船体強度の信頼性解析 (第2報)

——検査システムによる信頼性維持の統計理論——

名誉員 秋 田 好 雄*

Reliability Analysis in Strength of Ships (2nd Report)
——Statistical Theory of Maintaining Reliability of Ships in Service
by Surveying Systems——

by Yoshio Akita, *Honorary Member*

Summary

In the previous report, failures of hull structures in ships registered with Nippon Kaiji Kyokai, such as cracks in ship bottom transverses due to ship vibration, cracks due to improper local design and excessive corrosions etc. in hull structure, found by ship surveyors on occasion of annual surveys are analysed statistically and their occurrences are approximated by series of Weibull's distribution functions.

This report presents a statistical theory of predicting the occurrences of failures in ships of several types and ages under an assumption of two probability density functions which have been obtained from the failure databank, i. e., an exponential distribution indicating the number of failed structural components in individual ship and a function indicating distribution of failures in the fleet.

The predicted number of failures to be found by annual surveys are compared with observation in actual ships in cases of failures caused by vibration, improper local design, mishandling of cargo gear and heavy corrosions, respectively.

Furthermore, a method of prediction of the rate of scrapped ships due to excessive corrosion in a fleet is proposed in this paper.

1 ま え が き

船体強度の信頼性に関する研究は最近その緒についたが、この方向には2通りあり、一つは船体の設計で部材寸法を決定する際に、航体に与えるべき信頼性レベルをどう選ぶかという研究であり、他の一つは就航後の船体強度の信頼性がどのように変化し、維持されるべきかという研究である。本報告は後者に属している。

著者は就航後の船体強度の信頼性研究の第一歩として日本海事協会の検査報告書に基づいた損傷データバンクを解析し、船体の年次検査で発見された損傷件数が船齢に対して Weibull 分布で近似されることを示し、その密度関数を第1報で報告した¹⁾。

いま機械システムの信頼性理論にならって考えると、船体損傷の場合には初期損傷に相当するものとしては、プロペラ起振力による船尾部における防撓材端部のクラ

ックの発生が代表例であり、中期損傷としては不適当な局部設計によるクラック損傷や揚貨装置の操作ミス繰返しによる板材の凹入損傷などがあり、老齢期損傷としては板材や防撓材の腐食衰耗や減厚によるクラックや凹損があり、各その特徴が第1報で明らかにされた。

船体の各部材の強度は年次検査による修理保守によって建造時の値に維持されているが、本報告では年次検査で損傷が発見され修理される件数を船齢ごとに予測する理論を述べることにする。

船体の年間における損傷件数には損傷の進展速度が大きく影響する。本報告では疲労クラックのように進展速度が時間に対し加速的に増加する場合と、板材の初期衰耗のように減厚が時間にはほぼ比例して増す線形衰耗、また老齢船に見られるような塗装の劣化によって速度の増した衰耗の場合を検討した。船体は衰耗が進むとスクラップ化されるが、本論文で船齢とスクラップ化率の関係を求める式も提案した。

* 日本海事協会顧問

2 損傷の個船内分布

船体の損傷形態には種々のモードがあり、損傷の程度を量的に表現するときにはその形態によって適当な量を用いる。たとえば衰耗のときには減厚量、クラックのときにはクラック長さ、凹入損傷のときには凹入量が用いられている。

これらを“損傷量”と定義すると、これは時間と共に増し、その進行速度と就航後の経過時間が与えられると決まる。疲労損傷のときには random な外力下であってもクラックは加速的に進行し、衰耗のときには部材表面の塗装条件が変わらなければほぼ時間に比例的に進行し²⁾、木材運搬船などで多い揚貨装置の誤操作による部材の凹損は誤操作の繰返しにより進行する。なお、ここでは脆性破壊によるクラックの伝播のような損傷量がある条件で急速に増大する型の損傷や最初の損傷によって誘起された二次的な事故は扱わない。

時間と共に増大する損傷量は船舶検査システムにおいては毎年1回の年次検査で検査され、その量がある基準値を超えているときは修理が行われ、寸法は原型に復帰される。本論文ではこのプロセスによって発見修理される件数を年間の“損傷件数”とよぶ。これは当然に年間の修理件数に等しい。

クラック損傷の場合は上記とやや異なる点があり、年次検査のときに目視で発見されたクラックは直ちに修理される。したがってこの場合の修理基準値とは目視可能な最小クラック長さとなる。

ここで損傷件数の数え方を定義する。損傷がクラックのときにはその個数が損傷件数であり、凹損や衰耗のと

Fig. 1 Distribution of thickness losses due to corrosion measured in a tanker aged 11

Fig. 2 Distributions of corrosion rates in all registered ships and tankers

きにはその個数を数えることが困難なので、桁材のときには損傷本数、板材のときには溶接シームで囲まれた損傷ストレーキ数を損傷件数とする。

つぎに個々の船で損傷がどのように分布しているかという損傷量の個船内分布を考える。Fig. 1 は船齢 11 年のタンカーの定期検査のときに船体中央横断面と船首部横断面において、板材と桁材で行われたゲージテスト結果から求めた減厚量の分布を片対数紙に示したものである。縦軸はテストされた測定点の数を示している。

図示されるように減厚量に対する測定点の数は指数分布で近似されることがわかる。

Fig. 2 は 1973 年から 78 年の間で当協会に登録されていた船齢 16 年を中心とした全船舶とタンカーの板厚計測結果から大八木らが求めた衰耗速度 (mm/y) の片対数紙上の分布曲線を示す²⁾。ここでも衰耗速度は指数分布で近似されることが示される。

すなわち個船の各部材で腐食環境の差があるために、各部材の衰耗速度 λ は上述のように指数分布をすることになる。 λ の確率密度関数 $p(\lambda)$ は K を定数として次式で表わすことができる。

$$p(\lambda) = K e^{-K\lambda} \quad (1)$$

また個船内の全部材の平均衰耗速度を $\bar{\lambda}$ とすると、 $\bar{\lambda} = 1/K$ となり、式 (1) は

$$p(\lambda) = \frac{1}{\bar{\lambda}} e^{-\lambda/\bar{\lambda}} \quad (2)$$

となる。いま船内部材の減厚量 x を、部材ごとに異なる時間が無関係な部材定数 α と時間関数 $f(t)$ の積とし

て

$$x = \alpha f(t) \quad (3)$$

で表わし、時間関数 $f(t)$ はその船の各部材に共通であるとする。すなわち個船の船内各部材の衰耗は時間と共に相似に進行すると仮定する。衰耗速度 λ は x を微分して

$$\lambda = \frac{dx}{dt} = \alpha \frac{df}{dt} \quad (4)$$

となり、線形衰耗のときは $df/dt=1$ であるから $\alpha=\lambda$ である。

個船の平均衰耗量 $\bar{x}$ と平均衰耗速度 $\bar{\lambda}$ は

$$\bar{x} = \alpha f(t) \quad (5)$$

$$\bar{\lambda} = \alpha \frac{df}{dt} \quad (6)$$

で表わされる。ここで α は部材係数 α の個船内平均値で個船内では定数である。

式(2)ないし式(6)と密度関数の面積が1である条件から、個船内の衰耗量の密度関数は

$$p(x) = \frac{1}{\bar{x}(t)} e^{-x/\bar{x}(t)} \quad (7)$$

で表わされる。一例として船体部材の初期衰耗のような時間に比例的な線形衰耗のときには

$$f(t) = t, \quad \bar{\lambda} = \bar{\alpha}, \quad \bar{x} = \bar{\alpha}t \quad (8), (9), (10)$$

であるから

$$p(x) = \frac{1}{\bar{\alpha}t} e^{-x/\bar{\alpha}t} \quad (11)$$

α は平均衰耗速度に等しく、 p の時間経過は Fig. 3 に表わされる。図は $\bar{\alpha} = 0.1 \text{ mm/y}$ のときで、曲線は船

Fig. 3 Distributions of thickness losses in a ship and their mean values depending on age of ship

齢 t と共に右へ移動し、平均衰耗量も右へ等速で移動する。

疲労によるクラックなどのときには $\bar{\lambda}$ は時間に対して非線形となる。

3 フリート内分布

衰耗損傷のときには個船内の各部材の衰耗速度の分布は指数分布で近似されたが、そのフリート内すなわち同種類の船群や船級協会的全登録船のような、あるカテゴリーでの集団のなかでは平均衰耗速度のパラッキがあり、この分布をフリート内分布と定義する。

Fig. 4 は協会登録船の一般貨物船について定期検査時に行った部材の板厚計測から求めた衰耗速度の各船の平均値に対する隻数の分布を示す。Fig. 5 は同様にタンカーについて各船の衰耗速度平均値の分布を示す。両図で個船の平均値がある分布形をしていることがわかる。

つぎに、この分布形を近似する分布式を求める。一般にガンマ分布は ϵ, B を定数として

Fig. 4 Statistical distribution of mean corrosion rates of general cargo ships and comparison with modified Gamma distribution

Fig. 5 Statistical distribution of mean corrosion rates of tankers and comparison with modified Gamma distribution

$$f(x) \sim x^t e^{-Bx} \quad (12)$$

と表現されるが、ここでは実測値によく適合する分布形でかつ後述の積分式 (22) で closed form の解が求められる分布形として式 (12) の変数を逆数とした次式を用いる。すなわちフリート内の各船の衰耗速度平均値 $\bar{\lambda}$ の確率密度関数は A, B, ε を定数として

$$p(\bar{\lambda}) = A \left(\frac{B}{\bar{\lambda}} \right)^\varepsilon e^{-B/\bar{\lambda}} \quad (13)$$

と表わす。いま各船の平均値 $\bar{\lambda}$ のフリート内の全平均値 $\bar{\bar{\lambda}}$ を導入すると

$$\bar{\bar{\lambda}} = \int_0^\infty p(\bar{\lambda}) \bar{\lambda} d\bar{\lambda} \quad (14)$$

また $p(\bar{\lambda})$ の全積分が 1 であることから定数 A, B を求め

$$A = 1/(\varepsilon - 2) \cdot (\varepsilon - 2)! \bar{\bar{\lambda}}, \quad B = (\varepsilon - 2) \bar{\bar{\lambda}} \quad (15)$$

となる。

式 (13) で $\varepsilon = 5$ としたときの $p(\bar{\lambda})$ を Fig. 4, Fig. 5 に示すと、資料の多い貨物船の場合で $p(\bar{\lambda})$ はとくに実測値とよく一致する。このときは

$$A = \frac{1}{3 \cdot 3! \bar{\bar{\lambda}}}, \quad B = 3 \bar{\bar{\lambda}} \quad (16)$$

で与えられる。

上述の $p(\bar{\lambda})$ の実船例は線形衰耗と考えられるデータから求めたが、つぎに $\bar{\lambda}$ が時間に比例的でない場合も含めて考える。いまフリート内で同一船齢の船の $f(t)$ が同じであるとすれば、式 (6) の両辺についてフリート内全平均値をとると

$$\bar{\lambda} = \bar{\alpha} \frac{df}{dt} \quad (17)$$

が成り立ち、式 (13), (15) で $\bar{\lambda}$ を $\bar{\alpha}$ に置き換えた次式が成り立つ。すなわち個船の部材係数平均値 $\bar{\alpha}$ のフリート内での密度関数は

$$p(\bar{\alpha}) = \frac{1}{3 \cdot 3! \bar{\alpha}} \left(\frac{3 \bar{\alpha}}{\bar{\alpha}} \right)^5 e^{-3 \bar{\alpha}/\bar{\alpha}} \quad (18)$$

で表わされ、 $\bar{\alpha}$ は個船の平均部材係数 α のフリート内全平均値であり、フリート内では定数である。

4 損傷発生数・修理件数の期待値

船体検査には、年次、中間、定期と種々のレベルがあり、いずれかが年 1 回行われるが、本論文では均等な検査が毎年行われ、損傷量がある基準値を超えている場合には毎年修理が行われ、船体建造時の強度が維持されるものとする。

まず個船について検査時の年間損傷発生期待値を求める。本論文では発見率を 100% として発生数と発見数と修理件数が等しいと考える。

前述のように船齢 t の個船内の損傷量の区間 $(x, x +$

Fig. 6 Number of unrepaired structural components M_{res} after annual survey

dx) に対する損傷部材数の期待値を $m dx$ とすると、 m の分布はその船の生涯における損傷修理対象全部材数を M_0 として、式 (7) から

$$\frac{m(x)}{M_0} = \frac{1}{\bar{x}(t)} e^{-x/\bar{x}(t)} \quad (19)$$

となる。

いま損傷の修理基準値を x_R とすると、年次検査を受けたときに修理を必要としないで残る残存部材数の期待値 M_{res} は Fig. 6 で与えられる面積に等しいから

$$\begin{aligned} M_{res} &= \int_0^{x_R} m dx = M_0 (1 - e^{-x_R/\bar{x}}) \\ &= M_0 (1 - e^{-x_R/\bar{\alpha} f}) \end{aligned} \quad (20)$$

この解析においては一度修理された部材はその後は船の生涯の中で再び損傷することはないと仮定する。船齢 t における個船の 1 年間の損傷修理部材数の期待値 M_{RI} は M_{res} の 1 年間の減少分であるから、式 (20) を用いて

$$\begin{aligned} M_{RI} &= -\frac{dM_{res}}{dt} = -\frac{dM_{res}}{df} \frac{df}{dt} \\ &= M_0 \frac{x_R}{\bar{\alpha}} \frac{df}{dt} e^{-x_R/\bar{\alpha} f} \end{aligned} \quad (21)$$

つぎにフリート内分布を考え、フリートにおける 1 年間 1 隻当りの損傷修理部材数の期待値を M_R とすると M_0 は共通であり、式 (21), (18) から M_R が求められる。

$$\begin{aligned} M_R &= \int_0^\infty M_{RI} p(\bar{\alpha}) d\bar{\alpha} \\ &= \frac{27 M_0 x_R \bar{\alpha}^4}{2 f} \frac{df}{dt} \int_0^\infty \frac{1}{\bar{\alpha}^6} \exp\left(-\frac{x_R + 3 \bar{\alpha} f}{\bar{\alpha} f}\right) d\bar{\alpha} \\ &= \frac{324 M_0 x_R}{\bar{\alpha}} \frac{1}{f^2} \frac{df}{dt} \end{aligned} \quad (22)$$

損傷度が時間に対し比例的であれば、式 (8) から次式をうる。

$$\frac{M_R}{M_0} = \frac{324 x_R}{\bar{\alpha} \left(\frac{x_R}{\alpha f} + 3 \right)^5} \frac{1}{t^2} \quad (23)$$

時間関数が時間の k 乗であれば次式となる。

$$f(t) = t^k \quad (24)$$

$$\frac{M_R}{M_0} = \frac{324 k x_R}{\bar{\alpha} \left(\frac{x_R}{\alpha t^k} + 3 \right)^5} t^{k+1} \quad (25)$$

Fig. 7 Predicted number of annual failures proportional to time

Fig. 8 Predicted number of annual failures proportional to square of time

Fig. 9 Predicted number of annual failures proportional to cube of time

$f(t)$ が t , t^2 および t^3 の三つの場合についての M_R/M_0 を Fig. 7, 8, 9 に示す。指数 k が増すにつれて曲線は次第に鋭い極値を作る。

5 振動, 設計不良および誤操作による損傷

前章の理論値と登録船の検査時に発見修理された件数とを比較するために第1報の実例について考察する。損傷としては振動によるクラック, 局部設計不良によるクラックと揚貨機の誤操作による凹損の3例をまずとりあげる。

前章までは主に初期衰耗損傷の統計分布を扱い, その分布は個船内では指数分布, フリート内では平均値の逆数がガンマ分布で表わされ, 個船内で指数分布をする理由は各部材の腐食環境の差に基づくことを述べた。

この章で扱う疲労損傷などにおいても各部材では作用応力レベルの差があるので, これらに依存する損傷量は衰耗のときと同じく指数分布をし, フリート内平均値分布の逆数もガンマ分布をすると考える。

理論値を計算するときに式 (24) の定数 k , 式 (18) の $\bar{\alpha}$, 式 (25) の M_0 を決める必要がある。疲労のときには k と $\bar{\alpha}$ は破壊力学と外力レベルの考察を必要とするが, この面からの研究は次の機会にゆずるとして, ここでは理論値と実測値が合うように定数の設定を行う。

定数 k は曲線全体の形状に関係し, 振動による疲労クラックの年間損傷修理件数は計算値の $k=3$ のときに近い。すなわち, 船体でクラック長さは発見されるまでは時間の3乗に比例して拡大していると考えられる。

Fig. 10 は, 振動損傷例と理論値を比較したものである^{**}。一般貨物船の船尾タンクのトランス材のスティフナー端部に生ずるクラックの年間1隻当りの損傷件数は

Fig. 10 Comparison between predicted and observed numbers of cracks due to vibration found at annual surveys

Table 1 Constants in Eq. (25) for estimation of cracks per one ship year due to vibration

Type of Failure	k	$x_R/\bar{\alpha}$	M_0
Cracks in Cargo APT Transv.	3	30	6.24
Cracks in Tanker COT Bott. Transv.	3	800	9.18
Cracks in All Ships	3	500	6.70

船齢3年で最大値を示し、その後は急速に減少している。タンカーの貨油タンク船底トランス材に生ずるクラックは船齢10年、また全登録船のときには8年で最大値を示し、計算値は実測値とよい一致を示している。このときの定数は Table 1 に示すとおりである。

貨物船船尾タンクのクラックは Table 1 の $x_R/\bar{\alpha}$ の値から見て伝播速度がかなり早いことがわかる。

つぎに局部設計不良による損傷のときはほとんどがクラック損傷であり、その理論値と計算値の比較は Fig. 11 に示される。同図には揚貨機の誤操作の繰返しによる凹損のときの値も示されており、いずれも k が3の場合が適合している。この定数は Table 2 に示すとおりである。

Fig. 11 でも理論値と実測値は同じ傾向を示している。不適当な局部設計による損傷は疲労クラックであり、その伝播速度も発見に至るまでは時間の3乗にほぼ比例していると考えられる。誤操作のときは板材が一度凹損を受けると、これに伴っておきた桁材の損傷のためにつぎ

Fig. 11 Comparison between predicted and observed numbers of failures found at annual survey

Table 2 Constants in Eq. (25) for estimation of number of failures due to improper local design and improper cargo gear handling in all registered ships

Type of Failure	k	$x_R/\bar{\alpha}$	M_0
Cracks due to improper design	3	1800	32.0
Dents due to mishandling	3	1300	26.5

の貨物落下に対して変形しやすく、さらに塑性変形の進行や衰耗との複合作用で凹損量が時間の3乗程度に進行すると考えられる。

6 後期衰耗による損傷

船体構成部材の衰耗は建造後12年位までは塗装の効果が保たれ、板厚のゲージングによる減厚量の調査によるとほぼ時間に比例した衰耗がみられるが²⁾、その後は残存材では塗装が次第に劣化し、衰耗速度が増すと考えられる。実船の資料には新替材も含めた全減厚量の調査しかなく、以上の点は不明であるが、もし衰耗が時間に比例的であるとすれば Fig. 7 に示したように修理件数はゆるやかに変化するはずである。しかし実船の衰耗修理件数は Fig. 11 に見るような鋭い最大値とその後の早い減少を示している。

いま、式(3)で導入した時間関数 $f(t)$ を初期には時間に比例するとして、 $f(t)=t$ とし、ある船齢 t_1 以後では Fig. 12 に示すように傾斜の大きな直線式と考える。また t_1 付近ではなめらかな曲線の移行を考えて指数関数の遷移曲線を導入する。

結局 $f(t)$ を次式のように考える。

Fig. 12 Time functions of corrosion against ages of ships

** Fig. 10 は第1報の Fig. 10 と同じであるが、第1報の縦軸ではすべての船齢と損傷種別にわたる年間1隻当たり損傷数全平均値を1としている。

$$f(t) = \begin{cases} t + he^{-b(t-t_1)} & (t < t_1) \\ c(t-t_1) + t_1 + he^{-b(t-t_1)} & (t \geq t_1) \end{cases} \quad (26)$$

ここで h, b, c は定数で、右辺最終項は遷移関数である。 $t=t_1$ での df/dt の連続性から次式が必要となる。

$$2hb = c - 1 \quad (27)$$

t_1 と c は塗装劣化の程度により異なり、船種によって変ると考えられる。

個船の各部材の衰耗減厚量 x は式 (3) が示すように式 (26) に α を乗じたものであるが、 x は修理基準値 x_R より小さい範囲のみに適用される。したがって、高齢船で対象になる部材とは船齢の若いときに衰耗進行のおそかった部材で、高船齢になって塗装劣化を生じて衰耗する部材である。

つぎにスクラップ化の問題を考える。高齢船に対しては衰耗の著しい船がスクラップ化されるので、年間の1隻当りの衰耗の損傷件数の予測を行うときにはスクラップ化による隻数の減少を考える必要がある。すなわち、スクラップ化により程度の悪い船が淘汰され、比較的よい船が残る影響を考える必要がある。

いまスクラップ化がその船の平均衰耗量が一定値 $\bar{x}_s$ に達すると行われるものとする。

$$\bar{x} = \bar{x}_s \quad (28)$$

式 (5) から、

$$\bar{\alpha} = \frac{\bar{x}_s}{f(t)} \quad (29)$$

が得られる。スクラップ化されずに残った残存船隻数と新造当時の隻数の比を残存船隻数率の期待値 P_{res} とすると、式 (18) を積分し、上限を式 (29) とした累積値として

$$\begin{aligned} P_{res} &= \int_0^{\bar{x}_s/f} p(\bar{\alpha}) d\bar{\alpha} = \int_0^{\bar{x}_s/f} A \left(\frac{B}{\bar{\alpha}} \right)^5 e^{-B/\bar{\alpha}} d\bar{\alpha} \\ &= -AB \int_{\infty}^{3\bar{\alpha}f/\bar{x}_s} \xi^3 e^{-\xi} d\xi \\ &= 1 - \frac{1}{\Gamma(4)} \gamma \left(4, \frac{3\bar{\alpha}f}{\bar{x}_s} \right) \end{aligned} \quad (30)$$

をうる。

ここで ξ は積分変数 ($\xi = 3\bar{\alpha}f/\bar{x}_s$)、 γ は不完全ガンマ関数、 $\bar{\alpha}$ は衰耗速度のフリート平均値である。なおこの章の議論では、衰耗は初期には線形なので、 $\bar{\alpha}$ は線形衰耗时の衰耗速度のフリート平均値に等しい。

フリートにおける建造時からの累積スクラップ船隻数率 P_{scr} は次式で与えられる。

$$P_{scr} = 1 - P_{res} = \frac{1}{\Gamma(4)} \gamma \left(4, \frac{3\bar{\alpha}f}{\bar{x}_s} \right) \quad (31)$$

例として第1報で述べた全登録船の累積スクラップ船隻数率を求める。フリートの初期衰耗速度平均値を $\bar{\alpha} = 0.10 \text{ mm/y}$ とし²⁾、スクラップ時平均衰耗量 $\bar{x}_s$ を $\bar{x}_s/x_R = 1.57$ ($x_R = 4 \text{ mm}$ とすれば $\bar{x}_s = 6.28 \text{ mm}$) と設定

Fig. 13 Comparison between predicted and observed percentage of scrapped ships in all registered ships

する。時間関数 $f(t)$ は Fig. 12 の全登録船の値、すなわち $t_1 = 12$ 年、 $c = 8$ 、 $h = 5.8$ とすると累積スクラップ船隻数率は Fig. 13 の実線のように求まり、実際の値とよく一致する。

ここで留意すべきことは、 $\bar{x}_s$ は個船の残存部材の平均衰耗量ではなく、建造時の全部材が修理をせずにそのまま衰耗をしたと考えた見掛けの平均衰耗量を示すものである。この平均衰耗量は Fig. 3 に示される“MEAN”であり、部材修理に関係なく図の右方向に時間と共に移動する量である。 $\bar{x}_s$ は 6.28 mm であり、すでに修理基準値 $x_R = 4 \text{ mm}$ を超えた値となっている。実際の残存部材の平均衰耗量を計算してみると、スクラップ船では修理基準値をやや下回る値が得られる。

つぎにスクラップ化のための残存隻数の減少を考えて修理件数を求める。まず式 (22) の積分上限を変えてスクラップ化のあるときのフリート内の年間損傷修理件数を求めると、新造時隻数1隻当りで、

$$\begin{aligned} M_R &= \int_0^{\bar{x}_s/f} M_{RI} p(\bar{\alpha}) d\bar{\alpha} \\ &= \frac{27}{2} \frac{M_0 x_R \bar{\alpha}^4 f^3}{(x_R + 3\bar{\alpha}f)^5} \frac{df}{dt} \int_{(x_R + 3\bar{\alpha}f)/\bar{x}_s}^{\infty} \eta^4 e^{-\eta} d\eta \\ &= \frac{324}{\bar{\alpha}} \frac{M_0 x_R}{(\frac{x_R}{\bar{\alpha}f} + 3)^5} \frac{1}{f^2} \frac{df}{dt} \\ &\quad \times \left\{ 1 - \frac{1}{\Gamma(5)} \gamma \left(5, \frac{x_R + 3\bar{\alpha}f}{\bar{x}_s} \right) \right\} \end{aligned} \quad (32)$$

ここで η は積分変数 ($\eta = (x_R + 3\bar{\alpha}f)/\bar{x}_s$) である。したがってフリート内の残存船1隻当りの年間損傷修理件数の期待値 M_{RS} は次式で与えられる。

$$M_{RS} = \frac{M_R}{P_{res}} = \frac{324 M_0 x_R}{\bar{\alpha}} \frac{1}{(\frac{x_R}{\bar{\alpha}f} + 3)^5} \frac{df}{f^2} \frac{df}{dt}$$

Fig. 14 Comparison between predicted and observed number of failures due to corrosion at annual surveys

$$\times \left\{ 1 - \frac{1}{\Gamma(5)} \gamma \left(5, \frac{x_R + 3\bar{\alpha}f}{\bar{x}_s} \right) \right\} \\ \div \left\{ 1 - \frac{1}{\Gamma(4)} \gamma \left(4, \frac{3\bar{\alpha}f}{\bar{x}_s} \right) \right\} \quad (33)$$

いま全登録船に対して Fig. 12 の $f(t)$ を用い、式 (33) による年間修理件数を求め、実測値と比較すると Fig. 11 に示すようになる。両者はばらつきはあるが同傾向を示している。この例では衰耗対象部材数 M_0 は 239 となった。

特定の船種として鉱石運搬船、油送船、一般貨物船の3種をとり、これらの1977年から81年までの5年間の船齢に対する残存船1隻当りの年間衰耗修理件数を示すと Fig. 14 が得られ、これと計算値を比較してみる。計算には Fig. 12 の時間関数 $f(t)$ と実測²⁾ から得た3船種のそれぞれの初期衰耗速度 $\bar{\alpha}$ の値 0.12, 0.10, 0.09 mm/y を用いる。Fig. 14 にその比較を示すが、 M_{RS} にはほぼ同傾向の変化が見られ、いずれの船種においても船齢12年以後に最大値があり、その後は減少している。減少の理由は損傷修理をすすめるに従い修理すべき残存部材がへってくる事実に基づいている。対象部材数は3船種に対しそれぞれ611, 179, 281となり、鉱石運搬船では大きな値であり、衰耗対象部材が多いことを示している。

7 パラメータの影響

前述の計算には種々のパラメータが用いられたが、パラメータが計算結果に及ぼす影響を求めてみる。

全登録船の衰耗損傷の例をとって、まず検査における修理基準値 x_R の影響を求める。Fig. 15 は x_R を 4, 6, 8 mm としたときの修理件数変化を示し基準値をゆるくするほど修理件数は高船齢の方にのびる。また図中

Fig. 15 Effect of corrosion criteria on the number of repairs at annual surveys

Fig. 16 Effect of mean values of mean corrosion rates in fleet on number of repairs at annual surveys

の点線はスクラップ化がないと仮定したときの値で、修理件数の最大値はのびるが、高船齢では曲線は逆転している。

つぎに衰耗速度、とくに初期衰耗速度のフリート平均値 $\bar{\alpha}$ の影響をみる。Fig. 16 は全登録船についての結果で、 $\bar{\alpha}$ が増すと修理件数は増加するが高船齢ではその差はへってくる。

8 結 論

第1報で、NKの損傷データバンクから得られた船体の年次検査の際の損傷修理部材数を各船種と各船齢に対して明らかにしたが、本報告ではこの損傷部材数を統計的に予測する理論を示した。主な論点を次に述べる。

(1) この理論の前提としてつぎの二点がある。

a. 個々の船の船体構成部材においてクラック長さ、

衰耗減厚量, 凹損深さなどの損傷量は指数分布をす。この分布の原因は各部材における応力レベルや腐食環境の差などに基づくためと考えられる。

- b. あるカテゴリーで個船が集合したフリートの中では個船の損傷量の平均値はある型の分布をし, 本論文ではその逆数がガンマ分布で近似されることがわかった。

以上の前提は損傷データバンクの中から衰耗の場合に確かめられているが, 他の損傷形式のときも成立すると仮定し, 損傷件数の期待値と実測値がほぼ合う結果を得た。

(2) 損傷例として全登録船, 一般貨物船, タンカーの場合について振動による船底部の年間のクラック損傷修理件数を各船齢に対して推定する式を得た。

(3) 船体構成部材の衰耗に対しても年間衰耗修理件数を推定する式を得た。また個船がスクラップ化される船齢は部材の平均衰耗量がある値に達するときであることを明らかにし, スクラップ時期を推定する式を得た。

衰耗の初期には, ほぼ時間に比例的な減厚がみられる

が²⁾, 中期以降は塗装の劣化などの腐食環境の変化により衰耗速度が早まると考えられる。この点はさらに今後の研究を要する。

今後の研究としては船体部材における応力レベルと破壊力学を考えた研究が必要であり, また損傷と設計との関連と検査システムの検討が残されている。

最後に本論文について資料調査に協力を得た日本海事協会, 池田 均, 岡崎 徹, 大八木広, 片岡林平の諸氏と討論をいただいた西村充男, 湯浅通史, 井野幸男の諸氏および農工大本間教授に感謝の意を表する。

引用文献

- 1) 秋田: 船体強度の信頼性解析(第1報), 損傷確率密度関数について, 日本造船学会論文集, 第155号, 昭和59年6月.
- 2) 大八木: 板厚計測データによる船体部材衰耗についての統計的調査, 日本海事協会会誌, No. 183, 1983.