(昭和 60 年 11 月 日本造船学会秋季講演会において講演)

船体構造部材の検査に関するベイジアン 信頼性解析

——実船の倉内肋骨の疲労破損への適用——

正員 板 垣 浩* 正員 山 本 規 雄**

Bayesian Reliability Analysis on Ship Structural Members
——An Application to the Fatigue Failures at the Lower End of
Hold Frames of Ship——

Hiroshi Itagaki*, Member Norio Yamamoto**, Member

Summary

In this paper, discussion is made on a problem of determining the inspection interval appropriately to keep the reliability of ship structure at a certain level which may be equal to the initially estimated one at the design stage. Bayesian reliability analysis method is applied to the evaluation of the results of repeating inspections of hull structural members to be incorporated with improvement of the reliability of ship structures. A general formulation is given on the following assumptions that (1) fatigue life of the structural member considered follows a two-parameter Weibull distribution, (2) its scale parameter is unknown, and (3) the uncertainty of inspection is introduced as the average detectability which is determined from the probability distribution function of fatigue crack size and the detectability of certain size of a crack.

Actual inspection records are analysed by the proposed method to prove its effectiveness for estimating the safety of ship structures after inspections.

1 緒 言

船体構造の安全性解析にも、他の分野の構造物と同様に、信頼性工学的手法を適用する試みが幾つかなされている^{1)~4)}。信頼性工学的手法の適用に際し、最終的には Fully Probabilistic Approach が望まれるが、そのためのデータ取得が困難であることから、現実的とはいえない。したがって、従来行われてきた多くの研究は、いわゆる Semi-Probabilistic Approach であり、コードあるいは設計のためのガイドライン設立のための研究として評価されている。この手法が有効であるためには、従来の経験による調整が不可欠であるが、船舶などの大型構造物に生じる重大損傷は、非常に稀な事象であり、困難さを伴うのが現状である。

船体構造の一部に生じる損傷で、比較的軽微なものであって、しかも、そのまま放置すれば重大事故をひき起

こす一因となるものは幾つか考えられる。倉内肋骨に生じる疲労き裂などは、その良い例である。船舶の検査の主目的の一つは、そのような損傷を、重大損傷へと進展する以前に発見し、修理を施し、船体構造の安全性を維持することである。このような、船舶の就航と検査の繰り返しを考えた場合、検査ごとに順次得られる検査結果は、信頼性解析を行う上で、非常に有効なデータとなり得る。

著者らは、このような観点から、ベイジアン解析手法を用いて、信頼性解析に検査結果を活用するという問題を取扱ってきた^{5),6)}。すなわち、倉内肋骨下端部に生じる疲労き裂損傷を対象として、繰り返し行われる検査から入手するデータを解析することから、船体構造の安全性を維持していくための適切な検査時期の設定という問題を考え、提案手法をシミュレーションにより検討してきた訳である。

本報では、実船を例にとり、過去の検査報告による結果を調査し、提案手法の実例への適用を試みた。

* 横浜国立大学工学部

** (財)日本海事協会開発部

2 解析モデル及び問題の公式化

本報では、繰り返し検査ごとに得られる検査結果を活用した信頼性解析の試みという立場から、船体構造に生じ得る種々の損傷のうち、倉内肋骨下端部に生じる疲労き裂損傷を例にとり、2.1に示すような簡易なモデルを設定した。また、2.2において、ベイジアン解析を用いた一般的な推定方法について簡単に述べる^{5),6)}。

2.1 解析モデル

解析を容易にするために、以下のモデルを想定した。

(1) 統計的に同一と見なせ得るすべての部材は、目視により検査され、疲労き裂損傷（以下、欠陥という。）が発見された場合、修理を施され、最初の状態に戻る。

(2) 疲労寿命を、部材が使用されてから欠陥が生じ、目視検査により発見し得る最小寸法まで成長するまでの時間と定義し、次式に示す2母数ワイブル分布に従う。また、分布の不確実性は、寿命の平均的な値を示す特性値である尺度母数 (β) の不確実性により依存する。

$$F_T(t|\beta) = 1 - \exp\left\{-\left(\frac{t}{\beta}\right)^\alpha\right\} \quad (1)$$

(3) 寿命を超えた部材に存在する欠陥の寸法は、次式の指数分布に従う。

$$F_X(x|\lambda) = \begin{cases} 1 - \exp\{-\lambda(\tau)(x - \mu)\} & ; x \geq \mu \\ 0 & ; x < \mu \end{cases} \quad (2)$$

ここで、母数 λ は、寿命後の経過時間 τ の関数であるが、この値のみ未知である。

(4) 寸法 x の欠陥の発見率は、次式の指数分布に従う。

$$D(x|a) = \begin{cases} 1 - \exp\{-a(x - b)\} & ; x \geq b \\ 0 & ; x < b \end{cases} \quad (3)$$

ここで、母数 a の値のみ未知である。

2.2 問題の公式化

「時刻 t_k に行われる k 回目検査において、 M 本の倉内肋骨のうち n_k 本に欠陥を発見した。」という情報を各検査ごとに得た場合、この事象は、それぞれの部材に生じる事象により構成される。すなわち、欠陥を発見した場合としなかった場合である。前者を $E_v[A]$ と記し、後者を $E_v[B]$ と記す。欠陥を発見しなかった場合、欠陥を見落とした場合となかった場合が考えられ、両者を B_1 と B_2 で区別して考える。ただし、両者は確率事象であり、いずれかの判別は不可能である。

また、発見された欠陥の寸法が必ずしも正確に与えられるとは限らないので、欠陥発見率は、次式の平均発見率で評価する。

$$\bar{D}(\tau|a, \lambda) = \int_0^\infty D(x|a) \frac{dF_X(x|\lambda)}{dx} dx \quad (4)$$

以下では、 $\bar{D}$ の値自体を不確実要因として、 $\bar{D}$ を未知の定数と考える。 $\bar{D}$ を定数と考えることは、判断を下す上で安全側の仮定である。

2.2.1 検査結果の生起確率

k 回目検査における事象 A は、ある時刻から使用に供せられ、使用中に寿命を迎え、 k 回目検査までで欠陥を発見できず、 k 回目検査において発見し得たという事象の結合事象であることから、事象 A の生起確率は、次式で表わされる。

$$P_r\{E_v[A; k]\} = \sum_{i=0}^{k-1} \frac{n_i}{M} \sum_{j=1}^{k-i} \{F_T(t_{i+j} - t_i|\beta) - F_T(t_{i+j-1} - t_i|\beta)\} (1 - \bar{D})^{k-(i+j)} \bar{D} \quad (5)$$

事象 B_1 は、ある時刻から使用に供せられ、使用中に寿命を迎え、以降の検査において欠陥を発見し得なかったという事象の結合事象であることから、事象 B_1 の生起確率は、次式で表わされる。

$$P_r\{E_v[B_1; k]\} = \sum_{i=0}^{k-1} \frac{n_i}{M} \sum_{j=1}^{k-i} \{F_T(t_{i+j} - t_i|\beta) - F_T(t_{i+j-1} - t_i|\beta)\} (1 - \bar{D})^{k-(i+j-1)} \quad (6)$$

事象 B_2 は、或る時刻から使用に供せられてから k 回目検査まで寿命に達しなかったという事象の結合事象であることから、事象 B_2 の生起確率は、次式で表わされる。

$$P_r\{E_v[B_2; k]\} = \sum_{i=0}^{k-1} \frac{n_i}{M} \{1 - F_T(t_k - t_i|\beta)\} \quad (7)$$

ただし、(5)、(6)、(7)式において、 $n_0 = M$ および $t_0 = 0$ として考える。

以上より、 k 回目検査結果の生起確率が次式で表わされる。

$$P_r[\text{Data}; k] = (P_r\{E_v[A; k]\})^{n_k} \times (P_v\{E_v[B_1; k]\} + P_r\{E_v[B_2; k]\})^{M - n_k} \quad (8)$$

2.2.2 ベイジアン解析

前項で示した検査結果に基づいて推定を行うわけだが、不確実要因 β および $\bar{D}$ の値に対し、従来の経験や過去の同種の構造による資料から、不確実要因のとり得る値に対し、確信の度合を0~1の数値で割り当て事前密度を次式のように設定する。

$$f^0(\beta, \bar{D}) = \frac{1}{\beta_2 - \beta_1} \cdot \frac{1}{\bar{D}_2 - \bar{D}_1}; \beta_2 \geq \beta \geq \beta_1, \bar{D}_2 \geq \bar{D} \geq \bar{D}_1 \quad (9)$$

このとき、ベイズの定理を用いることにより、 k 回目検査後の不確実要因 β および $\bar{D}$ の事後密度は、次式のように得られる。

$$f^k(\beta, \bar{D}) = \frac{\prod_{k'=1}^k P_r[\text{Data}; k'] f^0(\beta, \bar{D})}{\int_{\beta_1}^{\beta_2} \int_{\bar{D}_1}^{\bar{D}_2} [\text{Numerator}] d\bar{D} d\beta} \quad (10)$$

検査後時間 t 経過したときの、 M 本の倉内肋骨全体の信頼度を R_M 、また、存在するであろう欠陥部材数を

n' とすると、それぞれ以下のように、 β および $\bar{D}$ の期待値として求められる。

$$\bar{R}_M^k(t) = \int_{\beta_1}^{\beta_2} \int_{\bar{D}_1}^{\bar{D}_2} R_M(t|\beta, \bar{D}) f^k(\beta, \bar{D}) d\bar{D} d\beta \quad (11)$$

ここで、

$$R_M(t|\beta, \bar{D}) = \{R(t; \text{repair})\}^{n_k} \{R(t; \text{no repair})\}^{M-n_k} \quad (12)$$

$$R(t; \text{repair}) = 1 - F_T(t|\beta) \quad (13)$$

$$R(t; \text{no repair}) = \frac{\sum_{i=0}^{k-1} \frac{n_i}{M} \{1 - F_T(t_k - t_i + t|\beta)\}}{P_r\{E_v[B_1; k]\} + P_r\{E_v[B_2; k]\}} \quad (14)$$

$$E[n'(t); k] = (M - n_k) \{1 - \bar{R}_1^k(t)\} + n_k \{1 - \bar{R}_2^k(t)\} \quad (15)$$

ここで、

$$\bar{R}_1^k(t) = \int_{\beta_1}^{\beta_2} \int_{\bar{D}_1}^{\bar{D}_2} R(t; \text{no repair}) f^k(\beta, \bar{D}) d\bar{D} d\beta \quad (16)$$

$$\bar{R}_2^k(t) = \int_{\beta_1}^{\beta_2} \int_{\bar{D}_1}^{\bar{D}_2} R(t; \text{repair}) f^k(\beta, \bar{D}) d\bar{D} d\beta \quad (17)$$

3 実際例への適用

本章において、これまでに述べてきた推定手法の実際の検査結果に対する適用を試みる。すなわち、対象船の過去の検査結果報告書を調査し、倉内肋骨下端部の発見き裂損傷部材のうち、疲労が原因と思われる部材の数をデータとして解析に取り入れ、(15)式を用いることにより存在するであろう損傷部材数の推定を行なう。また、推定の可否については、実際に検査の施された時期

における推定値と実際の発見数を比較することにより検討する。

3.1 対象船および検査結果

Fig. 1 Scheme of the Sample Ship

対象船は 1966 年建造の LPG 船であり、その主要目は $L_{pp}=178.25\text{m}$, $B=27.5\text{m}$, $D=18.3\text{m}$, $d=10.52\text{m}$ である。対象船は、北太平洋航路を定期的に運航されていた。対象船の概要を Fig. 1 に示す。

対象船の倉内肋骨下端部に発生したき裂損傷部材の、各検査時における発見数をまとめた結果を Table 1 に示す。ただし、表中の値は通常の肋骨についてのみのものであり、特設肋骨については除外した。表中の値に関し、No. 1 ホールドについては、損傷の発生時期が比較的初期に集中していること、また、損傷の発生部位が船首寄りに集中していたことから、損傷原因は船首部船側に作用する船首衝撃圧の影響によるものと考えられるので、対象外とする。また、No. 2 および No. 3 ホールドが、ほぼ船体平行部に位置していることから、これらホールドにおける倉内肋骨計 100 本を対象として解析することとする。

これら肋骨の構造形式を、典型的なき裂発生状況と共

Table 1 Inspection Results of the Crack Damages at Lower End of Ordinary Hold Frame

time after construction year month	number of detected cracked member									
	No. 1 Hold		No. 2 Hold		No. 3 Hold		No. 4 Hold			
	original member	repaired member	original member	repaired member	original member	repaired member	original member	repaired member	original member	repaired member
1 4	(P) (S)	(P) (S)	(P) (S)	(P) (S)	(P) (S)	(P) (S)	(P) (S)	(P) (S)	(P) (S)	(P) (S)
2 8	8 6	- -	0 0	- -	0 0	- -	0 0	- -	0 0	- -
4 4	0 0	8 5	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0
4 7	13 4	0 0	0 0	0 0	8 7	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0
6 10	0 3	0 0	0 2	0 0	6 5	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0
7 8	1 1	1 0	7 3	0 0	0 0	3 1	1 0	0 0	0 0	0 0
8 3	1 0	0 0	1 4	3 2	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0
10 6	0 1	0 0	3 2	0 3	0 0	0 1	0 0	0 0	0 0	0 0
11 7	2 1	0 1	1 2	5 4	1 0	1 0	0 0	0 0	0 0	0 0
12 8	0 0	0 2	2 0	2 1	2 1	1 0	1 0	0 0	0 0	0 0
13 8	0 0	0 1	2 2	3 1	0 2	2 0	0 0	0 0	0 0	0 0
14 8	2 0	2 0	0 2	3 5	1 3	2 0	0 1	0 0	0 0	0 0
15 9	0 0	0 0	2 0	1 1	1 1	0 0	0 0	0 0	1 0	1 0
	0 0	0 0	1 0	1 0	0 0	2 1	0 1	0 0	0 0	0 0

Fig. 2 Structural Type of the Lower End of Frame and Typical Example of the Initiated Crack

に Fig. 2 に示すが、No. 2 および No. 3 ホールド内の倉内肋骨は、下端においては寸法および形状が同一であり、また、船体横断面における全体的な形状についても、船長方向に対してほとんど変化していない。さらに、対象船のホールドは横肋骨式構造であり、船長方向に強度部材が設置されていないので、各肋骨は、もっぱら船側波浪変動水圧荷重によって繰り返し変形すると考えられる。以上のことから、これら倉内肋骨は、ほぼ統計的に同一と見なし得ると考える。

3.2 数値解析

Table 1 に掲げたデータを 2 章において設定したモデルに基づいて解析するにあたり、既知の値として仮定した、寿命値のばらつきを表わす母数 α の値は、対象船の検査記録から、欠陥を発見したときを寿命として、部材の寿命値をワイブル確率紙にプロットした結果から推定し、 $\alpha=1.0$ とした。

Fig. 3 Probability Distribution of Fatigue Life

まず、 β の値に対する事前の予測に関して検討するために、Table 2 に掲げるとく、母数の値を適当に設定して (15) 式の値を計算した結果を Fig. 4 に示す。

図中の黒丸は、検査時における実際の欠陥部材の発見数を示す。実線は、 β の事前密度の範囲を $\beta_1=9.2$ および $\beta_2=20.9$ と設定した場合の結果であり、破線は、前

Table 2 Values of Parameters for the Analysis

shape parameter for fatigue life; α	1.0	
scale parameter for fatigue life	[case 1]	[case 2]
lower limit; β_1	9.2	11.7
upper limit; β_2	20.8	25.0
average detectability		
lower limit; $\bar{D}_1$	0.7	
upper limit; $\bar{D}_2$	0.9

Fig. 4 The Relationship between the Service Time and the Bayesian Expected Number of Failed Member

者よりも若干危険側の推定として、 $\beta_1=11.7$ および $\beta_2=25.0$ とした場合の結果である。両者共、第 4 回目検査までは推定値と実績値の間に大きな隔りがあるが、これは、初回および第 2 回目検査において、欠陥を発見しなかったことによる影響と考えられる。しかし、第 3 回目および 4 回目検査において多数の欠陥を発見したことにより、以後、比較的良好な推定が行い得たと言えよう。一般に、船舶の寿命が 20 年程度であることを考慮して β に対する予測を行えば、比較的安全側の推定を行い得ると考える。

次に、平均発見率 $\bar{D}$ に対する事前の予測の影響を調べるため、Table 3 に掲げるとく、この値を変えて解析した結果を Fig. 5 に示す。

図中の実線は、存在するであろう欠陥部材数の期待値を示し、一点鎖線は、発見するであろう欠陥部材数の期待値を示す。また、破線は、Fig. 4 における実線に対応するものである。今回想定しているような、検査結果か

Table 3 Values of Parameters Used to See the Effect of the Prior Average Detectability

shape parameter for fatigue life; α	1.0	
scale parameter for fatigue life		
lower limit; β_1	9.2	
upper limit; β_2	20.8	
average detectability	[case 1]	[case 2]
lower limit; $\bar{D}_1$	0.7	0.1
upper limit; $\bar{D}_2$	0.9	0.9

Fig. 5 Effect of the Prior for the Average Detectability

ら欠陥の有無に関する情報のみを得るとするモデルにおいては、検査結果の平均発見率に関する事後密度に与える影響が小さいことが分かっている⁶⁾。本解析例のごとく、 $\bar{D}_1=0.1$ 、 $\bar{D}_2=0.9$ と平均発見率の事前密度を非常に安全側に設定した場合、Fig. 5 に示すように、存在するであろう欠陥部材数は非常に安全側の推定となるのに対し、発見するであろう欠陥部材数の推定値は、極端に小となっている。これは、先にも述べたように、事後密度における $\bar{D}$ の変化が顕著でないため、 $\bar{D}$ の低い値の部分の影響が大きく現れたためであろう。したがって、解析の精度を上げるためには、例えば欠陥寸法のような、他の何らかの情報を要するものとする。しかし、欠陥の発見率に限って考えれば、ある一定の検査手法に関するデータは十分に蓄積されていると予想されるので、発見率に関するデータを調査検討することにより、実績を考慮した近似式を導入することも可能であろう。精度の良い、より簡易な解析のためには、こういったことも重

Table 4 Values of Parameters Used to See the Effect of the Shape Parameter

	[case 1]	[case 2]
shape parameter for fatigue life; α	1.0	3.0
scale parameter for fatigue life		
lower limit; β_1	9.2	
upper limit; β_2	20.8	
average detectability		
lower limit; $\bar{D}_1$	0.7	
upper limit; $\bar{D}_2$	0.9

Fig. 6 Effect of the Shape Parameter for Fatigue Life

要であるとする。

さらに、本解析モデルにおいては、部材の寿命分布の形状母数 α をある確定値として設定しているが、 α の影響を見るために、Table 4 に掲げるとく、この値を変えて解析を行った。結果を Fig. 6 に示す。図中の実線は、 $\alpha=3.0$ とした場合であり、破線は、 $\alpha=1.0$ とした Fig. 4 の実線に対応するものである。

比較的良好な推定を行い得た破線の結果と較べ、実線の場合、推定の程度は良好とはいえない。第9回目検査以降は、実線と破線で差がないように見える。 β および $\bar{D}$ がそれぞれ実際の現象を良く説明し得るようになるためであろう。しかし、初期における差の大なることを考えれば、 α についてもかなり良いデータを得ておかなければならないのは当然である。

実験室などで行われる構造モデルによる疲労試験結果と異なり、実船を対象とした場合、場所の違いによる負荷

のバラツキ、置かれる環境の違いなどの理由から、寿命値のバラツキが大きく予想されること、また、Fig. 3からも分かるように、建造当初からの部材と、途中で修理を施した部材とでは、その寿命分布が異なったものとなることから、初期の解析モデルをその時点での現状に応じて適宜修正していくといった、ベイズ解析の特性を有効に活用するためには、形状母数の値をも不確実要因として捉えるべきであると考ええる。

4 結 言

構造の複雑さ、波浪変動外力の把握の困難さ、標本数の少なさおよび検査の不確実さなどに起因する種々の不確実要因を包含するがゆえに、困難さを有する船体構造の信頼性解析に、特に、繰り返し受ける検査から得られる情報に注目し、ベイズ解析を適用することを試みた。

一般に、船体構造の多くはフェイル・セーフ構造であり、使用中に損傷を生じて、次の検査までの間の使用状況に耐え、検査時に損傷を発見し、修理または交換することを建前として設計されている。したがって、検査は、これら損傷が重大事故へと進展するのを未然に防ぐための、損傷の早期発見が重要となる。このような観点から、船体構造の状態を十分に把握することが望まれるが、このためには、検査結果を活用することが有効な手段と言える。検査結果によるデータは、個々の実際現象を反映する、非常にポテンシャルの高いデータと言えるからである。

ここでは、倉内肋骨の疲労損傷を対象とし、簡易なモデルを設定し、検査結果を有効に活用する手法を提案し、一般的な推定式を導き、実際例への適用を試みた。

検査手法のあいまいさに関する情報を有効に引き出し解析結果に反映させること、また、寿命値のばらつきに対する考慮など、依然として問題は残るが、本報に述べ

た手法を適用することにより、構造の状態に応じた検査時期の設定を考える手掛かりになるものと考ええる。

また、衰耗の影響と関連したき裂の発生およびき裂進展を考慮したモデルの導入などが、今後の課題と言える。

最後に、本研究に際し、終始あたたかく御助力くださった(財)日本海事協会開発部長、新田顕氏に深く感謝する。

参 考 文 献

- 1) A. Mansour: "Probabilistic Design Concept in Ship Structural Safety and Reliability", TRANS SNAME, Vol. 80, (1972), pp. 64~97.
- 2) A. Mansour and D. Faulkner: "On Applying the Statistical Approach to Extreme Sea Loads and Ship Hull Strength", TRANS RINA, Vol. 115, (1973), pp. 277~314.
- 3) S. G. Stiansen, A. Mansour, H. Y. Jan and A. Thayamballi: "Reliability Methods in Ship Structures", TRANS RINA, No. 4, (1980), pp. 381~406.
- 4) 秋田好雄, 山口勇男, 新田 顕, 荒井宏範: "信頼性解析に基づく船体構造設計について" 日本造船学会論文集, 第140号, (1976) pp. 189~198.
- 5) H. Itagaki, Y. Akita and A. Nitta: "Application of Subjective Reliability Analysis to the Evaluation of Inspection Procedure on Ship Structures", Proc. of Design-Inspection-Redundancy Symposium, (1983), pp. 4-1~4-19.
- 6) H. Itagaki and N. Yamamoto: "Bayesian Analysis of Inspection on Ship Structural Members", Proc. of ICOSSAR '85, Vol. 3, (1985), pp. III-533~III-541.