。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。

4. 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、更には主機の停止や減速などの航海への影響を取り込んで評価することを目的として、主成分分析⁽⁷⁾による検討を実施した。対象とした故障データはItem3レベルの242機器・要素故障から発生件数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 4 には発生により航海への影響時間を持つ故障の割合（有影響故障割合）と修復処置作業工数の状況を対象機器毎に示した。全故障データにおける有影響故障割合が3.8 [%] であることから、図 4 における大半の機器が10 [%] 以下の有影響故障割合を示しているが、表 3 A で高い平均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、航海への影響は小さいが作業工

図 4 故障機器別の有影響故障割合と作業工数

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。これらの故障データを対象として主成分分析を行ったが、採用した説明変数は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配員指数である。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 5 に示し、対象機器毎の因子スコアの 3 次元分布を図 6 に示した。図 5 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 6 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本船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

図5 因子負荷量の3次元分布

図6 機器別因子スコアの3次元分布

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⁽⁸⁾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。

5. まとめ

海上の船舶は、固有の配員資源に基づき限られた人員と時間と装備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。従って、発生した機器故障による不安全要因を的確に評価することが必要となっている。この不安全要因とは、故障機器の機能喪失による本船への直接的な影響が第一ではあるが、人的時間的損失や主機の停止や減速による航海への影響も間接的なものとして考えなければならない。本論は、このような観点より機器故障の持つ特性を検討したものである。明らかとなった船用機器の故障特性を船舶信頼性情報の現況と共に以下に示す。

- (1) 最新のSRICデータベースは、約114,700件の船用機器信頼性フィールド・データ(故障発生データ:77420件)を持つものである。なお、平均故障率は7.246 [Occ./1000Hr.]であり、故障機器修復処置のための作業工数は5.0 [Man・Hr.]、平均配員指数は36.22 [MH/1000Hr.]である。
- (2) 最多発故障は機械分野別10分類区分における補機Ⅰ系機器故障であり、発生故障全体の約43 [%]の多数を占めるものである。
- (3) 主機系故障は修復処置作業工数が最大であり、約10 [Man・Hr.]を示す。また、主機の停止や減速を伴う故障の割合は約26 [%]である。
- (4) 主復水器故障は、航海への影響時間と配員指数の両面において大きな値を示す。
- (5) 船用機器故障は、量と質そして航海への影響に基づく説明因子によって分類・説明される。
- (6) 航海への影響をもたらす故障は主機系機器故障が主であるが、主機遠隔装置や排ガス・エコノマイザ故障なども航海への影響を大きくもたらす特性を示す。

終わりに、「船舶信頼性調査」の実施にご協力をお願いした数多くの関係者に心よりの謝意を表する。

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年7月, 1983~1992年3月。

- (2) 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, 2000年9月, 論文集 Vol. 103.
- (3) 日本信頼性学会編:「信頼性ハンドブック」, 1997年4月, 日科技連出版社。
- (4) 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」, 1985年11月, 学位論文。
- (5) H. Tamaki: 'A Ship Reliability Investigation System in Japan', Proceedings of ICMES 90, Paper3.
- (6) N. Kiriya: "A Database System for Ship Reliability in Japan", Proceedings of ICMES 93 Paper27.
- (7) 奥野忠一他: 多変量解析法, 日科技連, 1978年
- (8) 社)日本船舶機関士協会:「故障事例調査委員会報告書」, マリンエンジニアNo.625, 1999年1月。

質 疑 応 答

佐藤尚登(海技大学校):

- (1) 研究成果の教育訓練の場へフィードバックするための手段。
- (2) 故障発生機器、装置及び処置工数等の情報だけでなく、その原因や要素についての解析の取り組みについて。

桐谷伸夫:

- (1) 船用機器の信頼性調査・研究に取り組んでいる立場において、情報の公開こそが第一に重要と考えております。これはフィールドデータが顕著的潜在的に持つ情報を社会に還元することが調査実施者としての義務と考えているからです。当然、第二に解析手法や情報の利用技術についての提言が重要なことは御指摘の通りです。信頼性DBシステムの将来像としては、DB情報をバックグラウンドとした船舶システムの信頼性あるいはリスク評価機能や、その結果を利用した適正保全計画立案支援機能の構築があると考えられます。従って、このような水準までに次世代システムの機能を拡張することによって、一般的にも実利性が高まるものと考えております。
- (2) 船用機器の信頼性研究全体としては、現状評価を目的とした統計的解析、故障発生によってもたらされる損失の評価、船舶システムのモデリングとFTAやGO-FLOW解析による評価などを実施しております。従って、これらの取り組みによって、船用機器故障に対する多面的な評価が可能になるものと考えております。