

信 頼 性 研 究 会 資 料
資料番号R74-11(1974-08)

舶用機関の高信頼化のためのソフトウェア

玉木恕乎 村山雄二郎 黒須顕二
(船舶技術研究所)

1974年8月28日

社 団 電 子 通 信 学 会
法 人

船舶機関の高信頼化のためのソフトウェア

SOFTWARE SYSTEM FOR IMPROVING RELIABILITY OF MARINE ENGINE

玉木 恕乎

村山 雄二郎

黒須 顕二

Hiroya TAMAKI

Yujiro MURAYAMA

Kenji KUROSU

船舶技術研究所

Ship Research Institute

1. 序論

船舶による輸送は、国際輸送に申すに及びず国内輸送においても大きな比重を占めている。しかしその反面、最近の船舶は、その規模の大きさや、船種、用途形態の豊富さ、隻数の多さによって、各々面に大きな影響を持つ大きなシステムとなり、その安全を確保する事は大きな向題となつてきた。本講では、船舶の安全を確保する手段と、システム工学的に考察し、その一手段としての、船舶機関の高信頼化の手法について述べてい。

1.1 安全性と信頼性

一概に安全のために信頼性を増すと云うが、

システムの安全性向上のためには、単にシステムの構成要素の信頼性を上げて安全向上に有効な場合もあり、システム工学的に、より良い方法を講じなければならぬ。初めに安全性と信頼性について考察を加えてみよう。

1.1.1 システムの安全性

システムの安全性について明確な定義はないが、ここでは、そのシステムの機能運用操作、またはシステムの故障が原因で、人間や財産、社会生活等に危害を加えたり性質と云う事(よう)。この定義から、システムの安全性を確保するためには次のような方面について検討しなければならぬ事が判る。

目的：船舶の安全確保				
A.活動の形式	1.船舶による危害の防止	2.船舶の機能確保	3.船舶の機能喪失時の安全確保	4.船舶の機能を損なう外因の排除
B.活動の様式	1.1.船舶による公害の防止	2.1.船体の安全確保 2.2.推進、操船機能確保 2.3.航行の安全確保	3.1.船体の安全確保 3.2.船舶の破壊防止 3.3.救難方法の確保 3.4.運航の確保	4.1.港湾設備の確保 4.2.悪天候気象による危険防止 4.3.誤操作、誤判断の防止 4.4.衝突防止
C.システムの任務	1.1.1.排油排水による汚染の防止 1.1.2.排気による公害防止 1.1.3.渡学的公害防止	2.1.1.堅く、安定な船体 2.1.2.船設備積荷の安全 2.2.1.船舶機関の安全 2.2.2.軸系の安全 2.2.3.操船系の安全 2.3.1.航海計器の確保 2.3.2.航行援助施設の確保 2.3.3.通信設備の確保	3.1.1.沈船、転覆の防止 3.2.1.防火、防水の確保 3.3.1.緊急通信の確保 3.3.2.人命救助の確保 3.3.3.救難施設の確保 3.4.1.代船、曳航の確保	4.1.1.港内航通の安全 4.1.2.係船機能の確保 4.1.3.荷役機能の確保 4.2.1.海象気象観測機能の確保 4.2.2.海象気象通報機能の確保 4.3.1.誤操作防止機能の確保 4.3.2.判断援助機能の確保 4.4.1.航行の安全確保
		以下	略	

図1-1 船舶の安全確保の関連樹木表

(1) システムの本来の機能を発揮した時に、人間、財産、社会生活等に危害を加えないようにする。

(2) システムの本来の機能を喪失しないように、システムの信頼性を向上する。

(3) システムが故障して、その本来の機能を喪失して、人間、財産、社会生活等に危害を加えないようにする。

(4) システムの機能を損なったり、運用操作を誤るような外因を排除する。

(1)の観点からみれば、いかに安全装置が完備したシステムでも、公害を発生するシステムは安全なものではない事が判る。

(2)はシステムの構成要素の信頼性を向上したり、システムの構成に冗長を持つ等として安全性を増すのに対して、(3)は、システムの一部または全部の故障が原因で引き起こされる危険な事象から、安全を確保する機能を持つにサブシステムの設計にしよう。

(4)は環境や運転員の誤操作等によるシステムの乱調、故障の防止策である。

以上のようなシステムの安全をはかる各対策を具体化し、その機能をバランスよく高信頼化する事によって、はじめたシステムの安全性は向上する。

1.1.2 船舶の安全性

システムとしての船舶は、陸地から隔離された閉じたシステムであるが、その自体の動き、物を輸送する事によって社会に結びつき、限らなくとも高いエネルギーを保持しているという事で危険性を内在し、システムに対して被害者にも加害者にもなりうる乗組員と乗客を特殊なシステムである。このような事象を考慮して作製した船舶の安全を確保する対策については、(1)の関連樹木表¹⁾の一例を表1-1に示す。

表中の「C システムの任務」の各項を高信頼度で実行すれば、船舶の安全性は向上するわけである。その一例として、船の中で大きな比重を占める 2.2.1 の船用機関の安全確保について述べた。

1.1.3 船用機関の安全性

船用機関の安全を検討するわけだが、表に(2)(3)項目に注目して、(1)(4)項目はその中におり込

んで検討し、作製した関連樹木表の一例を表1-2に示す。この表は船用機関の機能を保持するために2つの形式、あるいは機関の故障と回避する方法と、故障が起こってしまった時に、危険を防止して安全をはかる方法から成っている。それぞれの方法は、ハードウェアの強化、または冗長性の項と、従来の運転操作処置法(ソフトウェア)の改善による項と、ある程度それを自動化した新制御法による項とで成っている。これらの方法は、いずれも船用機関の安全性の向上に貢献するが、その評価は立場によっても異なってくる。評価の基準に経済面、技術面、開発されるべきの知見期待性をとって評価してみると、評価はハードウェア強化よりも、ソフトウェア改善に集まってくる。もちろん正確な評価は、それぞれ項目についての正しい情報を知らねばできないが、ここではソフトウェアによって安全性を高める手段に注目して行なう。

1.2 システムの高信頼化

システム構成要素の信頼度向上(ハードウェア強化)によるもので、システムの信頼性を向上させるソフトウェアには次のような方法が考えられる。

(1) システムの冗長度を増す。

(2) システムの状態を予測、診断し、状態に応じて予防処置システムの機能縮小、修復等の適当な処置操作を行なう、システムの機能を保持する。

(3) システムの機能保持を危うくする外因から防護する。

(1)は一般に行なわれ、効果の評価しやうな方法である。

(2)は前述する予測と診断機能を持つ、新しい概念の安全制御系⁶⁾を意味する。この系の実現には解決すべき実が⁶⁾が、信頼性向上に大きな力になる。

(3)では誤操作、誤判断のような人為的外因を重視せねばならぬが、人間と機械の協調を人間の工学的に解決せねばならぬ。

これらの手段を有効に生かすためには、故障分析を行なう、要因を見きわめ、対策する事である。これについては次章で述べる。

V. ベル		目的： 船用機関の安全確保					
A 発動の形式	1. 故障回避			2. 危険防止			
B 活動の様式	1-1 機関のハードウェア強化	1-2 機関のソフトウェア改善	1-3 新制御法	2-1 機関の危険防止用ハードウェア開発	2-2 機関のソフトウェア改善	2-3 新制御法	
C システムの任務	1-1-1 材料開発 1-1-2 新設計法の開発 1-1-3 新形式機関の開発	1-2-1 運転条件の変更による信頼性向上 1-2-2 保守の強化	1-3-1 予防制御法開発	2-1-1 安全装置開発	2-2-1 番直処置法開発	2-3-1 緊急時制御法開発	
D 各機五行に要求されるシステム機能	1-1-1 高温材料の開発 1-1-2 高温材料 1-1-3 高耐摩耗材料 1-1-4 高耐腐蝕材料 1-2-1 基準の改善 1-2-2 製作法改善 1-2-3 信頼性向上 1-3-1 可動部分の少ない機構 1-3-2 低温低圧機関	1-2-1 信頼性評価 1-2-2 保守法強化 1-2-2 環境の影響評価	1-3-1 異常診断 1-3-2 異常処理 1-3-3 誤操作防止 1-3-4 大外乱の排除	2-1-1 燃焼防止装置の開発 2-1-2 故障検出装置の開発 2-1-3 故障修復装置の開発	2-2-1 故障時の運転マニュアル整備 2-2-2 パワークラス用ソフトウェア開発 2-2-3 訓練用シミュレータ開発 2-2-4 緊急処理用ハードウェア開発 2-2-5 誤操作防止装置開発	2-3-1 故障診断 2-3-2 緊急度計算 2-3-3 緊急処理用ハードウェア開発	
E functional Sub-system	1-1-1 略 1-2-1 寸法基準 1-2-2 加工基準 1-2-3 材料基準 1-2-4 形状基準 1-2-21 新加工法開発 1-2-22 工程管理 1-2-23 品質管理 1-2-31 信頼性計算 1-2-32 最適配分 1-3-1 燃焼制御 1-3-12 燃焼推進 1-3-21 ファン/バルブ機関 1-3-22 筒内エンジン (化学エンジン)	1-2-1 信頼性評価 1-2-2 燃料/信頼性評価 1-2-21 保守/信頼性評価 1-2-22 環境/信頼性評価	1-3-1 診断法 1-3-12 異常の種類 1-3-21 処置法 1-3-22 自動処理 1-3-23 M/M インタフェイス 1-3-31 誤操作検知 1-3-32 誤操作検知 1-3-33 Fail safe 1-3-41 運転マニュアルの評価	2-1-1 危険の種類 2-1-2 故障防止法の評価 2-1-3 同上機械化 2-1-21 故障波及の把握 2-1-22 同上防止法評価 2-1-23 同上機械化 2-1-31 故障の種類 2-1-32 修復法評価 2-1-33 同上機械化	2-2-1 故障時のタフネス把握(シミュレーション) 2-2-2 シミュレーションによる運転法評価 2-2-21 ティスアレイのH.W.とS.W.の開発 2-2-22 ティスアレイに関する内容の評価 2-2-31 シミュレータのH.W.の開発 2-2-32 このS.W.の開発 2-2-41 シミュレーションによる緊急処理用H.W.の評価 2-2-42 同上機械化 2-2-51 → 1-3-13 と同じ	2-3-1 情報処理 2-3-12 診断調理評価 2-3-13 診断用検出機構 2-3-21 予測技術 2-3-22 検査の評価 2-3-3 → 2-2-4	
F Sub-system の構成	1-1-1 略 1-2-11 テータ収集 1-2-12 同上評価 1-2-21 テータ収集 1-2-22 同上評価 1-2-31 テータ収集 1-2-32 同上評価 1-2-41 テータ収集 1-2-42 同上評価 1-2-211 NC群 1-2-212 推考法 1-2-213 フロッド法 1-2-214 ユニット法 1-2-215 自己増殖 1-2-221 誤工程排除 1-2-222 工場の調和 1-2-231 非破壊検査 1-2-232 1-2-311 単体信頼性 1-2-312 計算プログラム 1-2-321 単体コスト 1-2-322 計算プログラム 1-3-11 燃焼探索 1-3-112 半色線探索 1-3-121 超電導マグネット 1-3-122 保温技術 1-3-211 漏れ止め技術 1-3-212 燃焼問題 1-3-221 化学/ガサベイ 1-3-222 反応制御 1-3-223 材料 1-3-224 機械化	1-2-1 信頼性/データ収集 1-2-12 同上評価 1-2-21 燃料/信頼性/データ収集 1-2-22 同上評価 1-2-23 保守の強化/信頼性/データ収集 1-2-24 同上評価 1-2-211 無言の脅/信頼性/データ収集 1-2-212 同上評価 1-2-213 環境/信頼性/データ収集 1-2-214 同上評価 1-2-221 環境/信頼性/データ収集 1-2-222 同上評価	1-3-1 検出機構 1-3-12 検出装置選定 1-3-13 診断調理 1-3-14 診断法評価 1-3-121 対象による分類 1-3-122 程度による分類 1-3-123 対象による分類 1-3-21 処理の種類 1-3-212 予測 1-3-213 記録 1-3-221 自動処理法 1-3-222 処理装置製作 1-3-231 警報指示装置 1-3-232 リミットの設定法 1-3-31 誤操作検知の調理 1-3-32 検出器設置 1-3-33 誤操作検知装置製作 Test 評価 1-3-321 報知法 1-3-322 報知装置製作 Test 評価 1-3-331 Fail safe 調理 1-3-332 検出器設置 1-3-333 シミュレーション評価 1-3-41 シミュレーションによる評価 1-3-42 外乱最小運転法開発 1-3-43 新運転マニュアル評価	2-1-1 対象物による分類(主軸、補機、発電機、軸系、前後装置 etc.) 2-1-12 理由による分類 2-1-13 対象による分類 2-1-21 危険防止法の考案 2-1-22 防止法の Test (シミュレーションを含む) 2-1-31 仕様設計製作 Test 2-1-32 装置信頼性評価 2-1-21 故障の種類 2-1-22 故障 Tree 作成 2-1-23 故障波及防止法考案 2-1-222 波及防止法 Test (シミュレーションを含む) 2-1-231 装置仕様設計製作 Test 2-1-232 装置信頼性評価および例による評価 2-1-311 修復法による分類 2-1-312 故障検知法 2-1-321 修復法の考案 2-1-322 修復法の Test 2-1-331 装置仕様設計製作 Test 2-1-332 装置信頼性評価	2-2-11 モテリク 2-2-12 モデル検定 2-2-13 シミュレーション 2-2-121 運転モード評価 2-2-122 ティスアレイ仕様 2-2-123 同上 H.W. 2-2-124 同上評価 2-2-131 シミュレータ仕様 2-2-132 同上 H.W. 2-2-133 同上評価 2-2-1321 シミュレータ仕様 2-2-1322 同上評価 2-2-141 緊急処理用 H.W.仕様 2-2-142 シミュレーション S.W. あよみ例による評価 2-2-421 緊急処理 H.W.設計 製作 2-2-422 同上 Test 評価	2-3-11 Filter 設計 2-3-12 同上評価 2-3-121 診断調理サーバ 2-3-122 同上評価 2-3-131 検出機構 2-3-132 同上開発評価 2-3-121 予測技術 2-3-122 予測器設計 2-3-123 同上製作評価 2-3-121 略 2-3-1231 シミュレーションによる緊急度計算 2-3-1232 同上評価	

表 1-2 船用機関の安全確保のための関連樹木表

2. 故障の要因

2.1 アプローチについて

故障の要因を見出すために二つのアプローチがある。一つは、故障を現象のミクロ的立場から観察する立場である。もう片方は統計というマクロな面から故障のメカニズムを追求しようとする立場である。

故障の発生にはいろいろな因子が関連している。特に船舶の場合には、その置かれている環境がきびしいことから、故障に及ぼす環境条件の影響について多くの報告が見られる。これらの因子は単独で効果を与えるほか、因子同士が相互に干渉しあうから、船舶の故障メカニズムは複雑となり、一見不明確である。そこで因子間の相関を明らかにして故障の要因を求め、高信頼化への寄与する対策を提出しようとするのが本章の目的である。

2.2 故障の因子

これまで収集された故障データを分析すると、船用機関の故障には多くの因子が関与していることがわかる。

まず設計段階では、設計方針、設計者、造船所における設計のノウハウがあり、設計年代(技術の進歩)や材料の調達法も重要な因子となる。製造段階では造船所における製造のノウハウ、加工法、据付け、組立て、検査とそれらを実施する環境が故障に影響を及ぼしている。運航段階では遭遇する気象と海象条件、就航航路、積荷、乗組員の人数と熟練度、作業システム、保守システム、運航システムなどが主要な要因となる。

2.3 因子分析⁽²⁾

以上のように故障の要因となる因子は数多くあるが、どの因子が支配的であるか、また因子間の相関はどのようなものかを求める必要がある。互いに相関のある多変数の因子に対する特性を把握して、構成しているメカニズムを総合的に見ようとするのが因子分析である。その手法の一つが主成分分析法である。観察されたデータを基に各変数間の相関を求め、この方法は、各変数に含まれるノイズをできるだけ小さく

くしていきのび、総合特性の把握が容易である。

2.4 故障データ

因子分析の場合、基となるデータが必要であるが、船用機関の故障に関するデータについては、これを系統的に収集しようとするデータバンクシステムがいくつかあり、過去においても現在においても数多くの実際の運航に基づいたデータが提供されている。しかしながら、各データとも情報が不十分であったり不明確であったりして、必ずしもそれらの解析に満足するようになるものとはいえない。本報告のように、船舶の安全を目的とする解析に対しては不十分な所がある。研究の目的が立てられたならば、その目的に応じ企画されたデータ収集システムによって調査を行なうことが本質であろう。しかし、一つの調査には人数、時間、費用に莫大の支出を必要とする。

そこで、ここでは解析の目的に合うような利用可能なデータを選別し、解析を実施した。

2.5 自動化機器の故障解析

解析の対象に採り上げたデータは、船舶整備公団が昭和44年度と45年度に建造した公団共有船の自動化機器にまつた故障データであった。⁽³⁾ 建造後の2年間にわたって追跡調査したものである。対象の船舶は、貨物船、タンカおよび旅客船の4隻で、主として内航航路に就航している。調査因子中主成分分析を実施した因子は以下の項目である。

- ①船の用途(貨物船、タンカ、旅客船)
 - ②船の大きさ(総トン数)
 - ③乗組員数
 - ④機関常用員数
 - ⑤故障自動化機器(甲板部、機関部、電気部、別件)
 - ⑥故障部
 - ⑦故障発生時期
 - ⑧故障状況
 - ⑨故障原因
 - ⑩故障の影響(復旧日数と停船日数)
- 以上の外に、年間航海時間、積荷の内容、当直

配置についても副次的に調査している。

このデータは、比較的新しい内航船舶の自動化機器の故障に限られているところに特徴がある。

故障に及ぼす上記各因子について主成分分析法を適用し、解析した結果を以下に示す。

船の大きさ	隻数	故障原因				計
		設計不良	材質不良	機装不良	誤操作等	
0 ~ 500 G.T.	38	1.50 57	1.34 51	0.74 28	0.42 16	4.0 152
500 ~ 1000 G.T.	38	1.58 60	2.63 100	2.34 89	0.68 26	7.24 275
1000 G.T. ~	21	2.48 52	3.24 68	2.76 58	0.67 14	9.14 192
計	97	1.74 169	2.26 219	1.80 175	0.58 56	6.38 619

上段は1隻あたりの件数、下段は実件数

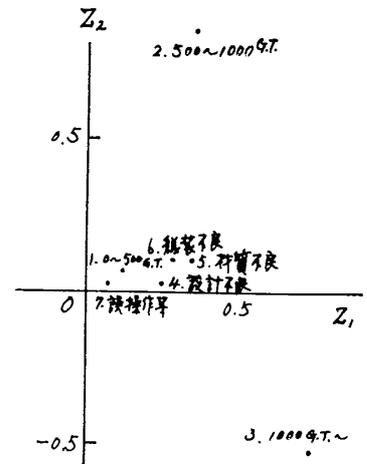


図2-1 Z₁とZ₂に対する固有ベクトル

表2-1 船の大きさによる故障原因を因子とした故障件数のマトリックス

特性値 Z _i		主成分: l _{ki}			分散 V _{ii}	因子負荷量	
		Z ₁	Z ₂	Z ₃		(Z ₁)	(Z ₂)
1. ↑	0 ~ 500 G.T.	0.13	0.06	0.93	4.00	0.23	0.08
2. 船の大きさ ↓	500 ~ 1000 G.T.	0.38	0.84	-0.19	7.24	0.50	0.88
3. ↓	1000 G.T. ~	0.75	-0.52	-0.16	9.14	0.88	-0.48
4. ↑	設計不良	0.25	0.02	0.25	1.74	0.67	0.04
5. 故障原因 ↓	材質不良	0.35	0.10	0.10	2.26	0.83	0.19
	機装不良	0.29	0.09	-0.07	1.80	0.77	0.19
	誤操作等	0.07	0.03	-0.04	0.58	0.33	0.11
	固有値 λ _i	12.6	7.89	4.51			
	√λ _i	3.55	2.81	2.12			
	累積寄与率(%)	47.1	76.6	93.4			

表2-2 主成分分析結果 (固有ベクトルと因子負荷量)

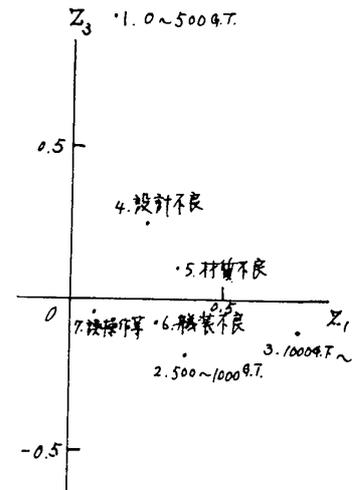


図2-2 Z₁とZ₃に対する固有ベクトル

解析の一例として、船の大きさによる故障原因との相関マトリックスを表2-1に、主成分分析を行なった結果を表2-2に示す。また図2-1と図2-2に表の値をZ₁軸とZ₂軸、およびZ₁軸とZ₃軸に打ちつけてプロットして示す。Z₃までの累積寄与率は93%であるため、両図がほとんどを解釈できる。

これらの表と図から、船が大きくなるほど故障は増加し、故障原因としては材質不良、構築不良、設計不良が高く、誤操作は少ないことがわかる。主軸は原因としては構築不良と誤操作等が自の係数を示し、人為的原因が一次的なものとして認めないものを別けている。

同様な手順を他の因子に対して適用した結果、比較的新しい内航船舶の自動化機器に生ずる故障頻度の特性は要約すると、

- ①故障頻度は貨物船、タンカー、旅客船の順に高くなる。
- ②船が大きいほど故障頻度が高い。船が大きくなった後も自動化機器のセット数は変らないが、大きくなるほど情報の伝送距離が長くなるため、伝送媒体を使うのが複雑になり、質的な差によって故障が多くなっていく。
- ③乗組員数は船の大きさと高い相関があり、乗組員数が増加しても故障は減少せずかえって増加する。機器については、乗員数が少ないと甲板部機器の故障頻度が高く、多くなると機関部機器が増してくる。これから判断すると、保守として防止できない偶発故障が多いことがわかる。
- ④機関の常用負荷は自動化機器の故障にはほとんど影響しない。機関の故障は負荷と高い相関があることはすでに報告しているが、自動化機器の故障は機関負荷とは関係がない。
- ⑤故障の不没としては折損故障が多く、ついで焼損である。焼損は電気部機器と相関が高く、内容はコイル、抵抗の焼損である。
- ⑥故障原因は材質不良が多く、乗組員による誤操作の頻度は低い。
- ⑦故障発生時期は初期ほど頻度が高く、1年から1年半で初期故障は終息する。機関部機器および機関負荷が高いと、時間が経過しても故障は終息せず、故障との相関は高い。

2.6 機関故障が原因となった海難の解析 (4)

海上保安庁は毎年、海難調査書による海難を整理している。海難は船舶の安全にとって最も深刻な一番遠い場所には位置し、機関故障が及ぼすものは重大な結果があり、正しく評価しないわけにはいかない。

この解析の対象として採り上げたデータは、昭和47年度に海上保安庁へ報告された海難の中機関故障を原因とする47件の海難である。海難調査書には、船の種類、大工、船令、気象状況等多くの情報が記載されているが、本解析では故障箇所、損傷の程度、故障原因を要因として挙げ、これらの因子と故障件数との相関を見ている。

主成分分析を行った結果を表2-3に、(2)と(3)に対する因子負荷量を図2-3に、(2)と(3)に対する因子負荷量を図2-4に示す。これらの表と図からわかることはつぎのとおりである。

- ①故障箇所としては軸系が多い。
- ②故障箇所として、機関室の系統はすべて原点の近傍に位置し、軸系の故障は明白な対比を示している(図2-3)。したがって故障のメカニズムという特性が2の両者と大きく異なっていることがわかる。
- ③2に対する固有ベクトルは(2)に対する因子負荷量をみるに、損傷の範囲や重さ、重大損傷と軽微損傷は符号が正と負で大きく異なることを示していることから、主軸は損傷の程度を示す軸であることがわかる。
- ④2, 3の2は説明が過ぎない(2, 3表示が原点近傍にある)故障原因の特性値は、オミ主成分または(2)によって説明できる。それによれば、乗組員による人為的原因が一次的である機関整備不良が正の係数を持つことに伴い、材質不良、老朽劣化など乗組員の影響が及ばない原因が負の係数を持ち、原因の特性をこれによって別けていく。さらに、オミ主成分まで累積寄与率は約62%である。
- ⑤重大損傷となる故障をグループ化した結果、重大損傷を主とする故障は軸系は多く、その原因としては、材質不良、老朽劣化であることがわかる。したがって対策としては、軸系の材料に十分注意するとともに、検査を行った予防保守による取替を実施すれば、重大海難をかなり減らすことが可能である。

特性値 λ_i	主成分: λ_i					分散 V_{ii}	因子負荷量				
	Z_1	Z_2	Z_3	Z_4	Z_5		(Z_1)	(Z_2)	(Z_3)	(Z_4)	(Z_5)
1. 軸系	0.38	0.41	-0.41	0.12	-0.07	166	0.66	0.47	-0.36	0.08	-0.04
2. シリンダ系統	0.11	0.05	0.07	-0.08	-0.66	57	0.32	0.21	0.10	-0.09	-0.63
3. 起動系統	0.07	-0.05	0.05	0.11	0.0	36	0.26	-0.12	0.07	0.15	0.0
4. 燃料系統	0.08	-0.07	-0.02	0.33	0.18	45	0.27	-0.15	-0.03	0.40	0.19
5. 潤滑系統	0.08	-0.04	0.09	-0.06	0.02	38	0.29	-0.10	0.16	-0.08	0.02
6. 冷却水系統	0.10	-0.07	-0.02	-0.23	0.68	52	0.31	-0.14	-0.03	-0.26	0.23
7. 歯車装置	0.05	0.0	0.02	-0.15	0.04	32	0.20	0.0	0.04	-0.21	0.05
8. 補機	0.01	-0.0	0.01	-0.0	0.01	7	0.08	0.0	0.04	-0.0	0.03
9. その他	0.04	-0.04	-0.05	-0.04	-0.03	22	0.19	-0.12	-0.12	-0.07	-0.05
10. 不明	0.01	0.01	0.03	0.03	0.02	9	0.07	0.05	0.11	0.08	0.26
11. 重大損傷	0.26	0.72	0.06	-0.01	0.11	163	0.45	0.83	0.05	-0.0	0.06
12. 軽微損傷	0.63	-0.53	-0.31	-0.03	-0.62	273	0.85	-0.47	-0.21	-0.01	-0.27
13. 不明	0.01	-0.0	0.03	0.04	-0.0	11	0.07	0.0	0.10	0.10	-0.0
14. 機関整備不良	0.57	0.0	0.69	-0.01	0.02	226	0.85	0.0	0.51	-0.0	0.01
15. 取扱不注意	0.08	0.02	-0.22	0.66	0.16	59	0.23	0.04	-0.32	0.67	0.15
16. 不完全修理	0.04	0.01	-0.07	0.01	-0.04	18	0.21	0.03	-0.18	0.02	-0.07
17. 故障	0.09	-0.01	-0.28	-0.11	-0.12	57	0.27	-0.02	-0.42	-0.12	-0.11
18. 老朽疲労	0.10	0.10	-0.31	-0.57	0.09	64	0.28	0.18	-0.43	-0.58	0.08
19. 原因不明	0.01	0.01	-0.01	0.0	0.01	5	0.10	0.07	-0.05	0.0	0.03
20. 構造上の欠陥	0.00	0.01	-0.01	0.0	0.0	3	0.0	0.08	-0.06	0.0	0.0
21. 不可抗力	0.02	0.02	-0.04	0.01	0.04	15	0.12	0.08	-0.12	0.0	0.07
21. その他											
固有値入:	499	215	126	65.3	51.3	\sum 1358					
$\sqrt{\lambda_i}$	22.3	14.7	11.2	8.1	7.2						
累積寄与率(%)	36.7	52.6	61.8	66.7	70.5						

表 2-3 為難に至る機関故障の主成分分析結果

2.7 解析結果に対する考察

それぞれの解析からえられた結論は違っている。例えば原因別による故障の発生頻度の順位を見ると、自動化機器では「誤操作等」の乗組員に起因する故障の頻度が順位では低い所にあるのに対し、海難に至った機関故障では「整備不良」といって乗組員に起因する故障が高い順位になる。

調査対象が、一方は内航船の自動化機器に主じた故障であり、片方は海難に至った機関故障というように要値の事象であったために、このように収集された調査データが「誰によって」「何の目的で」を主としたかにより、解析結果は変わってくる。したがって、使用するデータの収集の結果の解釈にあたっては十分慎重を要する。

このようなことがあるにもかかわらず、自動化機器の故障原因で上位を占めてくる「材質不良」が、海難に至った機関故障の中で重大損傷の割合が高い軸系の故障原因で同じように高い相関を示していることは、共通項目として注目してよいであろう。

11. 重大損傷

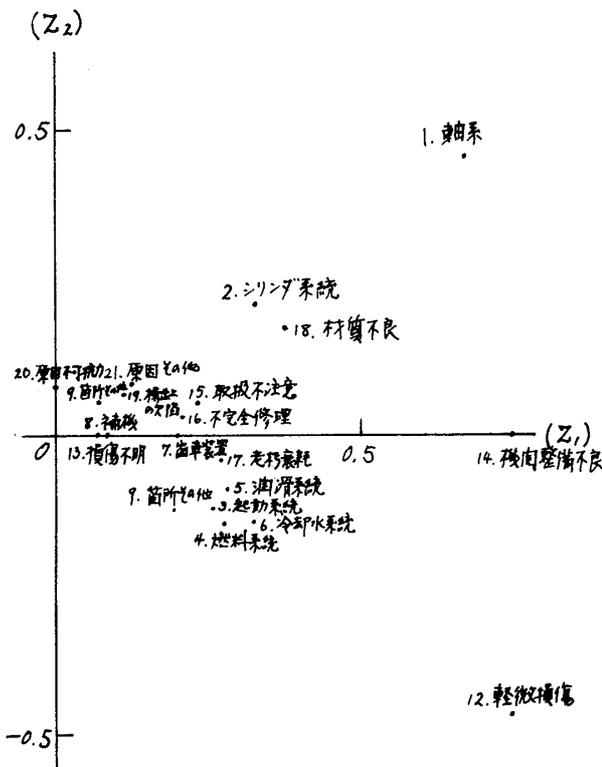


図2-3 (Z₂)と(Z₁)に対する因子負荷量

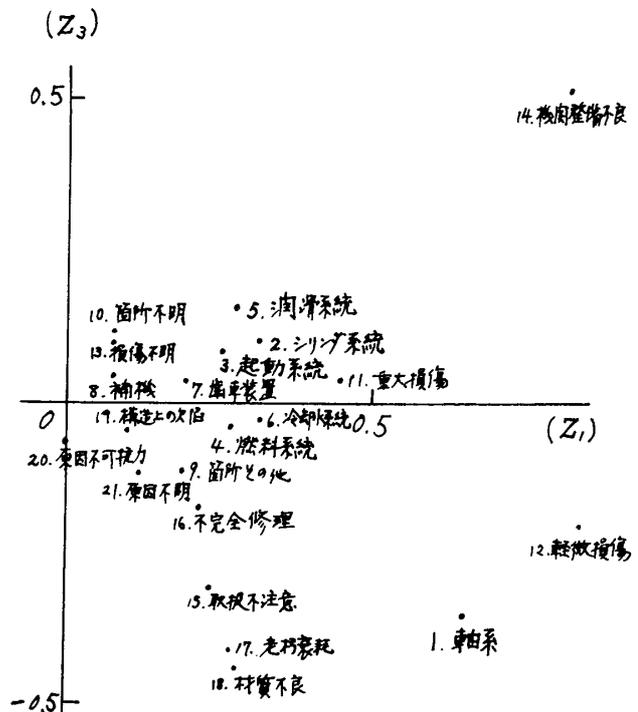


図2-4 (Z₃)と(Z₁)に対する因子負荷量

3 故障の診断と予測 ⁽⁵⁾⁽⁶⁾

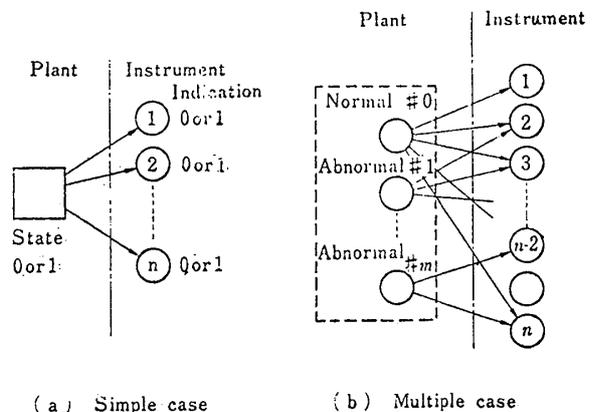
信頼度の向上はシステムを構成する要素に冗長性を与えることで達成されるが過度の冗長性は、システムを複雑化するばかりでなく、経済的制約があるため、これによる信頼度の向上には、実行上限界がある。したがって、必ずあるアプローチが用いられるべきではない。それは、計算機を導入することで、より高度の判断機能を持つこと、結果として信頼度と稼働率の向上を促さうという立場である。この高度の判断機能の一例が、自動故障診断である。もし異常警報に対して、異常の原因を迅速に、かつ、適確に判断することが出来れば、異常に対する処置の選択が可能となり、より大きな事故への波及を未然に防ぐことが出来るばかりでなく、修復時間も大幅に短縮し、結果として、稼働率の上昇を得ることが出来る。このような機能を期待される機能は危険に対する予知機能である。

故障には、停電で代表されるような突発的なものと、定常値からの偏差が徐々に大きくなり、やがて、あるしきりに達して、やがて異常として、はじめて検出されるものがある。ここで、のべる故障予測は、後者のような場合を対象としてそので、次のような目的を持っている。

- (1) 運転中の過渡的現象として、状態変数の変化が、定められた時間内に、指定された運転限界を越える可能性がありかが判定すること。
 - (2) 指定された時間内における状態変数の変化が最大または最小に達する時間とその値を予測すること。
 - (3) コントローラの動作点が飽和域に到達するが、もし、到達した場合、その時間およびそこから脱出する時間を予測すること。
 - (4) 上のような情報を基礎として、プラントの危険に対する余裕度を総合的に判定する。
- 以下、貫流ボイラに適用した実例を中心に、上記の自動診断と予測の考え方を述べてみる。

3.1 最尤推定法を用いた自動診断
3.1.1 基礎的考え方

まず、診断の基本的考え方を述べる。図3-1(a)に示した簡単な例について考える。プラントの状態は凡個の並列に配置された検出器によって検出されているものと考える。そして、各検出器は、プラントの状態が正常の領域であれば"0"を示し、異常または危険の領域では"1"を示すとする。もし、検出器がすべて正常に動作していると仮定すると、検出器群の出力のパターンは、プラントの状態に応じて(0,0,...,0)か(1,1,...,1)のどちらかに限られる。問題は、(0,1,0,...,1)のように、検出器の一部が0を示し、他が1を示すようなことが現実起きた時、どのように判断すべきかということである。



(a) Simple case (b) Multiple case
図3-1 検出器のパターン

まず、つぎの条件つき確率を計算する。

$$P_0 = P(0|S_i) = \frac{p(0) \cdot P(S_i|0)}{p(0) \cdot P(S_i|0) + p(1) \cdot P(S_i|1)} \quad (3.1)$$

$$P_1 = P(1|S_i) = \frac{p(1) \cdot P(S_i|1)}{p(0) \cdot P(S_i|0) + p(1) \cdot P(S_i|1)} \quad (3.2)$$

ここで(1)式は、観察パターン(検出器の出力パターンをこのように呼ぶ)が $S_i = (s_1, s_2, \dots, s_n)$ である時のプラントが正常である条件つき確率を表わし、(2)式は、同様の条件下でプラントが異常である条件つき確率を示す。これを利用すると、つぎのように判定を行なうことが出来る。
 $P_0 > P_1$ ならば、プラントは正常で、検出器に異常がある。
 $P_0 < P_1$ ならば、プラントに異常がある。
さらに、 $P(S_i|0)$, $P(S_i|1)$ は、 i 番目の検出器の信頼度を用いて、つぎのように計算することを出来る。

$$P(S_i|0) = \prod_{i=1}^n (r_i)^j (1-r_i)^{1-j} \quad (3.3)$$

$$P(S_i|1) = \prod_{i=1}^n (r_i)^{1-j} (1-r_i)^j \quad (3.4)$$

ここで、 j はつぎのようにして与えられる。

$$j = \begin{cases} 0 & \dots \text{ } i \text{ 番目の検出器が } 1 \text{ を示す時} \\ 1 & \dots \text{ } i \text{ 番目の検出器が } 0 \text{ を示す時} \end{cases} \quad (3.5)$$

結果的にいえば、(1),(2)式の代わりに、(3),(4)式で計算される値の大小によって、求める判定が可能となる。

この方法は、図3-1(b)に示したような、さらに複雑な場合にも容易に拡張できる。この場合は、それぞれ故障に応じて着目する検出器の出力パターンを故障パターンとして記憶しておき、観察パターンとの比較から、(3),(4)式に類似した式を計算する。

$$L_k = \prod_{i=1}^n (r_i)^j (1-r_i)^{1-j} \quad (3.6)$$

ここで

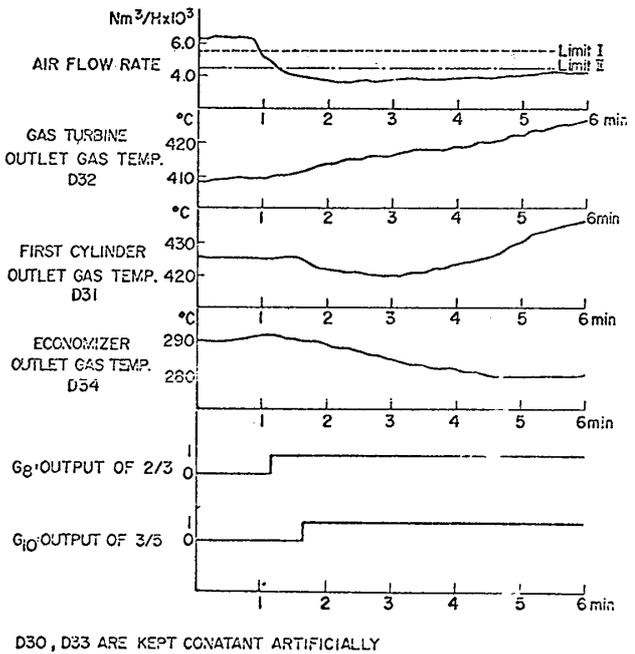
$$j = \begin{cases} 0 & \dots \text{ } i \text{ 番目の検出器が故障パターンと一致しない時} \\ 1 & \dots \text{ } i \text{ 番目の検出器が故障パターンと一致する時} \end{cases}$$

(6)式で最大の L_k をえり故障を故障原因と診断する。(6)式観察パターンが故障パターンと一致した場合は、当然、最適値を示すから、この論理は決定論的診断の基本作業である観察パターンと故障パターンとの一致による診断を同時に行っているといえることができる。

検出器が多い時は、検出器をグループ化し、このグループ化したパターンに対して診断を行う。グループ・パターンおよびその信頼度は"out of 3"に代表される多数決の原理に基づいて決定する。故障パターンが決定されると、これを観察パターンと比較し、故障パターンと表示が一致してない検出器を故障とみ出す。

3.1.2. 自動故障診断テスト

テストに用いたボイラは 蒸気量15T/Hの貫流ボイラで、総計27個の on-off または analog の検出器が配列されている。まず、適用にあたって、これらの検出器のグループ化を行う。グループ化による診断に最適なものグループ化が存在するだろうが、ここでは主要積蓄を境に



Group observed pattern	The most probable fault pattern	Result of diagnosis		
		Fault detector	Fault occurrence	
0	0	00000		
0 0 1 0	0 0 1 0	00 0 10010	000	Feed air line
1	1	000		
0 0 0 0 0	0 0 0 0 0	00000 00000 000 000		

図3-2 診断例 (旋回ガス流用タンパ故障)

(て行なった。検出器の信頼度は、使用条件によって、かなり変化することと考えて、このテストのためには、すべて0.99として処理した。診断例を図3-2に示す。診断のアルゴリズムは、ミニ・コンピュータにプログラム化されている。この例は、旋回ガス流用タンパを極度に腐じした場合で、この場合、空気比が効率曲線のピーク付近にあることによってガス温度は、さまざまに変化する。(したがって、ガス温度の変化については、方向、絶対値とも故障に結びつけることは困難である。ここでは、温度の変化分の絶対値を用いて故障パターンを7つとしているが、このパターン導入の結果、1分45秒のとき、グループG10のパターンが1となり、このときの観察パターンは、タンパ故障時のトラジェント・パターンと一致する。診断は正しい結果を示している。

D_{30}, D_{33} が故障とでているのは、実験に先立ち、 D_{30}, D_{33} 人為的に故障させ、指示が変化しないうようにしてテストからである。これに訂正して正解を与えている。

3.2 異常プラント状態の予測システム

このでる故障予測システムは、前述のように、状態変化、ピーク値、制御弁の動作を予測する目的を以てしている。

3.2.1 予測のアルゴリズム

系の与えられた状態変数表示を

$$X(t) = A \cdot X(t) + G \cdot W(t) \quad (3.7)$$

$$Z(t) = H \cdot X(t) + V(t) \quad (3.8)$$

とする。ここで、 $W(t), V(t)$ は平均値 0 の白色ノイズとする。予測は一般的に云えば、観測データ $Z(t_1)$ を基について、状態 $X(t_2)$ ($t_2 > t_1$) を計算することである。まず、系の状態遷移行列を $\Phi(t_2, t_1)$ とすると、

$$X(t_2) = \Phi(t_2, t_1) X(t_1) + \int_{t_1}^{t_2} \Phi(t_2, \tau) G(\tau) W(\tau) d\tau \quad (3.9)$$

によって $X(t_2)$ が得られる。

(9)式の両辺の、 $Z(t_1)$ が与えられた時の期待値をとると、

$$E \{ X(t_2) / Z(t_1) \} = \Phi(t_2, t_1) E \{ X(t_1) / Z(t_1) \} + \int_{t_1}^{t_2} \Phi(t_2, \tau) G(\tau) E \{ W(\tau) / Z(t_1) \} d\tau \quad (3.10)$$

ここで、 $E \{ W(\tau) / Z(t_1) \} = 0$ であるから、

(10)式は

$$E \{ X(t_2) / Z(t_1) \} = \Phi(t_2, t_1) E \{ X(t_1) / Z(t_1) \}$$

となる。ここで、 $E \{ X(t_1) / Z(t_1) \} = \hat{X}(t_1 / t_1)$ 、 $E \{ X(t_1) / Z(t_1) \} = \hat{X}(t_1)$ とおけば

$$\hat{X}(t_2 / t_1) = \Phi(t_2, t_1) \hat{X}(t_1) \quad (3.11)$$

これが、予測のアルゴリズムである。

これからわかるように、予測には、まず、状態推定が必要となる。

状態の推定を行なうには種々の方法があるが、計算機のプログラムに適しているカルマン・フィルタを用いるのが簡単である。

カルマン・フィルタを用いるためには、プラントの正確なモデルおよびノイズの分散等の統計的性質を予め知っておかなければならない。しかし、実際には、これら正確に知ることは不可能である。そして、もし、モデル誤差がある

時は、いわゆる発散が生じる。発散とはデータ飽和 (data saturation) とは、カルマン・フィルタを用いる場合、推定誤差分散が理論値より極めて大きくなる現象で、次のような原因が生じる

- (1) プラント・モデルの不正確の場合
- (2) ノイズの分散、平均などの性質に関する先験情報の不正確さの場合

この現象を避けるには、幾つかの方法がある。推定値が発散するものは、カルマン・ゲインが急速に零に収束するものが直接の原因であるから、むしろ別の方法でカルマン・ゲインの減少を押し止めるべきである。その一つとして、プラント・ノイズ分散を人為的に増加させる方法が、比較的簡単である。

1例として、カルマン・フィルタを用いて、ボイラ出口温度の最適推定を行なった結果を図3-3に示す。

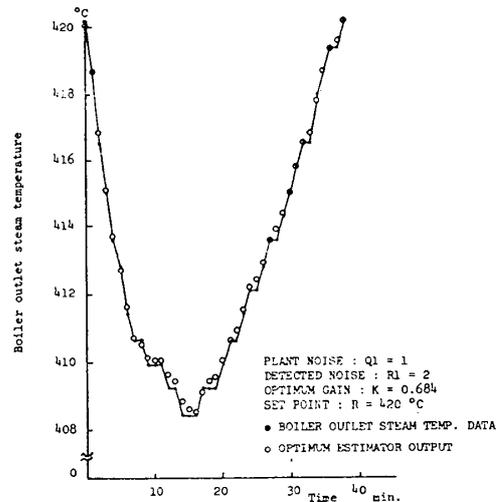


図3-3 ボイラ出口温度最適推定結果

つぎに、予測であるが、つぎのような差分型モデルを用いた高速シミュレーション法である。1例として、蒸気ろ過弁出口温度の予測を行なう場合の計算式を示す。

$$\Delta X_k^* = a_1 \Delta X_{k-1}^* + a_2 \Delta u_{k-1-n}^* + a_3 \Delta \hat{V}_{k-1-m}^* \quad (3.12)$$

$$\Delta u_k^* = K_p (X_{k-1}^* - X_k^*) + K_i (R - X_k^*) \quad (3.13)$$

$$u_{min} \leq u_k^* \leq u_{max} \quad (3.14)$$

- X^* : 蒸発弁出口温度予測値
- U^* : 蒸発弁開度予測値
- \hat{v} : ボイラ出口温度推定値
- K_p, K_I : 制御定数
- R : 目標値
- k : 予測回数
- α_i : アダプト・パラメータ
- n, m : 応答時間

ここで、 Δ は差分を表わす。たとえば $\Delta X_k^* = X_k^* - X_{k-1}^*$ である

3.2.2. 予測実験結果

図3-4に燃料流量突変時の、蒸発弁出口温度予測実験結果を示す。この結果は、状態推定にカルマンフィルタを用い、4点移動平均を用いた結果である。この例では、20分間の予測を行っているが、プロットしてあるのは、○印が予測時間20分間内の最高値であり、×

印が最低値である。これらの値は、予測された20分間内の応答の計算値の最大値、最小値として求めたものである。ただし、最高値がプロットされていときの最小値および最小値がプロットされていときの最高値はデータとほぼ一致するのをプロットしている。

また、●印は蒸発弁位置の27分時点から始まる予測値を示している。この結果をみると、蒸発弁の締切り時間、および制御範囲に戻り始める時間の予測はきわめて正確である。また最高値の予測も、2点鎖線で示した実データと比べて、ほぼ満足すべきものである。ただし、最低値は、正確でなく、また、大きなばらつきがある。この理由は、蒸発弁が閉じ切っている間の温度変化は、制御ループが、いわば、オープン状態にたつので、ボイラ出口温度の推定誤差が、累積的に影響を与えるからである。

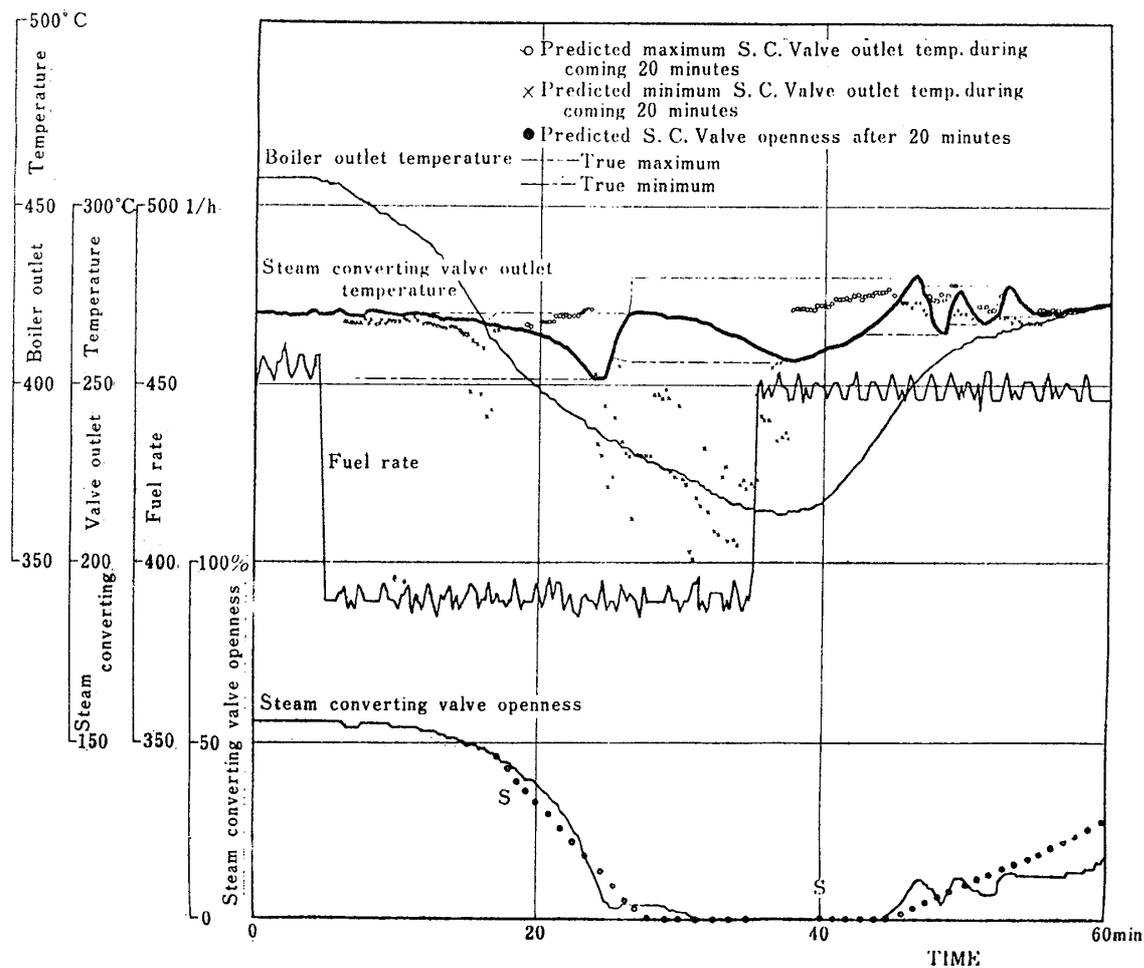


図3-4 燃料流量突変時の蒸発弁出口温度予測

4. ディスプレイと利用した運転バックアップ・システム

4.1. 起動バックアップ

ボイラの出カ上昇の自動は、次の理由で不完全にならざるを得ない。

- (1) 起動状態では、物理定数変化により、プラント・パラメータが広範囲に変わる
- (2) 燃焼が不安定になる等、突発的外乱が加わり易い。
- (3) 機器の故障が発生し易い。

したがって、プログラム制御等によって起動の自動化がなされても、運転員は、常にプラントの状態を見守り、待機して、安全に備える必要がある。

本節では、この場合のマンマシン・インタフェースとして、また手動操作に切り換えた場合のバックアップ・システムとして、状態変数の予測値をディスプレイする手法を試みた。

ディスプレイ方式は 図4-1 (a) に示したようなものであり、ディスプレイの内容としては 図4-1 (b) に示すように、現時点からの未来値を示すものである。ディスプレイには、XYプロットを用いる。制御量は、ボイラ出口蒸気温度であるが、普通、運転員は、ボイラ出口温度を制御するのには、燃焼室出口ガス温度、または、ガスタービン出口温度を監視して制御を行っている。理由は、図4-2に示すようにガス温度は、蒸気温度に比較して、ほぼ同じような応答を示すので、一種の予測値を示すと考えられるからである。したがって、ガス温度の予測を行えば、さらに良い出口蒸気温度の予測が行えることになる。

予測には、3節と同じ手法を用いることができる。

図4-3に示した結果は、予測値をみながら手動操作によって温度上昇を行なった例である。これを見てもガス温度、蒸気温度ともに、ほぼ直線的に上昇しており、効果的である事が分る。ボイラ出口蒸気温度の目標が設定されている場合には、その目標値に正確に整定させるためには、ガス温度と蒸気温度の両方をおくれ予測式の中に取り入れる必要がある。

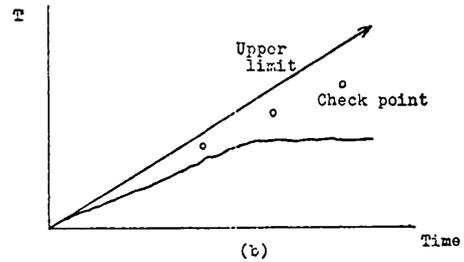
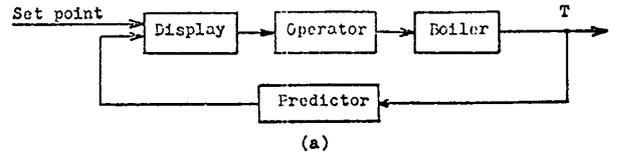


図4-1 ディスプレイ方式

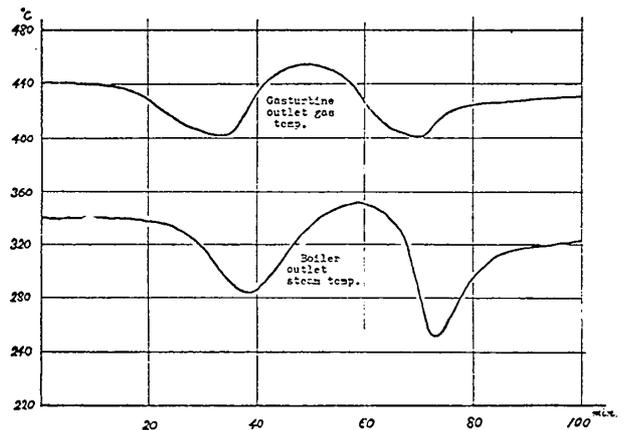


図4-2 ガス温度と蒸気温度の相関

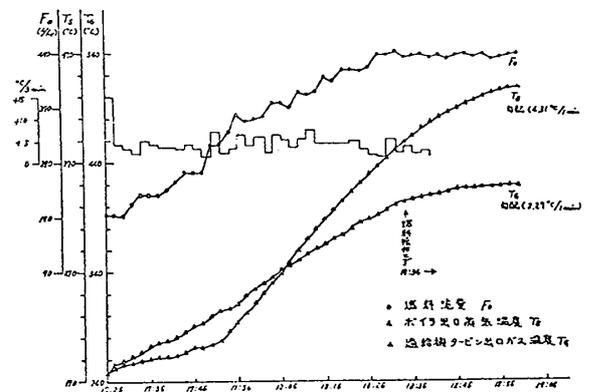


図4-3 起動例

4.2.2. 非干渉コントローラによる起動バツプアップ

貫流ボイラにおいては、よく知られているように、圧力と蒸気温度は相互干渉を持つてゐるので、図4-4 に与えられたような(T,P)平面上に初期値(T₁, P₁)から目標値(T_f, P_f)に移行させる操作は、簡単で可なり。1つの考え方として、図4-4 のように非干渉系を付加して、入力(e, f)から出力(y, z)までの伝達マトリクスを対角化し、(e, f)を操作して、(y, z)をそれぞれe, fによつて決まる独立な制御量と考へて、前述の方法で、タイム・シェアリング的にy, zをそれぞれ(T, P)を増加させるやり方である。

この方式の採用により、起動の誤操作を減少させることが可能である。

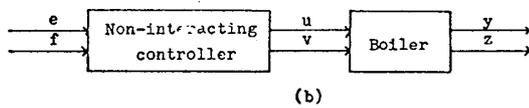
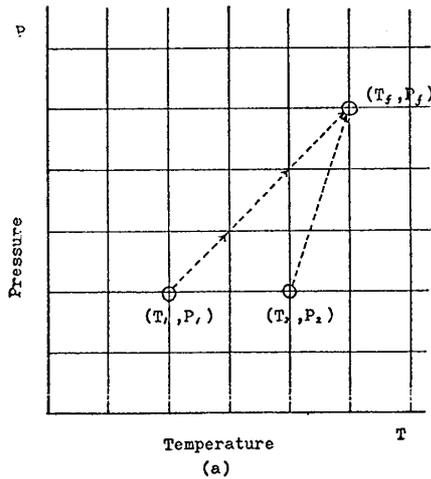


図4-4 非干渉化

5. おまへ

以上、船用機関の高信頼化のためのソフト・ウェア・システムの考え方と開発の方向を示し、その具体的例として、診断システムの貫流ボイラへの適用例を示した。

ソフト・ウェアの構成は、対象により、異なるが、概要は、図5-1で、ほゞ、示したものである。

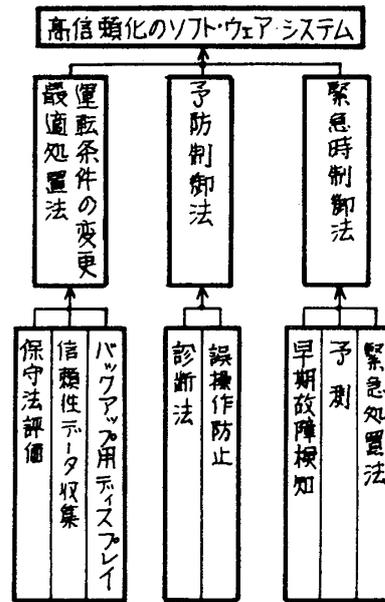


図5-1 ソフト・ウェア概要

関連樹本法、故障データの因子分析等により、こからのシステムの妥当性の検討を試みた。研究は、端緒にすぎたばかりであるが、極めて広範囲におよぶものであり、ハード・ウェアとの開発に待つ所も多く、広く、今後の御検討を御願ひする次第である。

謝辞、本報告に御指導と載いた東工大教授 寺野寿郎氏、貴重なデータの提供を御願ひし、海上保安庁の足立氏に感謝致します。

参考文献

- (1) 寺野・野本：システム工学の手法 日刊工業 (昭和46年)
- (2) 奥野他：多変量解析法, 日科技連 (1971)
- (3) 船舶整備公団：公団共有船自動処置器の信頼性に用いた調査 (昭和48年3月)
- (4) 海上保安庁：要救助海難統計
- (5) A.P. Sage & J.L. Melsa : Estimation Theory with Applications to Communications and Control, McGraw-Hill (1971)
- (6) 黒須・村山, 寺野 : ボイラの安全システム, 計測自動制御学会論文集 (10-4)