

外航ディーゼル船における最適保全要員数の決定法

学生員 城戸八郎* 正員 片木 威**
橋本 武**

Decision Method of the Optimal Number of Maintenance Crew on Diesel Plant

by Hachiro Kido, *Student Member* Takeshi Katagi, *Member*
Takeshi Hashimoto

Summary

Generally, there are some relations of the queue that are occurred while the maintenance work and the recovering work. Therefore, it is able to calculated increase or decrease situation that is waiting time, waiting number of cases and occurrence ratio by using a queue procession. Furthermore, it's gotten the optimal number of maintenance person by making the occurrence situation. Engine failure in a ship can be regarded as exponential arrival model in random failure period. Also it's conceived that the distribution in recovery time complies with random Poisson or Erlang distribution. Recovering work data are calculated with a repair rate from a man-hour in terms of the kind of maintenance and queue simulation model. It was constructed by using queue processions and simulation programs. Finally, it's found out the number of optimal maintenance personnel concretely by it.

1. 緒 言

一般に機器のアベイラビリティを上げる為にはMTBF(故障平均時間)を伸ばすと共に MTTR(保全による復旧時間)を短くする必要がある。しかし船舶では限られた乗組員数で、船舶や機関を操船、操作する時間を削除する事は出来ず、故障時においても、復旧優先度の高低がある。さらに、機器の大きさや複雑さ、保全場所の難易度、経年劣化の程度や予備品の有無など、保全時間と要員数に与える要因は多い。この為に船舶乗組員数について故障と保全の面から検討した研究は少ない。これらの背景を考慮し、保全時間データを参考として、修復に対する優先順位と船舶の運航

運航上からくる保全制限を考慮したうえで、運航時間の経過に沿ったシミュレーションモデルを作成し最適な保全要員数を導き出す方法について考察した。保全作業の発生と復旧の間には通常待ちの関係が発生する。本論文ではまず、保全要員数の算出に当たり待ち合わせ理論におけるポアソン分布型到着、指数分布型複数窓口サービスとしてモデル化し、シミュレーションに必要な計算を行った。次に船舶の運航状況にあわせるべく1時間刻みの保全待ち時間、待ち件数、待ちの発生状況が増加、減少または平衡のどの状態にあるのかを求めた。さらに、8時間以上続けて滞留が発生するケースを検出し、オーバータイムの発生状況を求めた。これらの値を評価の指数とすることで最適な保全要員数がどの程度となるのか検討を行った。

* 海技大学校機関科

** 神戸商船大学機械電子工学講座

原稿受理 平成11年7月9日

秋季講演会において講演 平成11年11月18, 19日

2. ポアソン到着指数型サービス、複数窓口における待ち合わせ理論

これまでの調査によって、船舶に搭載されている各機器の平均的な故障率、保全に要した要員数並びに時間、工数、保全内容種別などの故障に対する保全時間データを得ることができた¹⁾。また、点検作業、一般整備作業、掃除、事務作業などのルーチンワークについても保全に要した要員数並びに時間、工数、保全内容種別などの待ち行列計算に必要な統計データを得ることができている²⁾⁻⁴⁾。ここで、船舶における故障の発生と修復の関係について見れば、船舶故障は偶発的な故障領域では、稼働初期に保全が多く発生し、運転時間が長くなるにつれ急速に減少する傾向から、ランダムなポアソン分布型到着と見なすことができる⁵⁾⁻⁸⁾。また復旧時間の分布は固定的でなく、その時の船舶の偶発的な内的、外的要因に左右される為ランダムな指数ないしはアーラン分布に従うと考えてよい⁹⁾¹⁰⁾。さらに、保全要員についても経験年数や技量、知識の程度などによって修復能力に差が生じ、修復時間は変化する。従って要員数に修復時間を掛け合わせた値である保全工数は影響を受ける。そこで本論文では修復作業量は工数(MH)を利用することとする。これは入手できる保全統計量として工数が多く用いられているためと修復時間の算出は、工数から1人で修復したと仮定した場合にかかる修復時間に置き直せばよいからである。そこで一人1窓口とすることで複数窓口の待ち行列問題を解けばよいことが判る。これらの条件における待ち行列を図1の状態遷移図に示す。

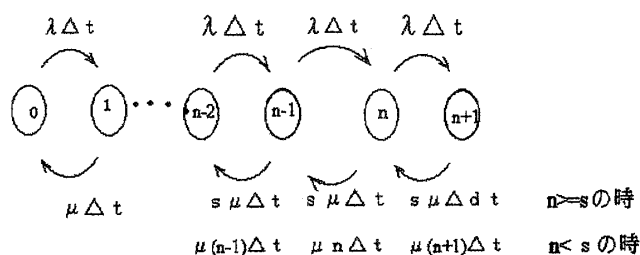


図1 状態遷移図

図1の円内の記号は系内数で、0は無故障、1は1個故障であり、系内数がs個までは待ちが発生しない。従ってポアソン到着、指数型サービス、複数窓口の待ち行列では故障発生時にすでに前事象が修復中であつた場合には待ちが発生し、修復中の窓口が空くと行列の先頭の事象がサービスを受ける。この時修復中の事象件数を含んだ行列の件数を系内数nとすると、 $n \rightarrow n+1$ という状態は新たな故障が発生することで系内数が1つ増えることを意味する。これは Δt 時間に $\lambda \times \Delta t$ の割合で発生する。ここで λ :故障発生率(件/時間) μ :修復率(件/時間) α

$= \lambda / \mu$ s:修復窓口数とし、更に、利用率 $\rho = \alpha / s = (1/s) \times (\lambda / \mu)$ とする。

平衡状態において状態nにある確率を P_n とすると、独立の同じ修復時間をもつ窓口がs個あつて、そのどれもが同じ修復率 μ で修復完了する可能性を持つ場合、全部が修復作業を行っているときは $s\mu$ 、一部のn個のみが修復中であれば $n\mu$ の割合でどれか1つのサービスが修復完了する。従って故障発生による修復作業への移行にあたっては、図1より次の式が成り立つ。

$$\lambda P_{n-1} + (n+1)\mu P_{n+1} = (\lambda + n\mu)P_n \quad 1 \leq n \leq s-1 \quad (1)$$

$$\lambda P_{n-1} + s\mu P_{n+1} = (\lambda + s\mu)P_n \quad n \geq s \quad (2)$$

$$\mu P_1 = \lambda P_0 \quad (3)$$

系内数nにおける状態確率 P_n は

$$n \geq s \text{ に対して } P_n = q^n s! \times P_s$$

$$P_n = \frac{s! \times q^n}{s! \times s^{n-s}} \times P_0 = \frac{a^n}{s! \times s^{n-s}} \times P_0 \quad (4)$$

$$0 \leq n \leq s \text{ に対して } P_n = \frac{a^n}{n!} \times P_0 \quad (5)$$

これより 系内数平均件数Lと待ち時間W、修復中の件数を含まない行列の件数 L_q と待ち時間 W_q 、修復窓口が塞がっていない確率 P_0 、 $\rho = 1 - P_0$ 、窓口が全部塞がっている確率 Π 、待ち時間rがtを越える確率 $P(r > t)$ 、修復時間の期待値を求めるとそれぞれ次の様になる。

$$\text{平衡条件 } \rho < 1, \quad \rho = \frac{\lambda}{s\mu} < 1$$

より、待ちが0となる確率 P_0 は

$$P_0 = \frac{1}{\sum_{n=0}^{s-1} \frac{a^n}{n!} + \frac{a^s}{(s-1)!(s-a)}} \quad (6)$$

系内滞留件数及び待ち時間は次の様に表される。

$$L_q = \frac{\lambda \mu a^s}{(s-1)!(s\mu - \lambda)^2} P_0 \quad (7) \quad L = L_q + a \quad (8)$$

$$W_q = \frac{1}{\lambda} \times L_q \quad (9) \quad W = W_q + \frac{1}{\mu} \quad (10)$$

時点tにおける滞留件数L(t)は、

$$L(t) \approx \frac{2\sqrt{t}}{\sqrt{\pi}} - \left(m + \frac{1}{2}\right) + \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \times \left(m^2 + m \frac{1}{4}\right) \times \frac{1}{\sqrt{t}} \quad (11)$$

ここでmは初期又は1つ前の時点での系内数とする。

以上の式を用いることによって、平衡条件下において平均的な待ち時間、待ち件数、待ちの発生状況が増加、減少、

平衡のどの状態か、オーバータイムの発生状況などの評価指数を求めることが出来る。これらの評価指数を用いて、船舶の海難や営業収益など、運航に与える影響度合いを考慮し、修復に対する優先順位を重故障と軽故障に対し付加した条件で、時間の経過に沿ったシミュレーションモデルを作成することで最適な保全要員数を導き出すこととした。

3. 外航船舶保全状況

船舶で通常行われる点検作業、一般整備作業、掃除、事務作業などの修復率、重故障、軽故障の故障率について集計し平均値を求めたものを表1に記す。これらのデータをもとに保全に従事する要員数毎の修復時間予測値と平均利用率及びアベイラビリティ、並びに2400時間シミュレーションを行った場合の作業滞留状況を表2に記す。表1の故障データは1982年より1996年迄の日本信頼性調査委員会から収集した63600件の保全データより、整備・点検データは現外航船社33隻からの4600件/2年分をもとに平均値を算出したものである。

表1 船舶故障・修復発生状況統計データ

λ:発生率	件/1000hrs	件/日	件/hr	日/件	hrs/件
点検	29.5	0.7	0.0295	1.41	33.9
整備	361	8.7	0.3610	0.12	2.8
軽故障	55	1.3	0.0550	0.76	18.2
重故障	9	0.2	0.0090	4.63	111.1
総計	454.5	10.9	0.4545	0.0917	2.2

	MH/件	日/件・人	hrs/件・人	mh/1000hrs	mh/日	要員数
点検	2.70	0.1125	2.70	79.65	1.91	0.24
整備	1.30	0.0542	1.30	469.3	11.26	1.41
軽故障	2.20	0.0917	2.20	121	2.90	0.36
重故障	5.00	0.2083	5.00	45	1.08	0.14
総計	1.573	0.0655	1.57	714.95	17.16	2.145

表2 各工数における要員数別修復期待時間hrs/case

1/μ:修復期待時間hrs/件	1名	2名	2.145名	3名	4名	5名	6名
点検	2.70	1.35	1.26	0.90	0.68	0.54	0.45
整備	1.30	0.65	0.61	0.43	0.33	0.26	0.22
軽故障	2.20	1.10	1.03	0.73	0.55	0.44	0.37
重故障	5.00	2.50	2.33	1.67	1.25	1.00	0.83
総計	1.573	0.787	0.733	0.524	0.393	0.315	0.262
平均 $\rho = \lambda / \mu$	0.71	0.36	0.33	0.24	0.18	0.14	0.12
平均アベイラビリティA	0.58	0.74	0.75	0.81	0.85	0.87	0.89
A = アベイラビリティ = MTBF / (MTBF + MTTR)							
平均LoadRatio/8hrs	2.14	1.07	1.00	0.71	0.54	0.43	0.36
平均1/μhrs/case	1.573	0.787	0.733	0.524	0.393	0.315	0.262
2400時間滞留累積件数	4183	506	445	294	142	123	86
2400時間滞留発生件数	1069	321	288	189	108	96	67
2400時間8Hraver件数	649	30	24	11	1	0	1

船内での1日の期待保全時間を8時間としてオーバータイム量を調査したが、表1に記したように船内作業には保全データとして記録される以外に、出入港における機器の運転時間、毎日の事務処理時間、インベントリの調査、出入庫処理など、記録に記載されない時間があり、平均1日

あたり14.8MHを必要としている。さらに週に1日の休日を加味するならば期待保全時間は保守要員一人あたり8×(6/7)/dayとなる。これは14.8/(6/7×8)=2.16人に相当する。また、この時の平均要員数は2.145人であった。表1のデータをもとに、待ち時間、処理件数、利用率、系内滞留数などを式(6)～(10)を使って以下のように計算した。

$$\text{平均1日あたりの保全作業時間を } \frac{6}{7} \times 8 = 6.86 \text{ 時間}$$

$$\text{配員指数} = 714.95 \text{ MH/1000Hrs} = 17.16 \text{ MH/day}$$

$$\text{とした時の1修復窓口要員数は } \frac{17.16}{6.86} = 2.5 \text{ 人}$$

$$\text{故障率 } \lambda = 454.5 \text{ cases/1000hrs} = 10.9 \text{ cases/day} \quad \text{MTBF} = 2.2 \text{ Hrs/case}$$

$$\text{MTTR} = \frac{6.86}{10.9} = 0.63 \text{ Hrs/case} \quad \text{の時の修復率 } \mu = 1587.3 \text{ cases/1000hrsより、}$$

利用率 ρ 、アベイラビリティAは

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu} = 0.29 \quad A = \frac{\text{MTBF}}{\text{MTBF} + \text{MTTR}} = 77.7 \%$$

$$\text{系内数平均値 } L = \frac{\rho}{1 - \rho} = \frac{\lambda}{\mu - \lambda} = 0.4 \text{ 件}$$

修復中の件数を含まない待ち行列の平均件数 L_q は

$$L_q = \frac{\rho^2}{1 - \rho} = \frac{\lambda^2}{\mu(\mu - \lambda)} = L - \rho = 0.11 \text{ 件}$$

ここで待ち時間並びに修復時間の平均値は次の様になる。

$$\text{系内待ち時間 } W = \frac{L}{\lambda} = 0.89 \text{ Hrs}$$

$$\text{修復中の件数を含まない時間 } W_q = \frac{L_q}{\lambda} = 0.26 \text{ Hrs}$$

$$\text{修復時間 } \text{MTTR} = W - W_q = 0.63 \text{ hrs}$$

次に系内数 $n=0$ の確率 $P_0 = 1 - \rho = 1 - 0.29 = 0.71$

$$P_0 = \rho^0 \times P_0 \text{ より } P_0 = (1 - \rho) \times \rho^0$$

従って、系内数 $n=1$ の確率 $P_1 = 0.71 \times 0.29 = 0.2$

窓口がすべて塞がって待たされる確率 Π は 窓口数 $S=1$ として

$$\Pi = \frac{S \cdot P_0}{S!} \times \frac{\rho^S}{1 - \rho} = \frac{P_0 \mu^S}{(S-1)! (S\mu - \lambda)}$$

$$P_0 = \frac{0.71 \times 1587.3 \times 0.29}{1 \times (1587.3 - 454.5)} = 0.29$$

もし待たされる確率を0.1以下に押さえるならば

$$0.1 = \frac{1587.3 \times 0.71 \times 0.29^s}{(s-1)! \times (s \times 1587.3 - 454.5)} \text{ より}$$

$s=2$ が求まる

従って、 $s=1$ の時、2.5人であるから要員は5人が必要となる。

ここで、システムが拡散し不安定となるのは利用率 ρ が1より大きい時、つまり修復窓口が1の場合は $\lambda > \mu$ であ

る。図2より $\rho=1$ の時の修復率の逆数である修復期待時間 MTTR は 2.2 hrs/case となる。

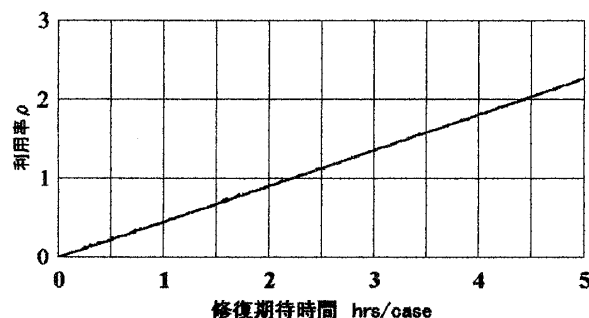


図2 利用率 ρ と修復期待時間

この場合の平均要員数は1名なので管理・掃除に必要な要員数 2.16 名を加えて最小 4 名で足りる。

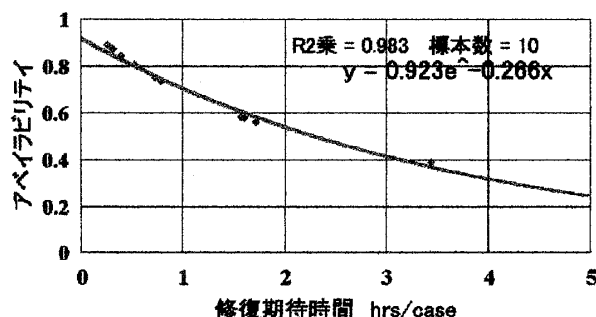


図3 アベイラビリティと修復期待時間

また $\rho=1$ の時のアベイラビリティは当然 0.5 であるが、修復期待時間 2.2 hrs/case 前後におけるアベイラビリティの変化を調べたものを図3に記す。さらに修復期待時間に対するオーバータイム発生状況を図4に記す。

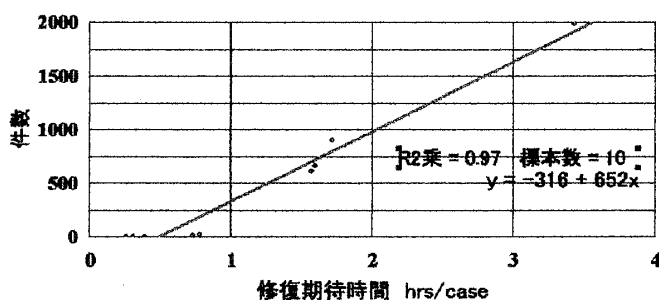


図4 オーバタイム発生件数と修復期待時間

図3より、80%以上のアベイラビリティを期待するためには修復期待時間は 0.52 となり、要員数は3名が必要となる。この場合のオーバータイム発生は、図4より、オーバータイム発生件数と修復期待時間の一次相関式より、1 日ほぼ 1 件以内となることが判った。以上から、統計データをもとにアベイラビリティを 80%、1 日あたりオーバータイム発生

件数を1件以内に想定したときの機関部要員数はおよそ5名が必要であることが判った。これは待ち行列における待たされる確率が 0.1 以下であることも意味している。しかしこれらの結果は実際の船舶の運航形態を想起した場合以下のような相違点がある。

- 1) 故障は 24 時間いつでも起こる可能性があるが、保全は 24 時間中の 8 時間で行われるわけではなく、昼間の 8 時間で全員が従事するか、もしくは当直体制に従って投入できる要員数が変化する。
- 2) 2) 停泊、出入港、航海の運航モードによって従事可能な保全要員数が変化する。
- 3) 陸上支援や機関部以外からの要員の応援もしくは入渠時などでは修復能力差が生じる。

そこで、要員数を 5 名とした場合で、実際の船舶の運航環境に合わせた状況でのシミュレーションについて調べた結果を次に示す。

4. 一般整備及び故障における保全時間状況 シミュレーション

待ち行列シミュレーションは事後保全として運航に影響を与える重故障、プラントに部分的機能障害を与える軽故障、予防保全としての計画的な整備及び機関当直などの点検の4項目に分類した。これら4つの作業の種別毎に故障率、保全工数を調査した結果を表1に記すが、これらの値は作業の難易度や作業の緊急性によって変化する。保全工数の違いは、例えば見回りや機関当直などの点検作業に比べ、技術的に経験や知識を必要とする整備作業では作業の前後処理の時間も必要とするから、より工数は増加したのとなり、軽故障では経験、知識のほかに故障に伴う機器操作や装置の大きさなどの影響が加わる。更に、重故障では速やかに運航障害に伴う航海の危険を取り除くため、最大の要員を復旧に当てるために、1 件当たりの保全工数は増加する。そこで、軽故障に対しては重故障の修復に優先度を与え、整備と点検では、整備に優先度を与え、事後保全と予防保全では、事後保全に優先度を付加した状態でシミュレーションを行った。時間毎のシミュレーションには式(11)をもとに表計算ソフト並びにシミュレーションソフトを利用して行った^{9),10)}、事象発生タイミングはポアソン分布乱数を用い、修復時期タイミングは指数分布乱数を用いた。優先度については待ちテーブルを設け、時間毎に算出した滞留数を表計算ソフトに転値し、8 時間連続して滞留が発生した場合にオーバータイムのカウントをした。

4.1 優先度並びに要員配分想定 2400 時間の状況

下記の仮定の下にシミュレーションを行った。

- 1) 保全優先順位を重故障>軽故障>一般整備>点検その他

とした。

- 2) 保全配員割合を重故障:全員:5名X1グループ、軽故障:3名X1グループ、整備:3名X1グループ、点検ほか:3名X1グループによって行うこととした。重故障以外を3名としたのは船内作業には保全データとして記録される以外に前述したようにおよそ2名が必要とされるからである。
- 3) シミュレーションは船舶の就労形態にあわせ下記の2種類に分けて行った。

- a) 1日3直制:乗組員を3組に分け、1組あたり8時間の就労する。従って24時間保全発生の都度、修復作業に取りかかれるが、保全可能要員数は1/3となるため保全可能工数は1/3に減少する。ただし重故障が発生した場合は直ちに全員で修復に当たるものとする。
- b) MO当直制:乗組員は全員が昼間8時間の就労する。従って24時間中残り16時間は保全が発生して保全は行われず待機状態となり翌日の昼間8時間に修復作業を行うものとする。ただし重故障が発生した場合は直ちに全員で修復に当たるものとする。

処理の流れ図を図5に記す。

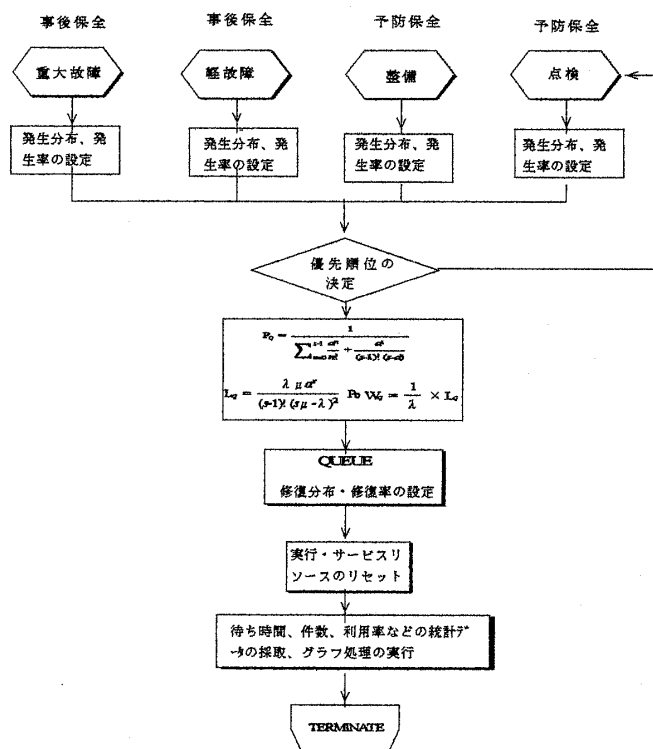


図5 処理フロー

4.2 重故障5人・軽故障3人・整備3人・点検3人における2400時間シミュレーション

重故障優先度付き1日3直制当直モデル
MO船モデル(8時間就労:16時間無人化)

4.2.1 1日3直制 当直モデル

重故障優先度付き1日3直制当直モデルにおける滞留件数並びに、MO船モデル(8時間就労:16時間無人化)における滞留件数シミュレーション結果を図6に記す

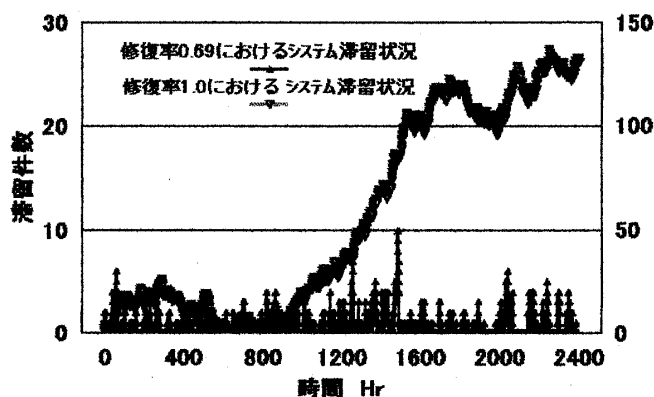


図6 3直制における重故障優先度付き2400時間滞留件数

図より、重故障以外の平均修復期待時間は0.69hrs/caseであるが、8時間X3直による当直体制では就労可能MHは1/3に減少する。従って修復期待時間は2.07となる。また、900時間目以降において滞留が増加し始めシステムは不安定な状況となる。さらに1500時間目では毎時100件を越す滞留が見られる。平均滞留件数も56件/hr、最大滞留件数137件/hr、平均待ち時間108時間となった。これでは900時間目以降では運航に支障を来すことになる。そこで900時間目で修復期待時間を1.0hrs/caseに増加した場合について、図6に重ね書きを行い、平均修復期待時間0.69hrs/caseの場合と比較すると、滞留の増加は抑えられていることが判る。この時の利用率はおおよそ51%、オーバertimeは97件/100日となった。このときの支援要員は2名を必要とする。これを必要要員数に変換するために1/3にすると修復期待時間は0.33となる。修復期待時間が0.33hrs/caseとなるためにはほぼ5名が必要であり、現在3名が修復に従事しているので結局2名が更に必要となる。しかしこの場合は3直制の中で修復作業を行うので各当直で1名増やすか、または昼間の当直時のみ1名増加すればよい。

4.2.2 MO船モデル

重故障の場合は発生と同時に修復開始、その他は就労時間内に修復作業を行うとした場合の修復期待時間0.69におけるシミュレーション結果を図7に記す。図7より1300時間目まではシステム内に滞留する件数は少ないがそれ以上では滞留件数が急激に増加する。そこで1300時間目で修復期待時間を0.69から0.4にした場合の結果を図7に重ね書きを行い比較すると、システムへの滞留が抑えられていることが判る。このときの平均的な滞留件数は

39件/hrから4件/hrに減少し、平均待ち時間も74時間から8時間に減少した。つまりこの時点で陸上支援などの外部支援員を1名投入し、重故障以外を4名で行えばシステムへの滞留は無くなる。これを1日3直の当直体制と比較すると滞留の発生時間は20%遅く、その発生頻度も30%少ないことから、同一保全要員であればM0当直体制の方が保全性が良いことが判った。

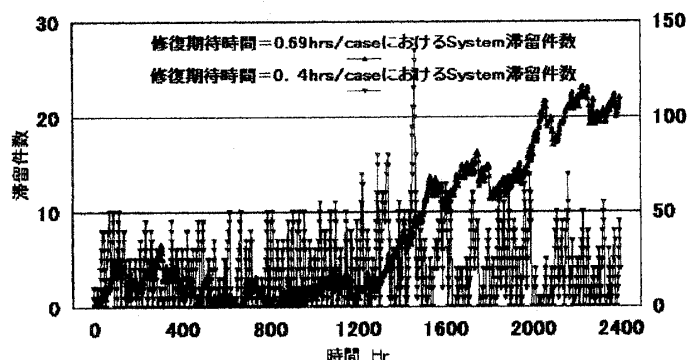


図7 M0船モデルにおける重故障優先度付き2400時間滞留件数

以上の結果より、要員数を5名とした場合で、実際の船舶の運航環境に合わせた状況でのシミュレーションでは、当直モデル、M0モデルともに、ある時期より滞留が急激に増加する傾向があるが、その時点で就労体制の一部変更や甲板部品等の支援を得れば、運航に支障を与えずに済むことが推測される。

5. 検証

シミュレーション条件と同じ状況を作り、実際の船舶で検証することは出来ないが、前述の信頼性調査委員会資料より、修復保全を施行した総数及び各機器の修復保全件数や所要要員数の集計結果を、機器系統別に分類し、保全修復時間を1時間毎に区切ったものを横軸に、修復保全件数及び所要要員数を縦軸にとった度数分布を図8に記す。

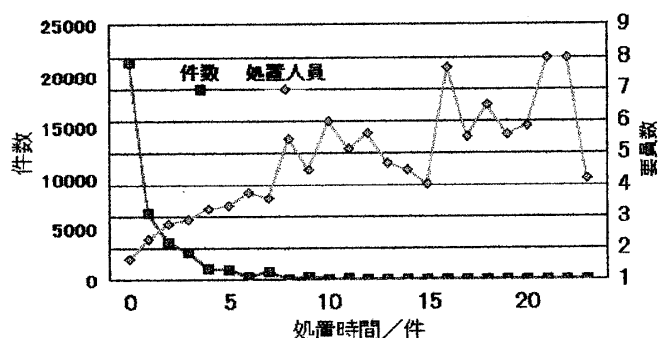


図8 処置時間別 度数分布

図より修復保全は1件あたり8時間以上では殆ど発生していない。この場合の要員数は5名以内であることが図から判読できる。

6. まとめ

保全時間データを参考として、修復に対する優先順位付加した待ち行列を用いシミュレーションモデルを作成することで、適切な保全要員数を導き出す方法について考察した。この方法を用いることで次のような事柄が判った。

- (1) 時間単位での保全状態シミュレーションにより、滞留件数が拡散する時期が判り、不安定期の予測ができた。
- (2) 就労状況の負荷量(忙しさの割合)を計量的に予測できるので、適切な保全要員を配員できるとともに就労中の船舶の適正配員数を計量的に検証できることが判った。
- (3) 重故障5人、軽故障、整備、点検各3人の2400時間シミュレーションの結果、不安定状況の発生はM0船モデルの方が遅く、過労働発生件数も若干少ないことが判った。
- (4) 時間単位のシミュレーションを行うことで、出入港などの運航上からくる修復制限や遅延を時間の経過に沿ってシミュレート出来るとともに航路、船種、海の気象状況毎の保全発生量を予測できる可能性を示した。

謝辞

最後になりましたが本研究は、日本郵船(株)工務部奥村氏のご指導並びに船舶技術研究所システム技術部のご協力を得て行うことが出来ました。ここに厚くお礼申し上げます。以上

参考文献

- 1) 城戸, 橋本, デーゼルプラントにおける保全性とアベイラビリティ, 第61回船用機関学会学術講演会論文集, pp. 174-177
- 2) 運輸省海上技術安全局編, 船舶信頼性調査委員会報告書, 1986年, 1989年, 1990年, 1991年, 1992年
- 3) NYK Ship Management Co, Trouble Report 1996-1999
- 4) H. Kido, Out Line of Diesel Engine Plant and Automation System Reliability, ISME90 Kobe, pp. F4-13, 1990
- 5) 森村英典, 大前義次, 応用待ち行列理論, pp. 7-43, pp. 141-180, 日本科学技術連盟, 1996年
- 6) 信頼性管理便覧編集委員会, 信頼性管理便覧, pp. 63-68, 日本規格協会, 1985年
- 7) 塩見弘ほか, 実践信頼性100問, pp. 105-107, 日本科学技術連盟, 1985年
- 8) 加藤ライジ, 数学モデルの作り方と理論, pp. 254-335, 工学図書, 1976年
- 9) LAW. A. M. & W. D. Kelton, Simulation Modeling & Analysis 2nd Edition, pp. 36-68, McGraw Hill, 1991
- 10) 森戸晋ほか, システムシミュレーション入門, pp. 163-198, 構造計画研究所, 1993年