

修士論文

船舶の R B M 導入における

構造機器破損確率の評価

p.1 ~ p.75 完

平成 19 年 2 月 9 日提出

指導教員 酒井 信介 教授

56205 山崎 康平

# 目次

第1章 序論.....	7
1.1 研究の背景.....	8
1.1.1 船舶検査の事情.....	8
1.1.2 RBM (Risk-Based Maintenance).....	8
1.1.3 従来の破損確率評価法の問題点.....	10
1.2 研究の目的.....	12
1.3 本論文の構成.....	12
第2章 理論.....	13
2.1 緒言.....	14
2.2 ベイズの定理.....	14
2.3 ベイズ推定の手順.....	15
2.3.1 事前分布の設定.....	16
2.3.2 ベイズの定理による更新.....	17
2.3.3 事後分布の評価.....	17
第3章 手法.....	18
3.1 緒言.....	19
3.2 評価の対象および破損の定義.....	19
3.3 破損確率分布の決定.....	19
3.4 推定手順.....	21
3.4.1 無情報性事前分布の設定.....	22
3.4.2 更新データの取り入れ方.....	22
3.4.3 部品ごと事後分布の設定.....	23
3.4.4 破損確率評価法の提案.....	25
3.5 結言.....	26
第4章 結果.....	27
4.1 緒言.....	28
4.2 評価した部品.....	28
4.3 全船が同じ破損確率分布に従う場合.....	30
4.4 個船ごとの破損確率分布へ更新する.....	32
4.4.1 一隻の検査結果データによる更新.....	32
4.4.2 母数分布の偏差を広げる.....	34
4.4.3 検査データ数に重み付けをする.....	36

4.5	安全裕度係数の算出.....	38
4.6	結言.....	40
第5章	考察.....	41
5.1	緒言.....	42
5.2	母数分布の偏差拡大値の提案.....	42
5.3	重み付け係数値の提案.....	46
5.4	従来の方法との比較.....	51
5.4.1	検査データ重み付けの有効性.....	51
5.4.2	破損確率評価法の有効性.....	51
5.5	結言.....	53
	結論.....	55
	付録A.....	57
	付録B.....	62
	緒言.....	63
	解析条件.....	64
	解析結果.....	66
	結言.....	71
	あとがき.....	72
	謝辞.....	73
	参考文献.....	74

# 目次

Fig. 1	Risk matrix.....	9
Fig. 2	Usual estimation of failure probability .....	11
Fig. 3	The Bayes' theorem.....	14
Fig. 4	Process of Bayes' .....	15
Fig. 5	100×(1 - k)% credible interval .....	17
Fig. 6	Number of ship (2005).....	20
Fig. 7	Number of cylinder (2005) .....	20
Fig. 8	Flowchart .....	21
Fig. 9	Posterior distribution of Piston.....	24
Fig. 10	Establish of spread value .....	24
Fig. 11	Posterior distribution of Piston(Fig.9×4.5deviation) .....	25
Fig. 12	Posterior distribution of Camshaft Bearing .....	29
Fig. 13	Failure Probability of Piston (A:no renewal,B:+10 ship,C:+20 ship) .....	31
Fig. 14	Failure Probability of Camshaft Bearing (A:no renewal,B:+10 ship,C:+20 ship) .....	31
Fig. 15	Failure Probability of Piston with 5,10,15 year inspection (A:no renewal,D:renewal).....	33
Fig. 16	Failure Probability of Camshaft Bearing with 5,10,15 year inspection (A:no renewal,D:renewal).....	33
Fig. 17	Posterior distribution of Camshaft Bearing (Fig.12×1.25 deviation) .....	35
Fig. 18	Failure Probability of Camshaft Bearing with 5,10,15 year inspection (A:no renewal,E:renewal with Fig.17) .....	35
Fig. 19	Failure Probability of Piston with 5,10,15 year inspection (( ) is number of Weighted factor) .....	37
Fig. 20	Failure Probability of Camshaft Bearing with 5,10,15 year inspection (( ) is number of Weighted factor) .....	37
Fig. 21	Posterior distribution of Piston (Fig.11×1.25 deviation) .....	43
Fig. 22	Posterior distribution of Cylinder Cover valve hole corner and around.....	59
Fig. 23	Posterior distribution of Cylinder Liner bore wall .....	59

Fig. 24	Posterior distribution of Connecting Rod lower end.....	60
Fig. 25	Failure Probability of Cylinder Cover valve hole corner and around .....	61
Fig. 26	Failure Probability of Cylinder Liner bore wall .....	61
Fig. 27	Failure Probability of Connecting Rod lower end.....	61
Fig. 28	Estimation form of WinPraise .....	64
Fig. 29	Median crack depth and Shape factor of Initiated Cracks.....	65
Fig. 30	Failure Probability of Piping (Stress: A ,Material:304,Stress level:Low).....	67
Fig. 31	Failure Probability of Piping (Stress: A ,Material:304,Stress level:Medium) .....	67
Fig. 32	Failure Probability of Piping (Stress: A ,Material:304,Stress level:High).....	67
Fig. 33	Failure Probability of Piping (Stress: A ,Material:Carbon,Stress level:Low).....	68
Fig. 34	Failure Probability of Piping (Stress: A ,Material:Carbon,Stress level:Medium) .....	68
Fig. 35	Failure Probability of Piping (Stress: A ,Material:Carbon,Stress level:High).....	68
Fig. 36	Failure Probability of Piping (Stress: B ,Material:304,Stress level:Low).....	69
Fig. 37	Failure Probability of Piping (Stress: B ,Material:304,Stress level:Medium) .....	69
Fig. 38	Failure Probability of Piping (Stress: B ,Material:304,Stress level:High).....	69
Fig. 39	Failure Probability of Piping (Stress: B ,Material:Carbon,Stress level:Low).....	70
Fig. 40	Failure Probability of Piping (Stress: B ,Material:Carbon,Stress level:Medium) .....	70
Fig. 41	Failure Probability of Piping (Stress: B ,Material:Carbon,Stress level:High).....	70

# 表目次

Table. 1	Damage of Piston.....	23
Table. 2	Damage of Camshaft Bearing .....	29
Table. 3	Weighted factor for Piston.....	36
Table. 4	Weighted factor for Camshaft Bearing .....	36
Table. 5	Safety margin A for Piston with 5,10,15 year inspection.....	38
Table. 6	Safety margin A of Camshaft Bearing with 5,10,15 year inspection .....	39
Table. 7	Safety margin A of Piston (with Fig.19) .....	44
Table. 8	Table.7 / Table.5 .....	44
Table. 9	Safety margin A of Camshaft Bearing (with Fig.15).....	45
Table. 10	Table.9 / Table.6 .....	45
Table. 11	Safety margin A of Piston (Weighted factor 1 ~ 10).....	47
Table. 12	Safety margin A of Camshaft Bearing (Weighted factor 10 ~ 100) .....	48
Table. 13	Necessary Weighted factor .....	50
Table. 14	Safety margin A of usual estimation .....	51
Table. 15	Safety margin A of no Bayes.....	52
Table. 16	Safety margin A of Piston with 3,8,13,18 year inspection .....	52
Table. 17	Damage of Cylinder Cover valve hole corner and around .....	58
Table. 18	Damage of Cylinder Liner bore wall .....	58
Table. 19	Damage of Connecting Rod lower end.....	58
Table. 20	GFF .....	63
Table. 21	Diameter and Thickness of Piping .....	64
Table. 22	Stress .....	66
Table. 23	Factor of Flow stress .....	66

# 第1章 序論

## 1.1 研究の背景

### 1.1.1 船舶検査の事情

船舶は、各国の国内法、条約、船級規則等に従い、定期的な検査を受けることで、その健全性が評価され、運行に供せられると共に、保険契約を結ぶことができる一般的な考えられる[1]。その為に、定期検査、中間検査、年次検査等一定期間毎に受検するのが通常である。この定期的な検査は、定期検査が5年、中間検査が2～3年、年次検査が1年と、船舶が完工した日から一定期間経過後を基準とした時間基準型検査であり、その他に、それぞれ5年間隔で計画的に船舶内の機関部品及び補機器の検査を行なう機関継続検査（Continuous Machinery Survey、通称 CMS）や、状態監視と併用した機関予防保全検査（Preventative Machinery Maintenance Survey）もあるが、5年間隔の開放検査が基本となっている。然るに、船舶管理の多様化及びLNG船等高付加価値船等で20年を超え、30～40年に亘って使用するために実施される延命評価等により、画一的に5年間隔での開放検査の有効性及び必然性に対する問題提起が出されるようになってきている。そこで、船舶管理法の善し悪し等により、検査間隔に差異を与える指針が必要とされている。

一方、陸上の発電所設備や化学プラント設備、オフショア設備等において、近年、急速にRBM（Risk-Based Maintenance）が普及してきており、プラント設備の個々の装置の検査を実施するに際して、過去の日常保守の内容、損傷事例、状態監視状況、装置からの内容物が漏洩した場合の被害の影響等を多岐にわたり解析し、その結果得られるリスク評価結果に従って、リスクの高い装置、部品の検査を優先的に実施することで、合理的、且つ経済的に資本投入する検査方式が普及しつつある。

### 1.1.2 RBM（Risk-Based Maintenance）

RBMとは、メンテナンスの対象となる機器ごとに、『リスク』を算出し、『リスク』を基準としてメンテナンス計画をたてる手法である[2]。ここで言う『リスク』とは、ある時限の間に、ある事象が発生する確率と、その事象による被害の大きさとの組み合わせであり、次式で計算される。

リスク = 「故障，破損の起こりやすさ」 × 「起きた場合の被害の大きさ」

リスクの高い機器に対し検査を集中し，リスクを軽減する行為を行うことで，優先順位が容易に得られ，検査が効率的に行える．また，許容できる範囲よりもリスクが低い部位には，検査を簡略化することで，コストダウンが見込め，経済的でもある．

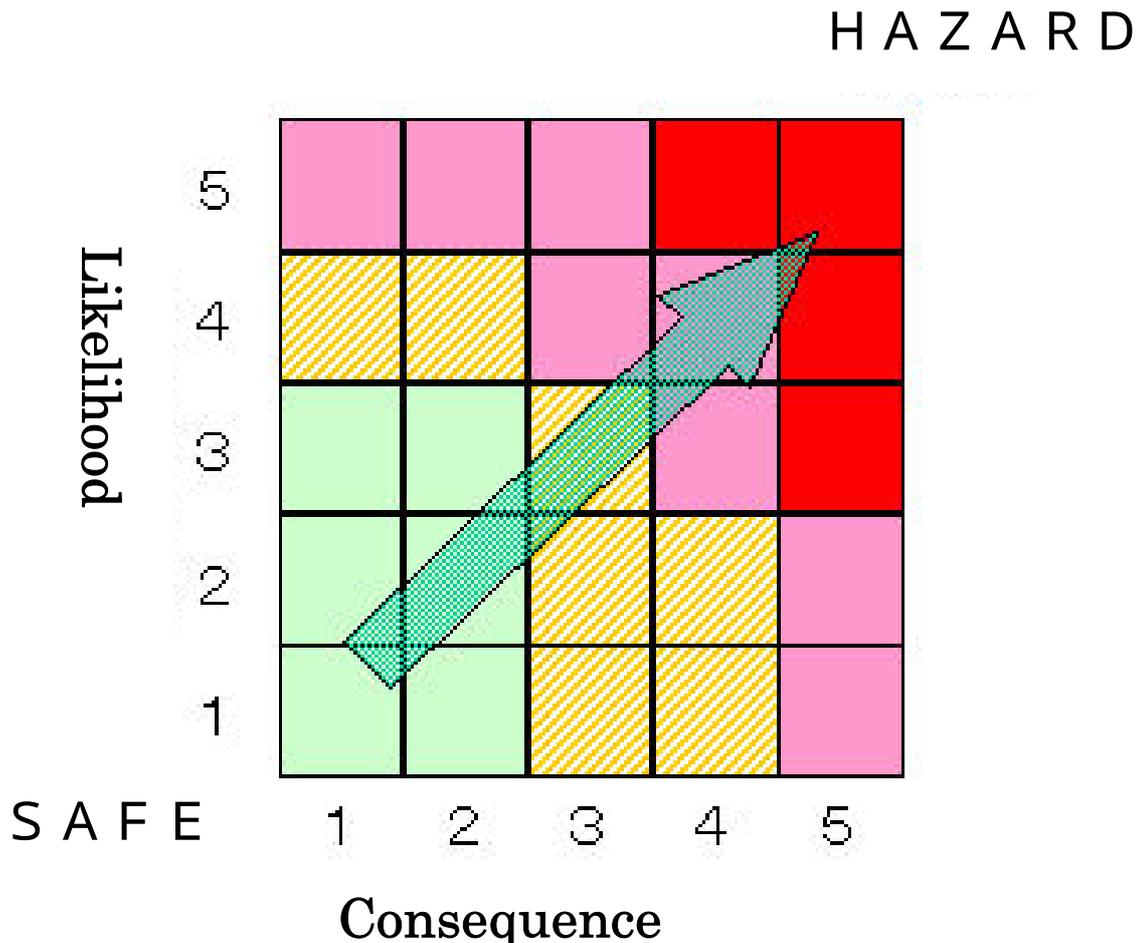


Fig. 1 Risk matrix

RBM は米国などでは既に活用され，安全性を高めながら検査を合理化することが実際に行われている．米国機械学会（ASME）及び米国石油学会（API）はガイドラインを発行しており，日本では近年になり合理的な検査の必要性から上記ガイドラインを基に RBM の規格・基準の整備が行われている状況である．

### 1.1.3 従来の破損確率評価法の問題点

船舶に対して RBM を行なう際には、機器ごとに破損確率を算出する必要がある。RBM に利用可能である破損確率データとしては、米国石油学会の API581[3] に記載されたものが広く認知されている。API581 では、機器の破損確率は、式 1.1 より算出する。

$$\text{破損確率} = \text{一般破損確率(G F F)} \times \text{機器因子修正係数} \times \text{管理因子修正係数} \quad (1.1)$$

各々の修正係数は、一般的な損傷確率に対して、リスクを増減させる設備環境や運転状況に関する要因を評価したものである。

しかし、API581 の破損確率データは、米国の石油化学プラントを対象として求められたものであり、船舶の機器に適用することには疑問がある。

船舶の機器に対しては、(財)日本海事協会の損傷データベースが存在する。そこで、その中から、1996 年から 2005 年の 10 年間に発生し、報告された損傷データを用いて式 1.2 より損傷率/寿命カーブを求めることができる。

$$\text{損傷率} = \frac{\text{「各船齡の単位年度当たりの損傷」}}{\text{「各船齡の全船舶に搭載される部品数」}} \quad (1.2)$$

従来の破損確率評価法では、Fig.2 に示すように、上記損傷率/寿命カーブを、仮定した確率分布母数の点推定によって表し、経験による一定値を掛けることでバラツキを考慮した評価を行なう。

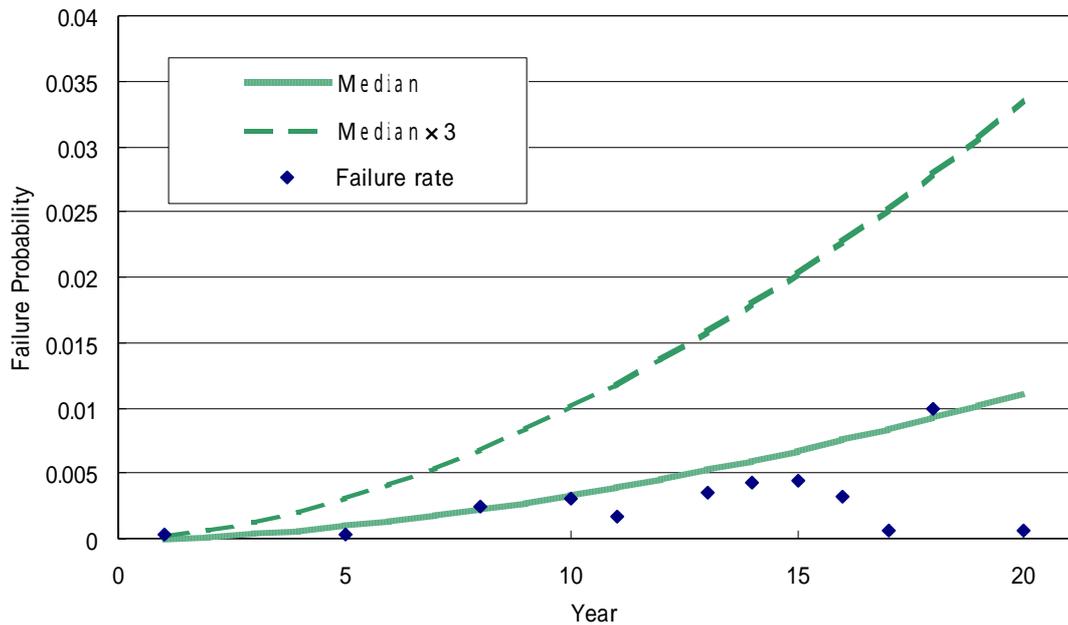


Fig. 2 Usual estimation of failure probability

損傷データベースによる損傷率は、船全隻に対する平均的な損傷率を表しているものである。また、船全隻の破損確率中央値を示す点推定値に対し、画一的に定められた安全裕度値を掛けて評価された破損確率では、個船ごとの管理方法の善し悪しによる破損確率の格差は反映されることがない。本来は、管理方法の異なる個船ごとに破損確率は評価されるべきである。

一方、式 1.1 の API581 における破損確率評価法のように、管理方法により異なる係数を掛けて、破損確率を算出する場合、どの程度の係数を掛ければよいか不明である。API581 では、米国の石油化学プラントの機器を対象にしているためである。

## 1.2 研究の目的

本研究では、(財)日本海事協会に集積された船舶主機関の部品ごと損傷報告データを基にして、以下の特徴を持つ破損確率評価を行なう手法を開発し、その有効性を示すことを目的とする。

- ・従来の破損確率評価法では、船全隻の破損確率中央値に対して、経験による係数を掛けることで安全裕度を設定している。そのため、部品の破損確率は船舶ごとによらず、どの船舶も等しいと評価されてしまう。本来は、検査時期や、検査や管理の方法により、破損確率が異なると評価されるべきである。よって、破損確率評価は、検査時期や管理方法などにより、個船ごとに異なる安全裕度係数を全隻の平均的な破損確率に掛けることで、個船ごとに異なるよう評価を行なうこととする。

- ・平均的な破損確率に掛ける安全裕度係数の値を客観的に評価できるよう、少標本のサンプルデータから効率よく母集団を推定することに応用されているベイズ推定を用いて、損傷報告データに、新たな少数回の検査結果を組み合わせることで、個船ごとの機器の破損確率を評価する方法を提案し、その有効性を示す。

## 1.3 本論文の構成

**第1章 序論** では、本研究の背景について概説し、本研究の目的を示した。

**第2章 理論** では、本研究で破損確率母数推定手法として用いた、ベイズ推定について、理論と特徴を解説する。

**第3章 手法** では、ベイズ推定を用いて、損傷報告データや、検査結果データから破損確率を評価するための手法について提案し、解説する。また、破損確率の定義を与える。

**第4章 結果** では、第3章で示した手法を用いて、船舶主機関部品の破損確率評価を行ない、その結果を示す。

**第5章 考察** では、本研究における破損確率評価手法を用いる際の、パラメータによる影響について検討し、その値の提案を行なう。また、従来の破損確率評価手法との比較を行ない、本手法の有効性を示す。

**第6章 結論** では、本研究を通して得られた結論を総括する。

## 第2章 理論

## 2.1 緒言

この章では、本研究において、損傷評価データや、検査結果データから、破損確率評価母数の推定を行なうために用いた、ベイズ推定の理論及び実行手順を解説する。

ベイズ推定は、ベイズの定理を用いることで確率分布を推定する手法である [4][5][6][7]。通常の統計学では、推定される母数が一つの真値を持つとして推定を行ない、推定誤差を信頼区間で表す。一方でベイズ推定では、母数がある確率分布に従い、ばらつくものとして扱い、この確率分布をベイズの定理を用いて絞っていくことで推定を行なう。

## 2.2 ベイズの定理

ベイズ推定の核をなすベイズの定理について解説する。あるデータ  $D$  を説明するための仮説  $H_i$  が  $n$  種類存在し、それ以外に仮説はありえず、複数の仮説が正しいことはないとする。

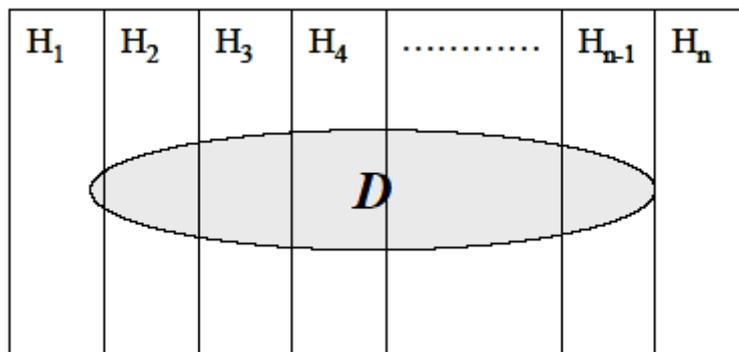


Fig. 3 The Bayes' theorem

このとき、データ  $D$  が得られて、且つその原因が仮説  $H_i$  である確率  $P(D \cap H_i)$  は式2.1で求められる。

$$P(D \wedge Hi) = P(Hi | D)P(D) = P(D | Hi)P(Hi) \quad (2.1)$$

これを变形することで，式2.2のベイズの定理が得られる．

$$P(Hi | D) = \frac{P(D | Hi)P(Hi)}{\sum_{i=1}^n P(D | Hi)P(Hi)} \quad (2.2)$$

仮説が連続的である場合には，ベイズの定理は式2.3となる．

$$f(\theta | D) = \frac{P(D | \theta)f(\theta)}{\int P(D | \theta)f(\theta)d\theta} \quad (2.3)$$

は連続的な仮説であり，ベイズ推定では推定対象母数のベクトルである．

## 2.3 ベイズ推定の手順

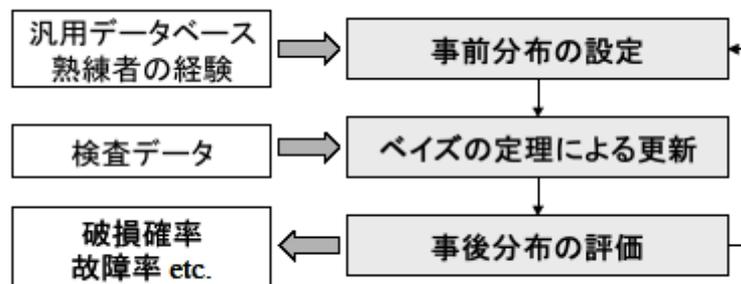


Fig. 4 Process of Bayes'

Fig.4 はベイズ推定の手順を示したものである．本手法においては，汎用データベースとして，損傷報告データを用いた．以下，各手順について順に解説する．

### 2.3.1 事前分布の設定

ベイズ推定では，初回の推定前に母数に対する予測を立て，この予測をもとに母数の確率分布である事前分布を与える．以後，新たな情報を得るたびに，前回の事後分布を事前分布として更新していくことにより，母数の推定精度を高めていくことが出来る．この場合，初期の事前分布が適切であれば，少ないデータから母数推定を比較的精度良く行うことが出来る．

対象機器から得られた検査データ以外の事前情報が存在する場合，この情報をもとに初期の事前分布を与えることが考えられる．事前情報としては，類似の機器に共通して使えるデータベース，あるいは熟練者の経験に基づく情報などが考えられる．ベイズ推定では，通常の統計学的手法では利用できないこれらの事前情報を，事前分布として自然に推定に利用することができる．

一方で，事前に利用できる情報が存在しない場合，母数に関する情報を一切持たない分布を事前分布として与えることでベイズ推定が行える．このような考え方のもとで与えられる事前分布を無情報性事前分布（Noninformative prior）という．最も単純な無情報性事前分布として，一様分布が用いられることが多い．しかし，同一の分布形であっても，異なる形式の式で定義されることがある．例として，ワイブル分布の分布関数として以下の二種類が考えられる．

$$F(t | \alpha, \beta) = 1 - \exp\left\{-\left(\frac{t}{\beta}\right)^\alpha\right\} \quad (2.4)$$

$$F(t | \alpha, \lambda) = 1 - \exp(-\lambda t^\alpha) \quad (2.5)$$

この場合，式2.5の二母数に対して一様分布を与えると，式2.4の母数  $\beta$  に対して0付近に高い確率密度の事前分布を与えることに等しくなる．このように，ある定義で母数が一様分布していても，異なる定義では一様分布になるとは限らず，ある特定の値に高い確信の度合いを与えている可能性がある．このため，一様分布は無情報性事前分布としては不適切である．

母数の定義方法に対して不変な無情報性事前分布の与え方として，Jeffrey's Prior, Reference Prior等がある．

### 2.3.2 ベイズの定理による更新

式2.3に示したベイズの定理を用いて、事前分布  $f(\theta)$  と尤度  $P(D|\theta)$  から事後分布を求める。尤度  $P(D|\theta)$  は、母数がある値  $\theta$  をとるという条件のもとで、 $D$  という事象が得られる条件付確率として計算できる。

### 2.3.3 事後分布の評価

事後分布をもとに、母数の推定結果を求める。母数の点推定を行ないたい場合には、事後分布の確率密度が最も大きい点を採用することが考えられる。母数の区間推定を行ないたい場合には、事後分布から確信区間を求める。

$100 \times (1 - k) \%$  確信区間は、Fig.5に示すように、母数の事後分布の両端から  $100 \times k / 2 \%$  の区間を除いた、中央部の区間である。

また、母数が定まれば算出可能となるパラメータについても、事後分布に従う乱数を用いてモンテカルロシミュレーションを行なうことで、母数と同様に区間推定を行なうことが出来る。

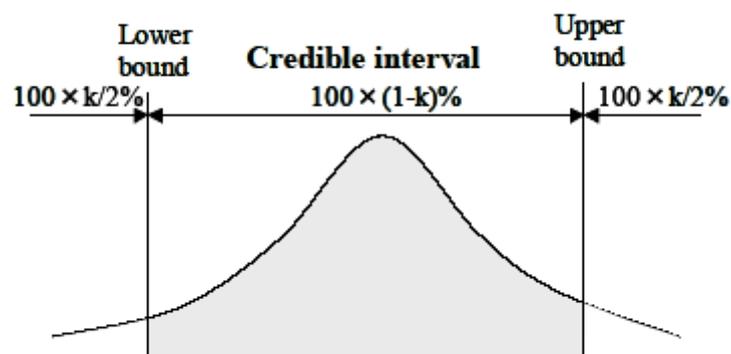


Fig. 5  $100 \times (1 - k) \%$  credible interval

## 第3章 手法

## 3.1 緒言

この章では、船舶の破損確率の評価を行なう手法の提案を行なう。まず始めに、本手法の評価の対象および破損の定義について解説する。次に、破損確率を評価するのに用いた確率分布を示す。そして、確率分布の母数を、損傷報告データや検査結果データより推定する手順を示す。最後に、推定された母数分布より、破損確率の評価を行なう。

## 3.2 評価の対象および破損の定義

破損確率の評価は、5年間隔の開放検査において、損傷が発見された場合に、交換を行なう船舶主機関の部品を対象にする。運行船舶のメンテナンスの大きなウエイトを主機関が占めるためである。メンテナンス計画に破損確率評価を使用するためにも、主機関の各部品ごとに破損確率を算出することとした。更に、各部品の中には、その部分に損傷が発生したら、他の部分の損傷如何に関わらず、解放、点検が実施される部分があり、それらをキー部分として、当該部分の損傷率を算出することにした。

部品ごとの破損確率の評価を行なうため、損傷モードごとの区分けはしていない。メンテナンスにおいて欲しい情報は、損傷の有無であること、加えて損傷モードごとの損傷報告データは、極端に少なくなるためである。

そのため、現在の規則による報告されるべき損傷が、検査により発見されることを破損と定義する。これは、部品の機能が失われた状態を意味する。

また、船齢20までの船を評価の対象とする。20年以上運行する船は少なく、損傷報告数も少なくなるためである。

## 3.3 破損確率分布の決定

(財)日本海事協会に集積された1996年～2005年までの損傷報告データには、損傷が発生した、又は検査において発見された報告数と、その船齢が記されている。加えて(財)日本海事協会に登録されている2005年度の船齢ごとの隻数、シリンダー数が記されている。10年間の隻数・シリンダー数を2005年度の二次

近似曲線による隻数，シリンダー数の10倍と仮定した．この値を，式1.2における分母の値とすることにより部品の損傷率が求まる．2005年度の隻数，シリンダー数の二次近似曲線をFig.6,7に示す．

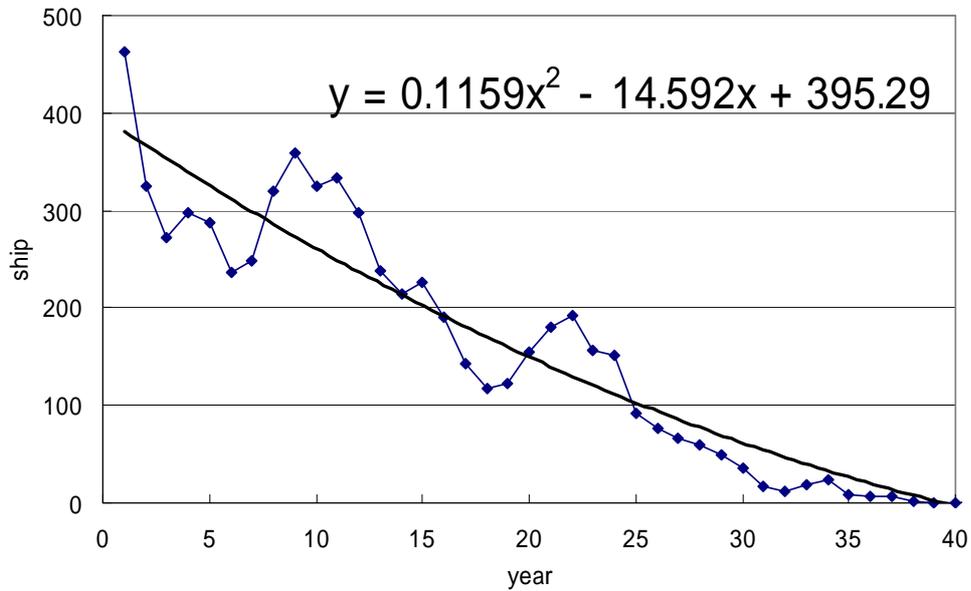


Fig. 6 Number of ship (2005)

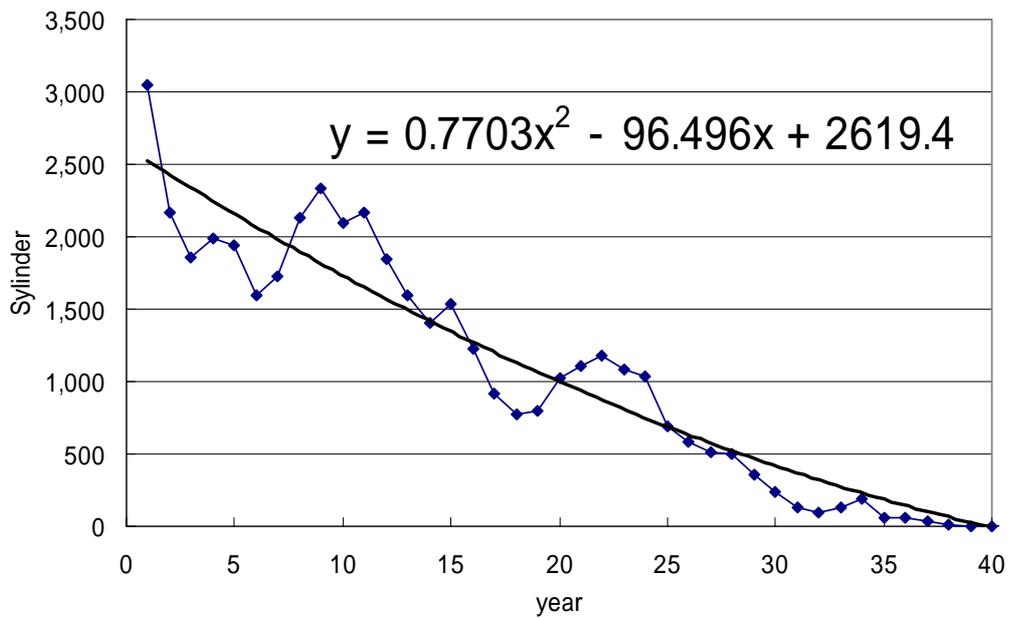


Fig. 7 Number of cylinder (2005)

船齢が増すと、船舶の解撤や転売などにより脱級し、隻数が減少していく傾向がある。式1.1により、損傷率を定めると、船齢の増加にしたがい、母数が減少し、損傷率が上昇する。部品の寿命分布を推定し、破損確率評価に結びつけることを考える。破損寿命の分布として、時刻と共に故障率が上昇するという特徴をもつ[7][8]、式3.1の二母数ワイブル分布を仮定する。

$$F(t) = 1 - \exp\left\{-\left(\frac{t}{\beta}\right)^\alpha\right\} \quad (3.1)$$

$t$ は船齢とした。 $\alpha$ は形状母数、 $\beta$ は尺度母数であり、この二つの母数を損傷報告データ、ならびに個船ごとの検査結果から推定することにより破損確率の評価を行なう。以後、形状母数を $\alpha$ 、尺度母数を $\beta$ と記述する。式3.1は時刻 $t$ までの間に破損が発生する確率を表すため、二つの母数が求めれば、 $F(t)$ によって破損確率を評価することが可能である。

### 3.4 推定手順

Fig.8 に、本手法の流れ図を示す。以下流れに沿って解説を行なう。

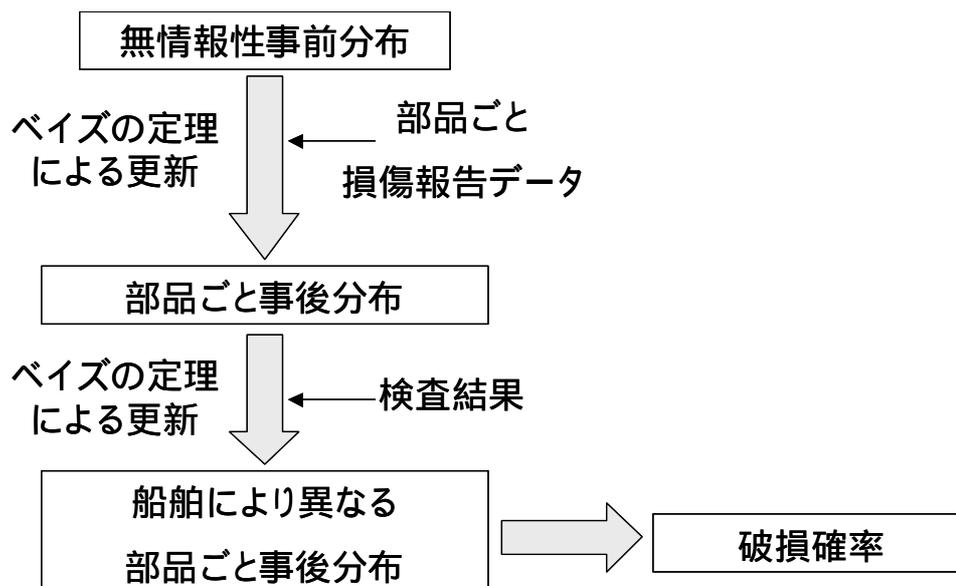


Fig. 8 Flowchart

### 3.4.1 無情報性事前分布の設定

損傷報告データを用いて母数分布を得るための、事前分布としては、母数の分布について何の情報も存在しない場合に用いる、無情報性事前分布を使用した。推定する分布が二母数ワイブル分布である場合の無情報性分布  $f(\alpha, \beta)$  として、Sunが式3.4を誘導している[7][9]。

$$f(\alpha, \beta) \propto \frac{1}{\alpha\beta} \quad (3.2)$$

### 3.4.2 更新データの取り入れ方

式 3.4 に対し、部品ごとの損傷報告データを用いて、ベイズの定理より、 $f(\alpha, \beta)$  の同時確率密度分布を更新し、部品ごとの事後分布を得る。母数推定は、船齢ごとの部品数全てに対して検査を行ない、損傷数の回数損傷が発見されたとして、推定を行なう。Table.1 にピストンの損傷報告データを示す。損傷報告データを用いた更新も、検査結果を用いた更新も、損傷は、5 年間隔の検査時に発見するものと仮定する。検査により得られるデータ  $D$  は、前回の検査から今回の検査までの期間内に、損傷が発生しなかった事象 (safe) と損傷が発生した事象 (failure) の二通りが考えられる。尤度  $P(D | \alpha, \beta)$  は、今回の検査で新たに得られた事実を反映したものであるため、船齢が 5 年以上の船舶に対しては、前回、5 年前の検査時点で、損傷が発生していないという条件付の確率を与えることが妥当である。具体的な尤度  $P(D | \alpha, \beta)$  の式として、損傷が発見されなかった場合は式 3.3、損傷が発見された場合は式 3.4 を用いる。複数の機器に対する検査結果を得た場合には、各機器  $i$  の尤度  $P_i(D | \alpha, \beta)$  の積をもって  $P(D | \alpha, \beta)$  とする。

$$P(\text{safe} | \alpha, \beta) = \exp \left\{ - \left( \frac{t}{\beta} \right)^\alpha + \left( \frac{t-5}{\beta} \right)^\alpha \right\} \quad (3.3)$$

$$P(\text{failure} | \alpha, \beta) = 1 - \exp \left\{ - \left( \frac{t}{\beta} \right)^\alpha + \left( \frac{t-5}{\beta} \right)^\alpha \right\} \quad (3.4)$$

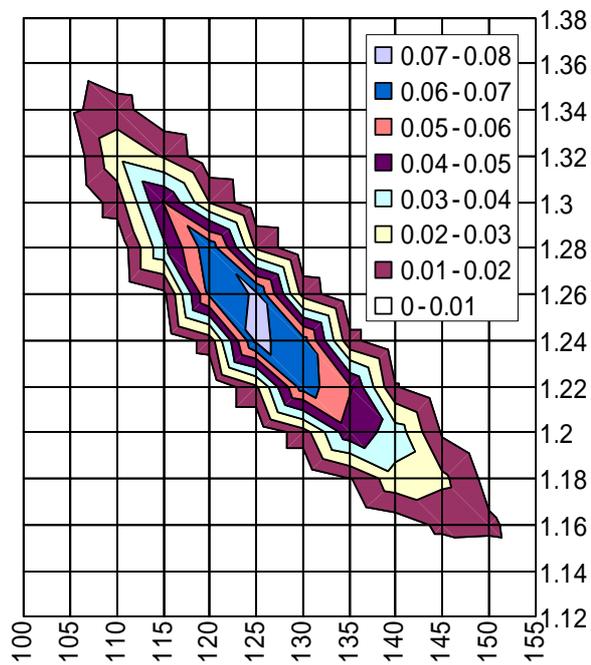
Table. 1 Damage of Piston

船齡	1	2	3	4	5	6	7
損傷数	18	200	211	247	604	402	273
シリンダー数	25236	24294	23368	22457	21561	20681	19816
船齡	8	9	10	11	12	13	14
損傷数	408	334	547	303	449	352	328
シリンダー数	18967	18133	17314	16511	15723	14951	14194
船齡	15	16	17	18	19	20	
損傷数	338	324	420	377	348	354	
シリンダー数	13452	12726	12015	11320	10640	9976	

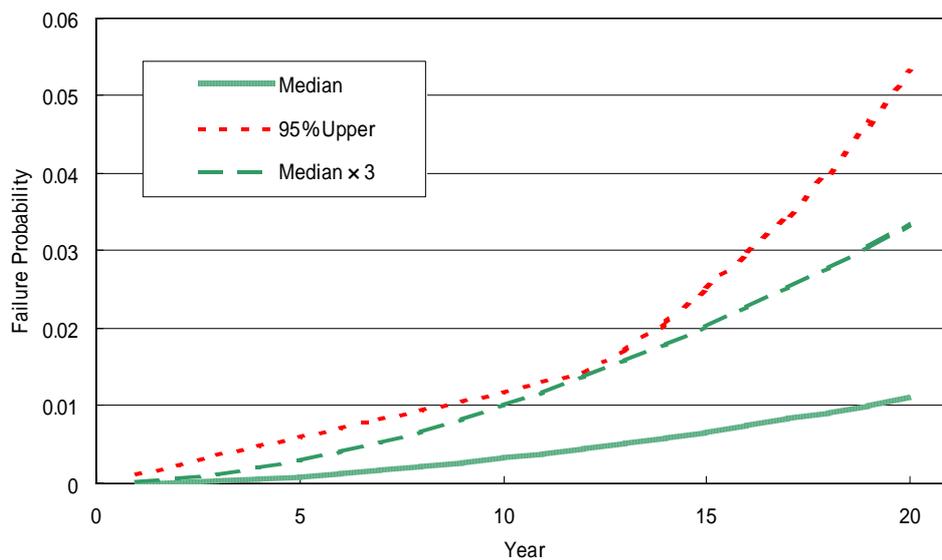
### 3.4.3 部品ごと事後分布の設定

Fig.9にTable.1の損傷報告データを用いて、式3.2の無情報性事前分布より更新された、の事後分布を示す。

損傷報告データより得られた事後分布(Fig.9)は、船全隻の平均破損確率の母数分布を表している。そのため、バラツキが小さい。よって、本手法では、個船ごとの部品破損確率を算出するための事前分布として、損傷報告データより得られた母数分布の偏差を拡大した分布とした。これにより、船全隻の平均がもつ部品ごとの母数分布形状の特徴を利用することができる。また、新たなデータの蓄積により母数分布形状は、真の分布形状に近づいていく。この分布を、個船ごとの検査結果により、個船ごとの破損確率分布に更新していく。Fig.10に示すように、偏差の拡大値は、の分布 95%確信区間による式 3.1 で求めた破損確率最大値が、中央値による破損確率の3倍以上となるように与えた。ピストンの場合、偏差拡大値は4.5であった。偏差を広げた母数分布を Fig.11 に示す。確信区間については、2.3.3 項を参照。



**Fig. 9** Posterior distribution of Piston



**Fig. 10** Establish of spread value

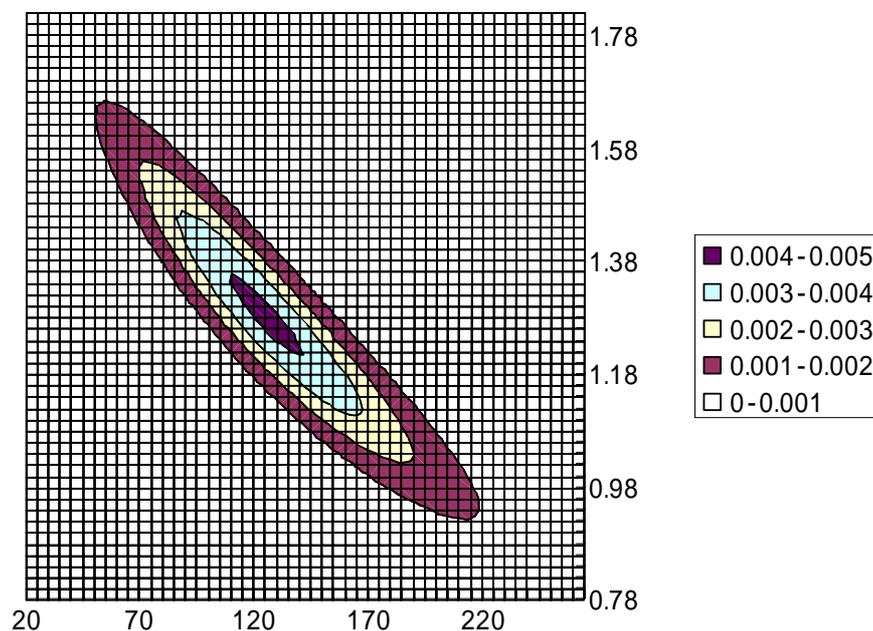


Fig. 11 Posterior distribution of Piston(Fig.9 × 4.5deviation)

### 3.4.4 破損確率評価法の提案

従来法においては，確率分布母数の点推定による破損確率値に，安全裕度となる定数を掛けることで破損確率を表す．本手法においては，式 3.5 により破損確率を求めるとした．

$$\text{破損確率} = \text{一般破損確率} \times \text{係数 A} \quad (3.5)$$

一般破損確率は，部品ごとの事後分布における母数の中央値による破損確率を表す．従来法における点推定による破損確率である．また，破損確率は，検査結果による更新後の事後分布 95%確信区間内での最大破損確率であるとした．これにより，保守的な評価を行なう．個船ごとの検査結果による係数 A は，両者の比として，算出することとした．この係数 A が機器の安全裕度を表す．これにより，安全裕度を従来よりも客観的に設定する．一般破損確率と，検査の結果により変化する係数 A を与えることで，簡便に機器の破損確率評価が行なえる仕組みとする．簡便にするため係数 A は小数点第一位までとした．

## 3.5 結言

本章では，以下の破損確率評価手法を提案した．

破損確率は，式 3.1 で与えられるワイブル分布に従うとし，その母数  $\lambda$ ， $k$  をベイズの定理により推定する．始めに Table.1 で与えられるような部品ごとの損傷報告データより，船全隻の平均の母数分布を推定する．次に，この母数分布の偏差を広げることで，個船ごとの部品の母数分布とした(3.4.3 項参照)．これにより，平均の母数分布の中央値や，分布形状を引き継ぐことができる．新たな検査結果を尤度とする(3.4.2 項参照)ことで，母数分布を更新する．Fig.5 に示すような母数分布の 95%確信区間を定め，確信区間内の最大破損確率と，母数中央値の破損確率を式 3.1 より算出する．式 3.5 より係数 A を求める．部品ごとに母数中央値の  $\lambda_c$  と，安全裕度である係数 A を示すことで，破損確率が求まる．次章では，2 つの部品の損傷報告データを用いて，両部品の母数中央値の  $\lambda_c$  と係数 A を算出する．

## 第4章 結果

## 4.1 緒言

この章では，3章に示した手法を用いて，船舶主機関の部品の破損確率評価を行なう．

まず初めに，全船の部品が同じ破損確率分布に従うと仮定した場合に，5年間隔の検査結果データが集積されることによる破損確率の変化の検討を行なう．これにより，ベイズ推定を用いることで，船全隻の平均を示す母数分布が，真の母数分布に近づくことを示す．

次に，個船の5年間隔の検査結果データによる破損確率の変化の検討を行なう．これにより，個船ごとの破損確率の評価を行なう．

## 4.2 評価した部品

船舶主機関の部品の内，「ピストン」と「カム軸軸受け」の破損確率評価を行なった．どちらの部品も，損傷報告データがある部品の中で，損傷が発生した場合に運行に対する影響が大きい．ピストンは，損傷報告数が多く，損傷率が高い部品である．式 1.2 における，船に搭載される部品数としては，Fig.7 に示したシリンダー数の 10 倍の値を用いた．カム軸軸受けは，部品「カム軸及び駆動装置」のキー部分である．部分であるため，損傷報告数が少ないという特徴がある．式 1.2 における，船に搭載される部品数としては，Fig.6 に示した隻数の 10 倍の値を用いた．

Table.1, 2 にピストン，カム軸軸受けの 10 年間の損傷報告データを示す (Table.1 は，3.4.2 項参照)．

Table.1, 2 のデータを基に，式 3.1 における破損確率分布の母数  $\lambda$ ， $\mu$  に対してベイズ推定を行ない，更新された事後分布を，3.4.3 項における基準で偏差を広げ，作成した  $\lambda$ ， $\mu$  の同時確率分布を Fig.11, 12 に示す (Fig.11 は 3.4.2 項参照)．偏差の拡大値は，それぞれ 4.5, 1.5 であった．以降，この分布に対して検査結果を取り入れ，個船ごとの母数分布を算出する．

Table. 2 Damage of Camshaft Bearing

船齡	1	5	8	10	11	13
損傷数	1	1	7	8	4	8
隻数	3808	3252	2859	2609	2488	2251
船齡	14	15	1	17	18	20
損傷数	9	9	6	1	17	1
隻数	2137	2024	3808	1807	1701	1498

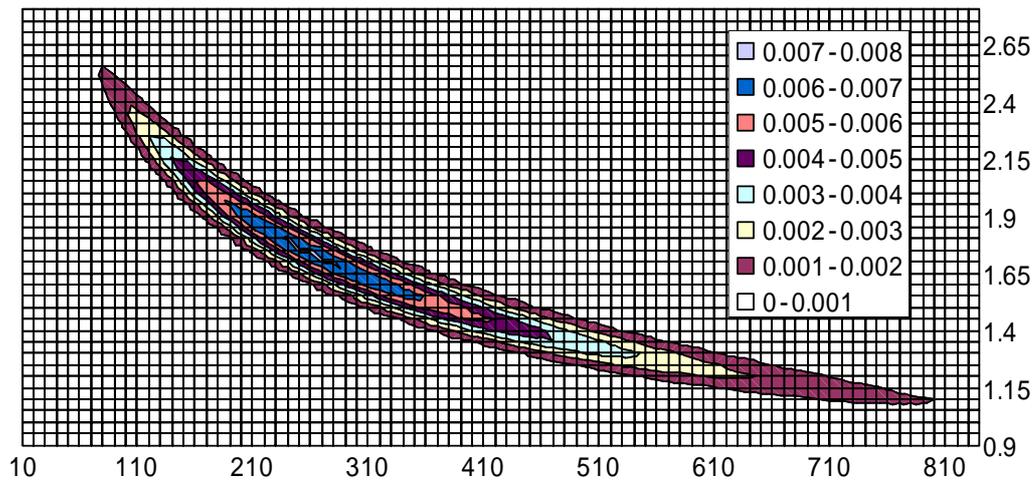


Fig. 12 Posterior distribution of Camshaft Bearing

## 4.3 全船が同じ破損確率分布に従う場合

全船が、Fig.11, 12 における  $\mu$  の中央値を用いて、式 3.1 により算出した破損確率分布に従うと仮定した。新たな検査結果データとして、5 年間隔の定期検査を行ない、損傷が発生していたか、していなかったかというデータを用いて  $\mu$  の母数分布を更新させた。母数分布 95% 確信区間内の最大最少破損確率の推移を Fig.13, 14 に示す。A は Fig.11,12 による更新前の分布、B は 10 隻、C は 20 隻の検査結果により更新された事後分布による破損確率である。

Fig.13, 14 より、両部品とも、新たな検査結果を母数分布の更新に用いることで、破損確率の 95% 確信区間が、仮定した真値に近づき狭まっている。データ数が増えるほど、母数分布は真値に近づき狭まっていく。そして、確信区間が狭まるため、最大破損確率が減少される。破損確率が大きい部品の方が、減少の割合が大きい。

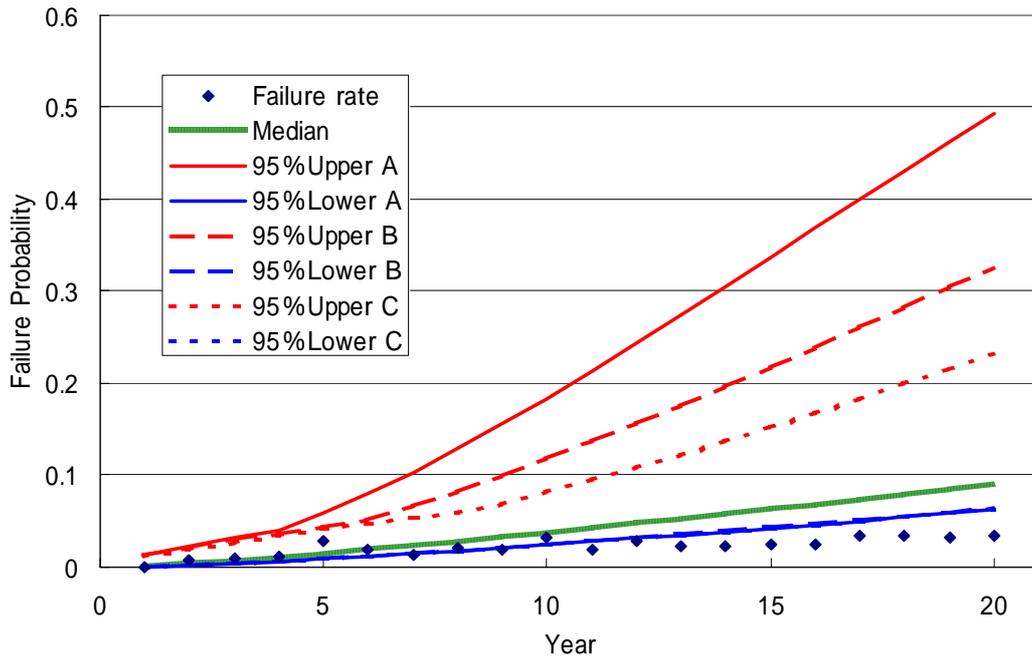


Fig. 13 Failure Probability of Piston (A:no renewal,B:+10 ship,C:+20 ship)

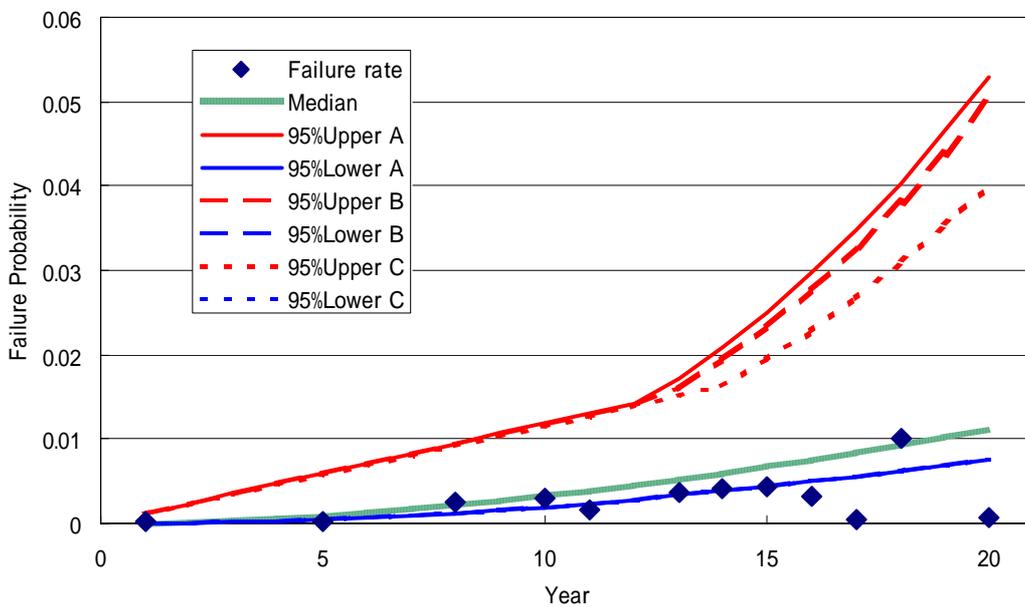


Fig. 14 Failure Probability of Camshaft Bearing (A:no renewal,B:+10 ship,C:+20 ship)

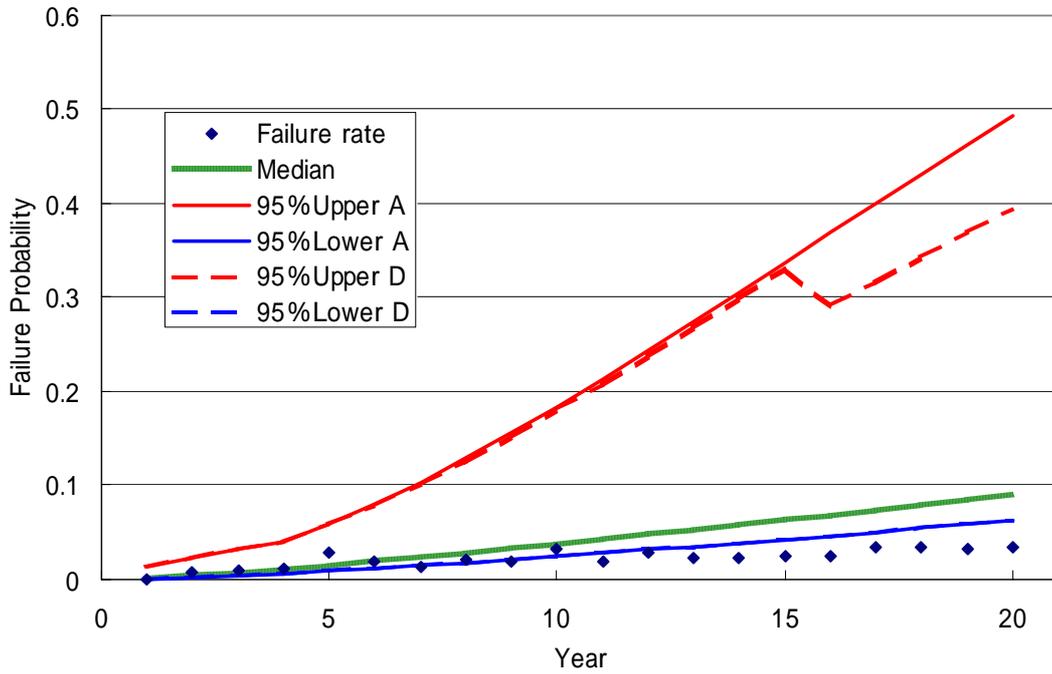
## 4.4 個船ごとの破損確率分布へ更新する

### 4.4.1 一隻の検査結果データによる更新

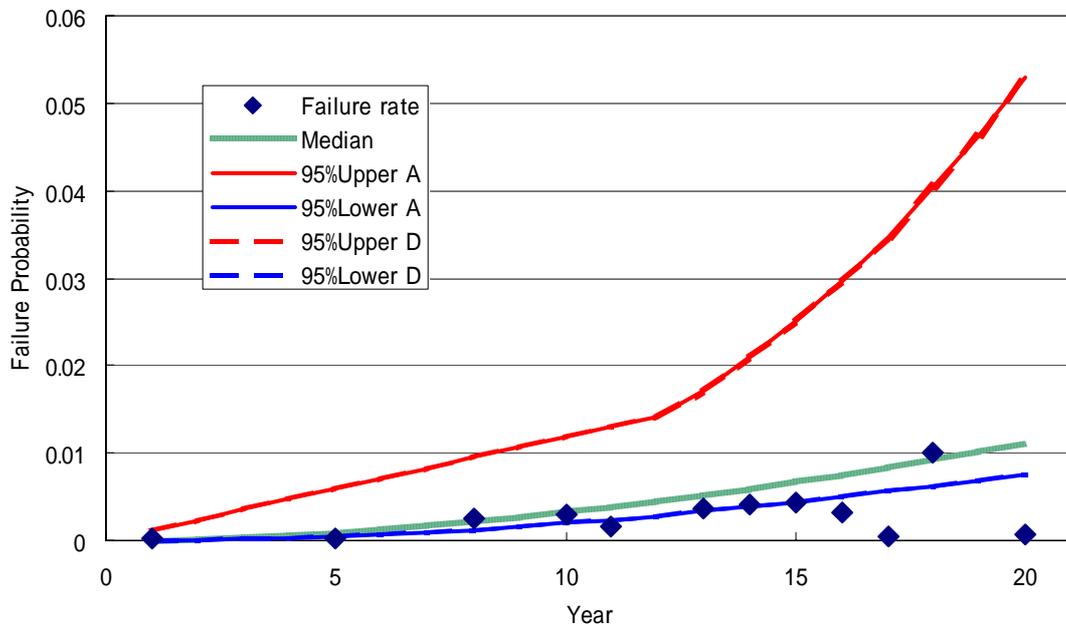
一隻の船が 5 年間隔の検査(5,10,15 年目)に検査を行ない、損傷なしであったという情報により、母数の更新を行なった後の、母数分布 95%確信区間内の最大最少破損確率の推移を Fig.15, 16 に D として示す。A は更新を行なわない事前分布 95%確信区間内の最大最少破損確率である。

Fig.15, 16 より、一隻の検査結果データによる更新された破損確率分布 D は、ピストンにおいて、15 年目の検査結果によって、更新を行なわない破損確率分布 A の最大破損確率と比較して、最大破損確率が減少した。一方、カム軸軸受けでは、更新前 A と比較して、更新した D の破損確率分布に変化がみられなかった。破損確率が小さな部品においては、損傷がないという一度の検査結果だけでは、破損確率分布に影響を与えることはできないと考えられる。

一隻の検査結果による母数分布の更新により、破損確率分布に影響が与えられるよう、検査結果による更新前の母数分布の偏差を広げ破損確率を上げる手法と、検査データ数に重み付けを行う手法、2 つの手法について検討を行なった。



**Fig. 15** Failure Probability of Piston with 5,10,15 year inspection (A:no renewal,D:renewal)



**Fig. 16** Failure Probability of Camshaft Bearing with 5,10,15 year inspection (A:no renewal,D:renewal)

#### 4.4.2 母数分布の偏差を広げる

破損確率が大きいと、一隻の検査データで破損確率分布に変化を与えることができることを検討する。カム軸軸受けについて、母数分布の偏差を Fig.12 で与えた母数分布の 1.25 倍偏差を広げた分布として、4.4.1 項と同様の評価を行った。変更後のカム軸軸受け母数分布を Fig.17 に示す。5,10,15 年目に検査を行ない、損傷なしという結果による母数事後分布の 95%確信区間内最大破損確率を E として示す。A は検査結果による更新を行なわない場合の最大破損確率である。

Fig.18 より、15 年目の検査結果によって、破損確率分布が更新されたことが確認できる。Fig.16, 18 より、部品に関わらず、破損確率が小さければ、一隻の検査結果データにより、破損確率分布が更新されることは無いが、破損確率が大きければ、一隻の検査結果データにより、破損確率分布が更新され、最大破損確率が減少することが分かる。

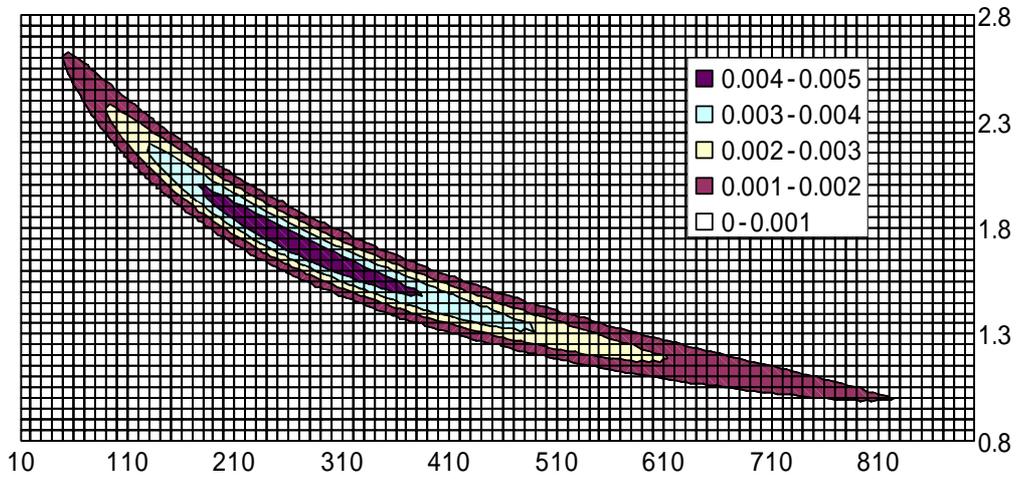


Fig. 17 Posterior distribution of Camshaft Bearing (Fig.12  $\times$  1.25 deviation)

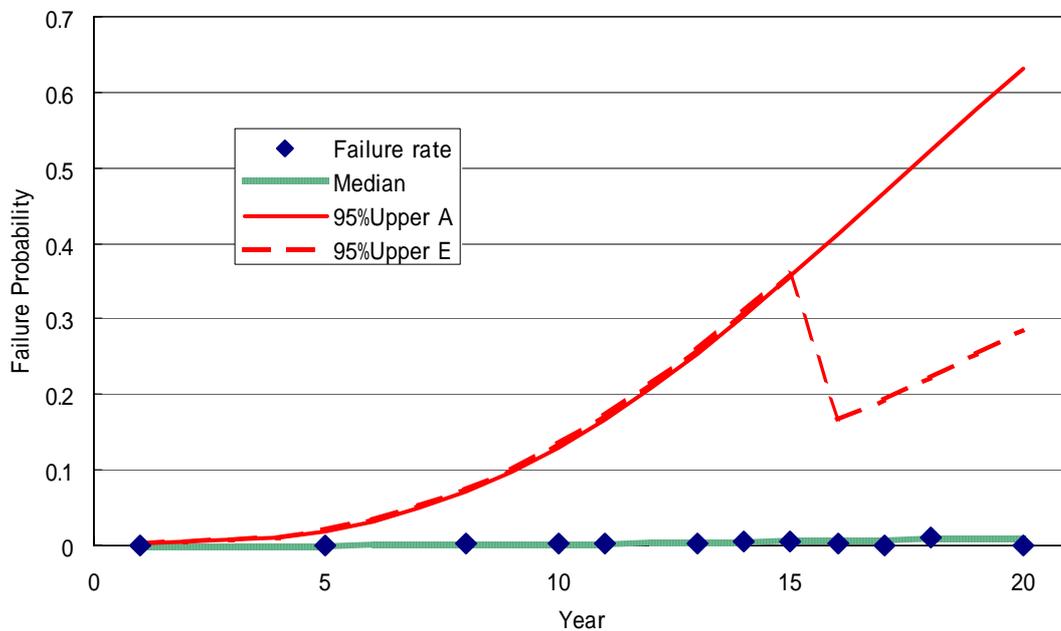


Fig. 18 Failure Probability of Camshaft Bearing with 5,10,15 year inspection (A:no renewal,E:renewal with Fig.17)

#### 4.4.3 検査データ数に重み付けをする

4.3 節より，検査結果データ数が増えれば，更新により最大破損確率が下がることが確認できた．よって，検査結果データ数に重み付けを与えることで，一隻のデータから，破損確率分布を更新させることを検討する．

式 1.1 で与えられるように，機器に対して検査の方法や，日常の管理法により破損確率分布は変化すると考えられる．

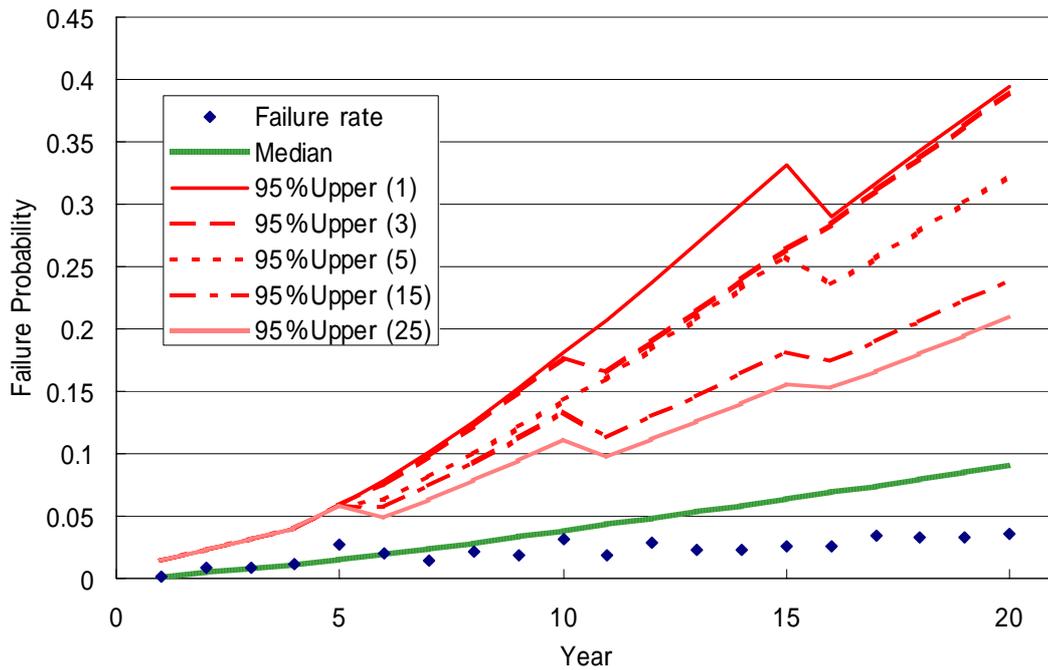
そこで，検査の方法や，日常の管理法により異なる修正係数を，検査結果データ数に掛けることで，破損確率分布を更新させる手法を提案し，検討を行なう．ピストンと，カム軸軸受けの検査の種類を考慮し，Table.3，4 の修正係数を仮定した．管理の方法が良いとされるほど，検査結果データ数に重みを与えるため，大きな係数にしてある．修正係数の値については，5.3 節で検討を行なう．Fig.19，20 に，検査結果データ数に修正係数の積を掛け合わせて母数の更新を行なった最大破損確率の変化を示す．検査は船齢 5，10，15 年目に行い損傷が見つからなかったとする．( ) 内の数字は状態監視センサによる係数と，検査の内容による係数の積である．

Table. 3 Weighted factor for Piston

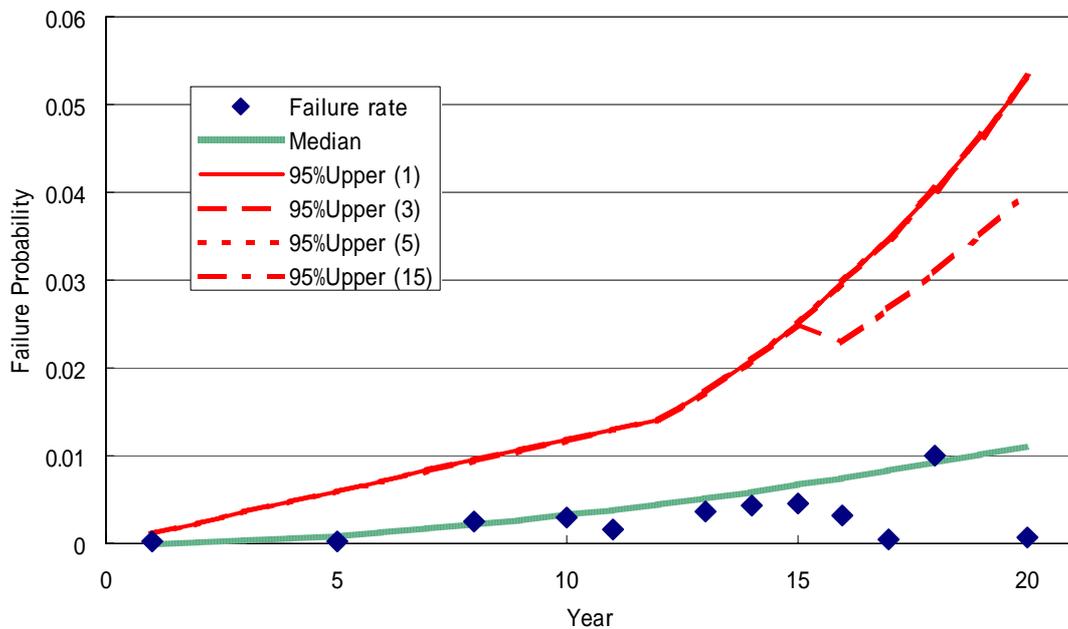
状態監視センサ	係数	検査の内容	係数
無	1	目視検査	1
有	5	ひずみ・磨耗・伸び計測	3
		カラーチェック・磁気探傷	5

Table. 4 Weighted factor for Camshaft Bearing

状態監視センサ	係数	検査の内容	係数
無	1	目視検査	1
有	5	ひずみ・磨耗・伸び計測	3



**Fig. 19** Failure Probability of Piston with 5,10,15 year inspection (( ) is number of Weighted factor)



**Fig. 20** Failure Probability of Camshaft Bearing with 5,10,15 year inspection (( ) is number of Weighted factor)

ピストンにおいては、検査の方法や、日常の管理法により異なる重み付け（修正係数）を掛けることで、更新後の破損確率に格差が与えられた。

しかし、カム軸軸受けの場合、修正係数の積が5以下では更新による破損確率の差は生じなかった。破損確率に修正係数による差を生じさせるには、修正係数の値を Table.4 の値よりも大きくする必要がある。

## 4.5 安全裕度係数の算出

Fig.19, 20 による結果から、式 3.5 における安全裕度係数 A と一般破損確率を Table5, 6 に示す。

Table. 5 Safety margin A for Piston with 5,10,15 year inspection

修正係数の積

	1	3	5	15	25	
船 齢	1	6.6	6.6	6.6	6.6	6.6
	2	4.6	4.6	4.6	4.6	4.6
	3	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8
	4	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3
	5	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7
	6	3.8	3.7	3.1	2.8	2.4
	7	4.1	4	3.3	3	2.5
	8	4.3	4.2	3.4	3.2	2.7
	9	4.5	4.4	3.6	3.3	2.8
	10	4.7	4.6	3.7	3.5	2.9
	11	4.7	3.8	3.7	2.6	2.2
	12	4.9	3.9	3.8	2.7	2.3
	13	5	4	3.9	2.7	2.3
	14	5.1	4.1	4	2.8	2.4
	15	5.2	4.1	4	2.8	2.4
	16	4.2	4.1	3.4	2.5	2.2
	17	4.2	4.2	3.4	2.5	2.2
	18	4.3	4.2	3.5	2.6	2.2
	19	4.3	4.2	3.5	2.6	2.3
	20	4.3	4.3	3.5	2.6	2.3

ピストン一般破損確率

= 1.24

= 125

Table. 6 Safety margin A of Camshaft Bearing with 5,10,15 year inspection

修正係数の積

船 齡	修正係数の積	
	1, 3, 5	15
1	20	20
2	11.9	11.9
3	8.8	8.8
4	7.1	7.1
5	6	6
6	5.2	5.2
7	4.6	4.6
8	4.2	4.1
9	3.8	3.8
10	3.5	3.5
11	3.3	3.3
12	3.1	3.1
13	3.3	3.3
14	3.5	3.5
15	3.7	3.7
16	3.9	3
17	4.1	3.2
18	4.3	3.3
19	4.5	3.5
20	4.7	3.6

カム軸軸受け一般破損確率

$$= 1.75$$

$$= 250$$

5, 10, 15 年目に検査を行った船舶のピストンとカム軸軸受けは, それぞれ Table5, 6 の値を用いて, 式 3.5 より破損確率を評価することができる. また, 検査の方法や, 管理の方法が良い場合, 修正係数の積が大きくなり, Table5, 6 より係数 A が小さくなることで, 破損確率に格差を与える.

## 4.6 結言

本章で得られた結論は、以下の通りである。

ベイズ推定により、部品ごとの破損確率母数分布を更新させるには、95%確信区間内における最大破損確率が  $10^{-1}$  スケールの大きな場合か、更新に用いるデータ数が多い場合である。そのため、一隻の検査結果データでは、更新前の分布による破損確率が低い部品の場合、母数分布が更新されず、最大破損確率が変化しない。

そこで、検査の方法や、管理の方法により異なる係数をデータ数に対して掛け合わせることで、更新に用いるデータ数に重み付けを与える手法を提案し、検討を行なった。

この手法により、1.1.3 項に示すような従来の破損確率評価と異なり、検査の方法や、管理の方法により破損確率に格差を与えることが可能となった。また、部品ごとの母数分布を基にし、ベイズ推定により母数分布を更新し破損確率を算出しているため、安全裕度係数を客観的に定めることが可能となった。

Table.5, 6 における係数 A は、3.4.3 項で仮定した部品ごとの母数分布の偏差拡大値や、Table.3, 4 で仮定した修正係数の値により変化する。そのため、これらの値について次章で検討を行ない、適切な値を提案する。

## 第5章 考察

## 5.1 緒言

本破損確率評価手法では，3.4.3 項において，部品ごとの母数分布を，損傷報告データより得られた母数分布の偏差を拡大した分布とした．その際，偏差の拡大値は， $\sigma$  の分布 95%確信区間による式 3.1 で求めた破損確率最大値が，中央値による破損確率の 3 倍以上となるように与えた．

また，4.4.3 項において，検査結果データに重み付けを与えるために，検査の方法や，日常の管理法により異なる修正係数を作成し Table.3, 4 と仮定した．

この章では，4 章で算出した安全裕度係数 A が，検査結果による更新前母数分布の偏差拡大値や，修正係数の値により，どのように影響されるか検討を行ない，適切な設定値を提案する．

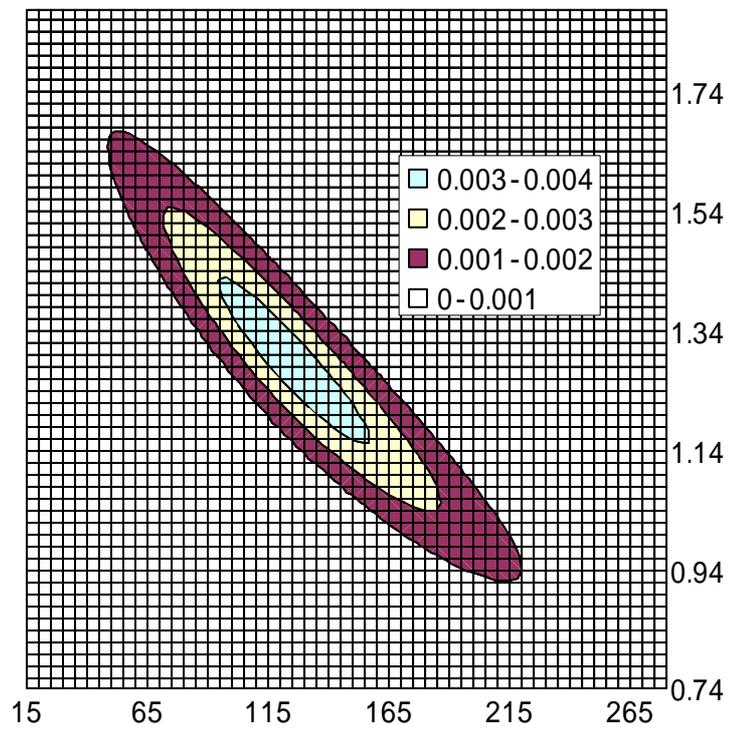
最後に，従来の破損確率評価法との比較を行ない，本評価法の有用性を示す．

## 5.2 母数分布の偏差拡大値の提案

部品ごと母数分布の偏差を変更し，安全裕度係数 A にどのような影響を与えるか検討を行なった．母数分布の偏差を Fig.11,12 の分布の 1.25 倍として 4.4.3 項と同様に，係数 A を算出した．変更後の母数分布は，ピストン，カム軸軸受けそれぞれ，Fig.21, 17 に示す．式 3.5 より求めた係数 A を Table7, 9 に，また，Table.5, 6 との比を Table8,10 に示す．

Table.7, 9 より，母数分布の偏差を広げると，事後分布 95%確信区間内における最大破損確率は上昇し，係数 A の値は大きくなる．しかし，Table.8,10 より，係数 A の大きくなる割合は，重み付けである修正係数の積によって異なる．修正係数の積が大きいほど，係数 A の大きくなる割合が小さい．また，カム軸軸受けでは，修正係数の積が 3 と 5 の場合の係数 A に差が生じた．母数分布の偏差を広げると，修正係数の積による係数 A，つまり破損確率の格差を広げることができる．しかし，破損確率を大きく見積もりすぎると，過度な安全裕度となり，メンテナンスコストが掛かってしまう．

母数分布の偏差は，適切な値を与える必要がある．従来の経験による安全裕度係数が， $a$  として与えられる場合，3.4.3 項において，拡大させた偏差の値を  $a$  とすることを提案する．これにより，検査による母数分布の更新を行なわない場合の安全性は従来どおりと評価され，検査や管理をしっかりと行なっている修正係数の積が大きい船舶の部品は，係数 A が  $a$  よりも小さな値に更新される．



**Fig. 21** Posterior distribution of Piston (Fig.11  $\times$  1.25 deviation)

Table. 7 Safety margin A of Piston (with Fig.19)

修正係数の積

船  
齒  
齡

	1	3	5	15	25
1	25.2	25.2	25.2	25.2	25.2
2	34.3	34.3	34.3	34.3	34.3
3	38.8	38.8	38.8	38.8	38.8
4	40.1	40.1	40.1	40.1	40.1
5	39.2	39.2	39.2	39.2	39.2
6	16.2	8.9	8.6	4.2	3.8
7	16.6	9.3	9.1	4.4	4.1
8	16.7	9.6	9.4	4.6	4.3
9	16.6	9.9	9.7	4.8	4.5
10	16.3	10	9.9	4.9	4.7
11	10.1	6.9	6.7	3.8	3
12	10.1	7	6.8	3.9	3.1
13	10.1	7.1	6.9	4	3.2
14	10	7.1	7	4.1	3.2
15	9.9	7.1	7	4.1	3.3
16	9.7	7.1	5.4	3.4	2.8
17	9.6	7.1	5.4	3.5	2.8
18	9.4	7	5.4	3.5	2.9
19	9.2	7	5.4	3.5	2.9
20	9	6.9	5.4	3.6	2.9

Table. 8 Table.7 / Table.5

	1	3	5	15	25
1	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8
2	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5
3	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2
4	12.2	12.2	12.2	12.2	12.2
5	10.6	10.6	10.6	10.6	10.6
6	4.3	2.4	2.8	1.5	1.6
7	4	2.3	2.8	1.5	1.6
8	3.9	2.3	2.8	1.4	1.6
9	3.7	2.3	2.7	1.5	1.6
10	3.5	2.2	2.7	1.4	1.6
11	2.1	1.8	1.8	1.5	1.4
12	2.1	1.8	1.8	1.4	1.3
13	2	1.8	1.8	1.5	1.4
14	2	1.7	1.8	1.5	1.3
15	1.9	1.7	1.8	1.5	1.4
16	2.3	1.7	1.6	1.4	1.3
17	2.3	1.7	1.6	1.4	1.3
18	2.2	1.7	1.5	1.3	1.3
19	2.1	1.7	1.5	1.3	1.3
20	2.1	1.6	1.5	1.4	1.3

Table. 9 Safety margin A of Camshaft Bearing (with Fig.15)

修正係数の積

	1	3	5	15
1	50.9	50.9	50.9	50.9
2	27.2	27.2	27.2	27.2
3	18.9	18.9	18.9	18.9
4	16.3	16.3	16.3	16.3
5	20.6	20.6	20.6	20.6
6	18.9	18.9	18.9	7.6
7	22.8	22.8	22.8	8.6
8	26.7	26.7	26.7	10
9	30.4	30.4	30.4	11.4
10	34	34	34	12.7
11	32.4	12.2	12.2	6.5
12	35.5	13.5	13.5	7.1
13	38.2	14.7	14.7	7.7
14	40.7	15.8	15.8	8.3
15	42.8	16.9	16.9	8.9
16	22.1	22.1	21.5	11.1
17	23.1	23.1	22.5	11.7
18	23.9	23.9	23.4	12.2
19	24.7	24.7	24.3	12.7
20	25.5	25.5	25	13.2

船  
齒

Table. 10 Table.9 / Table.6

	1	3	5	15
1	2.5	2.5	2.5	2.5
2	2.3	2.3	2.3	2.3
3	2.2	2.2	2.2	2.2
4	2.3	2.3	2.3	2.3
5	3.4	3.4	3.4	3.4
6	4.7	4.7	4.7	1.9
7	6.2	6.2	6.2	2.4
8	7.8	7.8	7.8	3
9	9.5	9.5	9.5	3.6
10	11.3	11.3	11.3	4.3
11	13.1	5	5	2.7
12	15	5.7	5.7	3.1
13	15	5.8	5.8	3
14	14.7	5.7	5.7	3
15	14.4	5.7	5.7	3
16	5.6	5.6	5.5	3.7
17	5.6	5.6	5.4	3.7
18	5.5	5.5	5.4	3.7
19	5.4	5.4	5.3	3.7
20	5.4	5.4	5.3	3.7

## 5.3 重み付け係数値の提案

Table.5 より，重み付け係数である修正係数の積が大きいほど，検査結果による母数分布の更新により，最大破損確率が中央値に近づいて下がり，安全裕度である係数 A が小さくなる．しかし，最大破損確率を下げすぎて，過度に安全裕度を下げるのは危険である．

一方，Table.6 より，カム軸軸受けにおいて，修正係数の積が小さな場合，検査結果による母数分布の更新を行なっても，係数 A に差が生じない．これでは，検査の方法や，日常の管理法をいくら良くしても，破損確率は変わらないという評価になってしまう．よって，係数 A の値に格差を生じさせるために必要な，修正係数の積の値について検討を行なった．

ピストンにおいて，Fig.19 より，修正係数の積が 1 と 5 の場合においても，検査の結果により最大破損確率に差が生じている．修正係数の定め方は Table.3 を参照とする．ピストンについては，修正係数の積が小さな値においても，係数 A に差を生じさせることができると考えられる．修正係数の値により，どれだけ係数 A が変化するか検討を行なうため，4.4.3 項と同様にして算出した，修正係数の積が 1 から 10 の場合の，ピストンの係数 A を Table.11 に示す．

カム軸軸受けの場合，Fig.20 より，修正係数の積が 1 から 5 の場合において，検査結果による更新で最大破損確率に差が生じていない．そのため，修正係数の積を大きくし，10 から 100 の場合の，4.4.3 項と同様にして算出した係数 A を Table.12 に示す．

Table. 11 Safety margin A of Piston (Weighted factor 1 ~ 10)

		修正係数の積									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
船 齢	更新なし	6.6	6.6	6.6	6.6	6.6	6.6	6.6	6.6	6.6	6.6
		4.6	4.6	4.6	4.6	4.6	4.6	4.6	4.6	4.6	4.6
		3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8
		3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3
		3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7
		3.9	3.8	3.7	3.1	3.1	3.1	3.1	3	3	3
		4.2	4.1	4	3.3	3.3	3.3	3.3	3.2	3.2	3.2
		4.4	4.3	4.2	3.4	3.4	3.4	3.4	3.3	3.3	3.3
		4.6	4.5	4.4	3.6	3.6	3.6	3.6	3.5	3.5	3.5
		4.8	4.7	4.6	3.7	3.7	3.7	3.7	3.6	3.6	3.6
		4.9	4.7	3.8	3.7	3.7	3.1	3.1	3.1	3.1	3
		5	4.9	3.9	3.8	3.8	3.2	3.2	3.1	3.1	3.1
		5.1	5	4	3.9	3.9	3.3	3.3	3.2	3.2	3.2
		5.2	5.1	4.1	4	4	3.3	3.3	3.3	3.3	3.2
		5.3	5.2	4.1	4.1	4	3.4	3.4	3.3	3.3	3.3
		5.3	4.2	4.1	3.4	3.4	3.4	3.3	3.3	2.9	2.9
		5.3	4.2	4.2	3.5	3.4	3.4	3.4	3.4	2.9	2.9
		5.4	4.3	4.3	3.5	3.5	3.5	3.4	3.4	2.9	2.9
		5.4	4.3	4.3	3.5	3.5	3.5	3.5	3.4	3	3
		5.4	4.3	4.3	3.6	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3

Table. 12 Safety margin A of Camshaft Bearing (Weighted factor 10 ~ 100)

船 齢	修正係数の積										
	更新なし	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
1	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
2	11.9	11.9	11.9	11.9	11.9	11.9	11.9	11.9	11.9	11.9	11.9
3	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8
4	7.1	7.1	7.1	7.1	7.1	7.1	7.1	7.1	7.1	7.1	7.1
5	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
6	5.2	5.2	5.2	5.2	5.1	5.1	5	5	5	4.9	4.9
7	4.6	4.6	4.6	4.6	4.5	4.5	4.5	4.5	4.4	4.4	4.3
8	4.2	4.2	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4	4	3.9
9	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.7	3.7	3.7	3.6	3.6
10	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.4	3.4	3.4	3.4	3.3
11	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2
12	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1	3	3	3	3	3	3
13	3.3	3.3	3.3	3.3	3	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8
14	3.5	3.5	3.5	3.5	3.2	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7
15	3.7	3.7	3.7	3.7	3.5	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9
16	3.9	3.9	3	3	3	3	2.8	2.8	2.5	2.5	2.5
17	4.1	4.1	3.2	3.2	3.2	3.2	3	3	2.6	2.6	2.6
18	4.3	4.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.1	3.1	2.7	2.7	2.7
19	4.5	4.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.2	3.2	2.8	2.8	2.8
20	4.7	4.7	3.6	3.6	3.6	3.6	3.4	3.4	2.9	2.9	2.9

Table . 11 において、船齢 10 での検査結果による更新により、重み付け係数である修正係数の積が 10 の係数 A は、検査結果による更新を行なわない場合の係数 A の  $2/3$  以下となった。係数 A は安全裕度を表す。

Table . 12 において、修正係数の積が 10 の係数 A は、修正係数の積が 1 の係数 A と変わらなかった。船齢 15 での検査結果による更新により、修正係数の積が 80 以上において、検査結果による更新を行なわない場合の係数 A の  $2/3$  以下となった。係数 A の値を  $2/3$  以下に減少させるためには、修正係数の積が、ピストンの場合より 10 倍程度大きい必要がある。

Fig.15 より、ピストンの船齢 10 における最大破損確率は、検査結果による更新を行なわないとき、0.18 であった。一方、Fig.16 より、カム軸軸受けの船齢 15 における破損確率は、0.03 であった。よって、検査結果による更新により、係数 A を検査結果による更新を行なわない場合の係数 A の  $2/3$  以下にするためには、修正係数の積が、 $(1 / \text{破損確率})$  スケール必要であると考えられる。

検査結果による更新を行なわない場合の係数 A の  $2/3$  以下にするために必要な修正係数の積について検討を行なう。これは、検査結果による更新後の最大破損確率が、更新前の最大破損確率  $2/3$  以下になることである。ピストン、カム軸軸受けに加えて、シリンダーカバー(弁穴縁・壁周辺)、シリンダーライナー(ボア壁面)、連接棒(下端部)の 5 つの部品について、検査結果による更新後の最大破損確率が更新を行なわない場合の  $2/3$  以下となるために必要な修正係数の積を求めた。10,15 年目の検査時における最大破損確率と共に Table.13 に示す。シリンダーカバー(弁穴縁・壁周辺)、シリンダーライナー(ボア壁面)、連接棒(下端部)の各データは、付録に掲載する。

Table. 13 Necessary Weighted factor

検査時期	破損確率(A)	修正係数の積(B)	A × B
<b>ピストン</b>			
10	1.84E-01	6	1.1
15	3.37E-01	4	1.35
<b>カム軸軸受け</b>			
10	1.18E-02	790	9.35
15	2.51E-02	80	2.01
<b>シリンダーカバー弁穴縁・壁周辺</b>			
10	3.05E-02	45	1.37
15	6.57E-02	20	1.31
<b>シリンダーライナーボア壁面</b>			
10	8.84E-02	17	1.5
15	1.81E-01	8	1.45
<b>連接棒下端部</b>			
10	2.13E-02	305	6.49
15	4.41E-02	60	2.65

Table.13 において，検査時の最大破損確率と重み付け係数である修正係数の積との積(A × B)は，1 から 10 の範囲であり，破損確率が小さいほど，この値は大きくなる傾向がある．よって，検査時の破損確率から，破損確率が検査結果による更新により，更新前の 2 / 3 以下に減少するための修正係数の積を求めると，( 1 / 検査時の破損確率 ) スケール必要であることが分かる．

Table.3,4 で与えられるような．検査結果データに重み付けを行なうための修正係数の値を，検査の方法や，管理の方法が良い船舶に対して，その積が ( 1 / 検査時の破損確率 ) スケールとなるように値を定めることを提案する．これにより，検査の方法や，管理の方法が良い船舶における部品の破損確率は，検査結果データによる更新前の破損確率の 2 / 3 以下に減少される．

## 5.4 従来の方法との比較

### 5.4.1 検査データ重み付けの有効性

本手法による破損確率評価と、従来の破損確率評価法、ならびに API581 による破損確率評価法との比較を行なった。

従来の破損確率評価法では、損傷報告データより点推定を用いて、部品の平均的な破損確率を算出し、その値へ、安全裕度として、経験により定められた値を掛け合わせる。経験により定められた定数が 3 であると仮定した場合、一般破損確率に掛け合わせる係数 A は Table.14 となる。Table.14 と Table.5, 6 や Table.11, 12 の係数 A を比較する。

Table. 14 Safety margin A of usual estimation

		係数 A
船 齢	1	3
	...	
	20	

Table.14 より、従来の方法では、検査や管理の方法によらず安全裕度が一定であるため、破損確率は全ての船舶において等しいと評価される。一方、Table.5,6 より、本手法においては、検査の仕方や管理の方法により、検査データ数に重み付けを行うことにより(4.4.3 項参照)、破損確率に格差を与えることが示された。これにより、きちんとした管理を行なう船舶は、破損確率が低く更新される。また、修正係数が小さい船舶は、従来と同等もしくは大きな値の安全裕度となるのに対し、より良い管理を行なう船舶は、従来よりも小さな安全裕度となる。

### 5.4.2 破損確率評価法の有効性

API581 による破損確率評価法では、式 1.1 のように、一般破損確率という値に対し、検査の仕方や管理の方法で異なる係数を掛ける。安全裕度を検査の仕

方や管理の方法で変化させる．最も検査や管理の方法が優れている船舶の係数を 2，そうでない船舶の係数を 3 と仮定した場合，一般破損確率に掛け合わせる係数 A は Table.15 となる．

Table. 15 Safety margin A of no Bayes

	管理の優れた船舶	管理の優れていない船舶
検査年	2	3
...		
次期検査年		

Table.15 より，検査や管理の方法により破損確率に格差を生じさせることができる．しかし，値は検査の時期によらず，一定である．ここで，Fig.11 の母数分布を持つピストンに対し，Table.3 による検査データ数の重み付けを行ない，船齢 3,8,13,18 年目に検査を行った船舶の安全裕度係数 A を Table.16 に示す．

Table. 16 Safety margin A of Piston with 3,8,13,18 year inspection

修正係数の積

	1	3	5	15	25	
船 齢	1	6.6	6.6	6.6	6.6	6.6
	2	4.6	4.6	4.6	4.6	4.6
	3	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8
	4	3.3	3.2	3.2	2.9	2.8
	5	3.7	3.5	3.5	2.9	2.8
	6	3.9	3.8	3.8	3.1	3
	7	4.2	4.1	4.1	3.3	3.2
	8	4.4	4.3	4.3	3.4	3.3
	9	4.5	3.6	3.5	2.8	2.4
	10	4.7	3.7	3.6	2.9	2.5
	11	4.8	3.8	3.7	3	2.5
	12	4.9	3.9	3.8	3.1	2.6
	13	5.1	4	3.9	3.2	2.7
	14	4.1	4	3.3	2.7	2.3
	15	4.1	4.1	3.4	2.8	2.4
	16	4.2	4.1	3.4	2.8	2.4
	17	4.2	4.2	3.5	2.9	2.5
	18	4.3	4.2	3.5	2.9	2.5
	19	4.3	4.2	3.5	2.6	2.2
	20	4.3	4.2	3.5	2.6	2.3

Table.5 と Table.16 において、船齢 11 の安全裕度係数 A を比べる。Table.5 は、同様の条件で、船齢 5,10,15 年目に検査を行った場合の係数 A を表している。同じ船齢、同じ重み付け、同じ検査回数にもかかわらず、検査を行った時期が近い Table.5 の係数 A の方が、値が小さい。これにより、本手法においては、検査や管理の方法のみならず、検査の時期によっても破損確率に格差を与えることが示された。

また、Table.14,15 において、安全裕度係数 A を経験による主観で定めるのに対し、本手法では、3.4.4 項の破損確率評価法を用いることで、Table.5,16 に示されるように、客観的に安全裕度係数の設定を行なう。

## 5.5 結言

本章で得られた結論は、以下の通りである。

本破損確率評価手法は、Table.1,2 で与えられるような損傷報告データを基に、ベイズ推定を行ない、式 3.1 で与えられる破損確率母数の分布を解析し、得られた母数分布の偏差を拡大した分布を、個船ごとの部品破損確率を算出する際の母数分布としている（3.4.3 項参照）。この母数分布の偏差を拡大するほど、検査や管理の方法が良い船舶と、そうでない船舶の破損確率の格差を広げることができた（Table.8,10）。しかし、破損確率は母数分布の偏差を拡大するほど大きくなった。そこで、母数分布の偏差拡大値として、従来経験による安全係数が  $a$  として与えられる場合、母数分布 95% 確信区間内最大破損確率が、母数分布中央値による破損確率の  $a$  倍以上とすることを提案した。これにより、検査による母数分布の更新を行なわない場合の安全性は従来どおりと評価され、検査や管理をしっかりと行なっている（重み付け係数が大きい）船舶の部品は、安全裕度が  $a$  よりも小さな値に更新され、破損確率が低く評価される。

次に、検査や管理の方法により異なる修正係数の値の提案を行なった。修正係数は Table.3,4 のように与え、検査結果データ数に重み付けをする値である。この修正係数が小さいと、破損確率が小さい部品では、検査や管理の方法による破損確率の格差を与えることができない（Table.6）。しかし、修正係数を大きくすると過度に破損確率を減少させてしまう。そこで、修正係数の値として、最も管理が良い船舶に与えられる値を（ $1 /$  検査時の破損確率）スケールとすることを提案した。これにより、最も管理が良い船舶の部品の破損確率は、検査による更新前の破損確率の  $2 / 3$  以下に更新される。

従来の破損確率評価法と比較を行ない、本手法の有効性を示した。従来の手法

も本手法も、損傷報告データにより求まる母数の点推定値の破損確率に対し、バラツキを考慮した安全裕度係数を掛けることで、破損確率の評価を行なう。従来の手法では、全船舶が等しい係数を画一的に決められていたが、本手法においては、検査や管理の方法により係数が変わる(Table.11,12 参照,修正係数の積が大きいほど管理が良い)。また、最後に検査を行った時からの年数によっても係数が変わる(Table.5,16 参照)。これにより、検査の時期や管理の方法の異なる船舶ごとに破損確率が評価される。また、係数の値は、損傷報告データや、検査結果による更新で定まる母数分布の95%確信区間(2.5節参照)により求まるため、客観的に評価される。

# 結論

本研究では、破損確率の評価を行なう手法として、以下の提案を行ない、従来の手法と比較することで、その有効性を示した。

- ・検査結果データ数に、船舶検査の手法や管理法により異なる重み付け係数を掛け合わせ、ベイズ推定を行なうことを提案した(4.4.3 項参照)。船舶ごとの検査結果データにより、船舶ごとの破損確率を評価することを示した(5.4.1 項参照)。ここで述べる船舶ごとの破損確率評価とは、検査を行った時期、検査や管理の方法により異なる安全裕度の設定を行なうことである。

- ・安全裕度の設定を、ベイズ推定により求まる母数分布確信区間内の最大破損確率と一般破損確率の比とすることを提案した(3.4.4 項参照)。母数分布とは、式 3.1 に示すワイブル分布関数の形状母数  $\alpha$  と尺度母数  $\beta$  の同時確率密度関数のことである。本手法では、ベイズの定理を用いて検査結果よりこの母数を推定し、破損確率を求めている。また、一般破損確率とは、母数分布中央値による破損確率である。これにより、安全裕度が客観的に評価されることを示した(5.4.2 項参照)。

# 付録 A

付録として Table.13 の解析に用いた，シリンダーカバー(弁穴縁・壁周辺)，シリンダーライナー(ボア壁面)，接続棒(下端部)のデータを掲載する．

各損傷報告データを Table.17,18,19 に，3.4 節に示した手法で，損傷報告データを基に推定し，偏差を広げた各部品の母数事後分布を Fig.22,23,24 に，各部品の母数分布より求めた 95%確信区間内の最大破損確率と中央値による破損確率を Fig.25,26,27 に示す．

Table. 17 Damage of Cylinder Cover valve hole corner and around

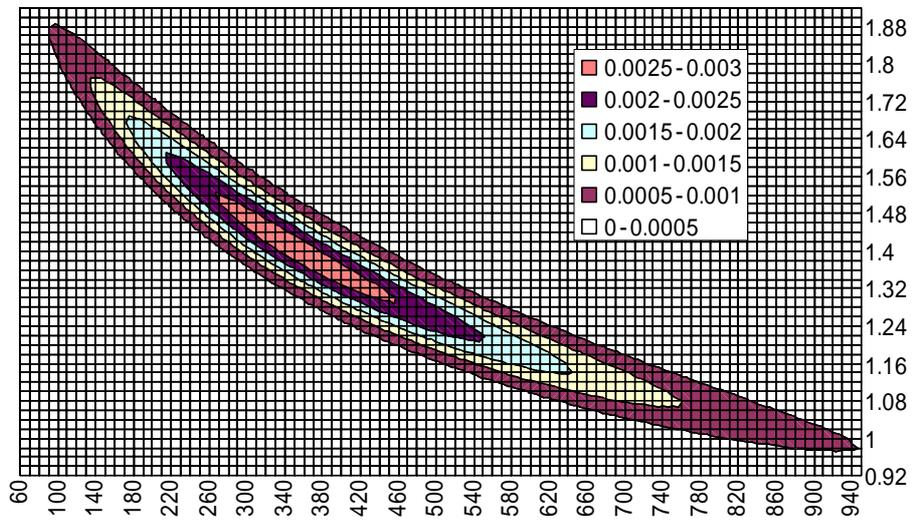
船齡	2	3	4	5	6	7	8
損傷数	14	22	20	42	63	91	92
シリンダー数	24294	23368	22457	21561	20681	19816	18967
船齡	9	10	11	12	13	14	15
損傷数	95	88	46	104	72	31	70
シリンダー数	18133	17314	16511	15723	14951	14194	13452
船齡	16	17	18	19	20		
損傷数	45	77	52	52	19		
シリンダー数	12726	12015	11320	10640	9976		

Table. 18 Damage of Cylinder Liner bore wall

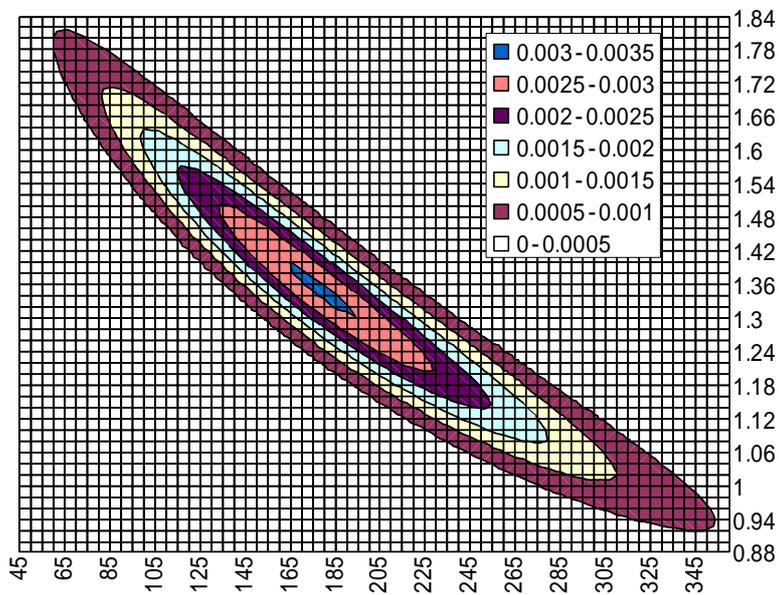
船齡	1	2	3	4	5	6	7
損傷数	10	81	111	108	270	168	131
シリンダー数	25236	24294	23368	22457	21561	20681	19816
船齡	8	9	10	11	12	13	14
損傷数	141	160	249	194	204	187	231
シリンダー数	18967	18133	17314	16511	15723	14951	14194
船齡	15	16	17	18	19	20	
損傷数	198	171	176	226	192	171	
シリンダー数	13452	12726	12015	11320	10640	9976	

Table. 19 Damage of Connecting Rod lower end

船齡	1	2	3	5	7	8
損傷数	2	3	4	3	4	5
隻数	3808	3665	3525	3252	2988	2859
船齡	10	11	13	14	15	
損傷数	4	6	15	4	28	
隻数	2609	2488	2251	2137	2024	
船齡	16	17	18	19	20	
損傷数	20	26	20	7	13	
隻数	1914	1807	1701	1598	1498	



**Fig. 22** Posterior distribution of Cylinder Cover valve hole corner and around



**Fig. 23** Posterior distribution of Cylinder Liner bore wall

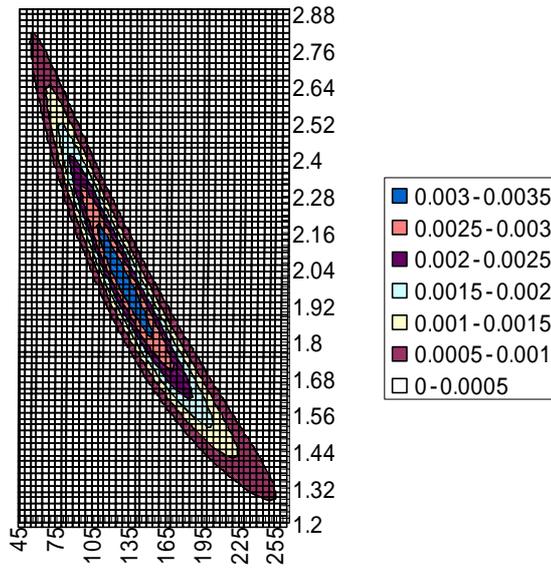
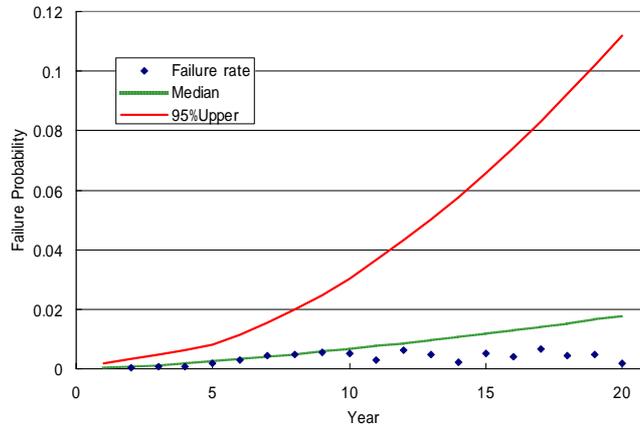
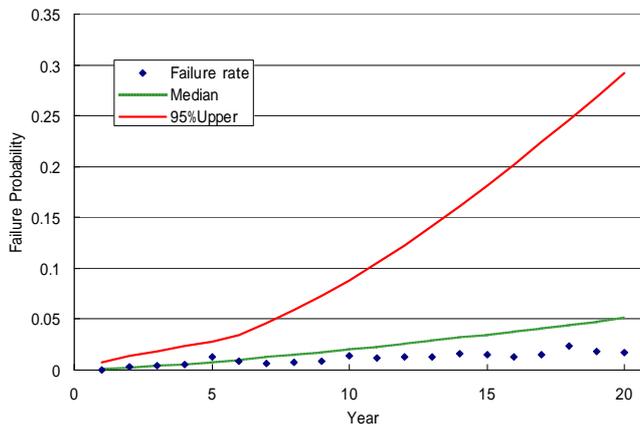


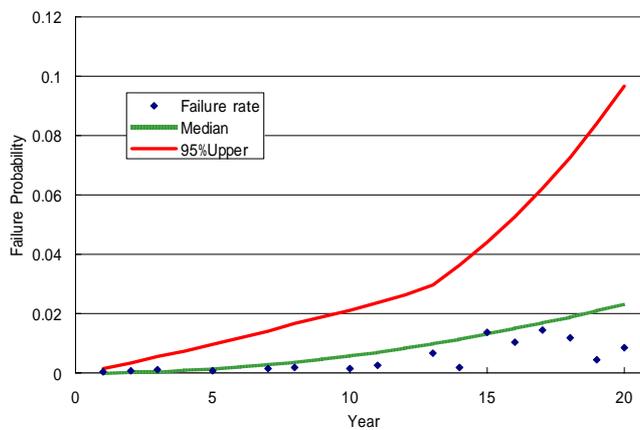
Fig. 24 Posterior distribution of Connecting Rod lower end



**Fig. 25** Failure Probability of Cylinder Cover valve hole corner and around



**Fig. 26** Failure Probability of Cylinder Liner bore wall



**Fig. 27** Failure Probability of Connecting Rod lower end

## 付録 B

API581 における一般破損確率(GFF)の値を，配管の確率論的破壊力学評価ソフト WinPraise を用いて検討を行なった．その結果を示す．

## 緒言

RBM導入のガイダンスとして、広く普及している米国石油学会(API)の発行したAPI581[3]では、機器の破損確率の評価法として、式 1.1 を提案している。ここで一般破損確率(Generic Failure Frequency)とは Table.20 で与えられるものである。

Table. 20 GFF

Equipment Type	Data Source (References)	Leak Frequency (per year for four hole sizes)			
		1/4 in.	1 in.	4 in.	Rupture
Centrifugal Pump, single seal	1	6x10 <sup>-2</sup>	5x10 <sup>-4</sup>	1x10 <sup>-4</sup>	
Centrifugal Pump, double seal	1	6x10 <sup>-3</sup>	5x10 <sup>-4</sup>	1x10 <sup>-4</sup>	
Column	2	8x10 <sup>-5</sup>	2x10 <sup>-4</sup>	2x10 <sup>-5</sup>	6x10 <sup>-6</sup>
Compressor, Centrifugal	1		1x10 <sup>-3</sup>	1x10 <sup>-4</sup>	
Compressor, Reciprocating	6		6x10 <sup>-3</sup>	6x10 <sup>-4</sup>	
Filter	1	9x10 <sup>-4</sup>	1x10 <sup>-4</sup>	5x10 <sup>-5</sup>	1x10 <sup>-5</sup>
Fin/Fan Coolers	3	2x10 <sup>-3</sup>	3x10 <sup>-4</sup>	5x10 <sup>-8</sup>	2x10 <sup>-8</sup>
Heat Exchanger, Shell	1	4x10 <sup>-5</sup>	1x10 <sup>-4</sup>	1x10 <sup>-5</sup>	6x10 <sup>-6</sup>
Heat Exchanger, Tube Side	1	4x10 <sup>-5</sup>	1x10 <sup>-4</sup>	1x10 <sup>-5</sup>	6x10 <sup>-6</sup>
Piping, 0.75 in. diameter, per ft	3	1x10 <sup>-5</sup>			3x10 <sup>-7</sup>
Piping, 1 in. diameter, per ft	3	5x10 <sup>-6</sup>			5x10 <sup>-7</sup>
Piping, 2 in. diameter, per ft	3	3x10 <sup>-6</sup>			6x10 <sup>-7</sup>
Piping, 4 in. diameter, per ft	3		6x10 <sup>-7</sup>		7x10 <sup>-8</sup>
Piping, 6 in. diameter, per ft	3		4x10 <sup>-7</sup>		8x10 <sup>-8</sup>
Piping, 8 in. diameter, per ft	3		3x10 <sup>-7</sup>	8x10 <sup>-8</sup>	2x10 <sup>-8</sup>
Piping, 10 in. diameter, per ft	3		3x10 <sup>-7</sup>	8x10 <sup>-8</sup>	2x10 <sup>-8</sup>
Piping, 12 in. diameter, per ft	3		3x10 <sup>-7</sup>	3x10 <sup>-8</sup>	2x10 <sup>-8</sup>
Piping, 16 in. diameter, per ft	3		2x10 <sup>-7</sup>	2x10 <sup>-8</sup>	2x10 <sup>-8</sup>
Piping, > 16 in. diameter, per ft	3		6x10 <sup>-8</sup>	2x10 <sup>-7</sup>	1x10 <sup>-8</sup>
Pressure Vessels	2	4x10 <sup>-5</sup>	1x10 <sup>-4</sup>	1x10 <sup>-5</sup>	6x10 <sup>-6</sup>
Reactor	2	1x10 <sup>-4</sup>	3x10 <sup>-4</sup>	3x10 <sup>-5</sup>	2x10 <sup>-5</sup>
Reciprocating Pumps	7	0.7	.01	.001	.001
Atmospheric Storage Tank	5	4x10 <sup>-5</sup>	1x10 <sup>-4</sup>	1x10 <sup>-5</sup>	2x10 <sup>-5</sup>

GFF は、石油プラントにおける機器ごとの円孔 (1/4in・1in・4in) 発生と破裂の確率が記されている。しかし、API581 には、米国石油プラントのデータを利用とあるのみで根拠が不明であるという問題がある。そのため、環境の異なる日本において使用可能か、また、石油プラント以外の機器においてはどうかということも不明である。

本研究では、API581 の破損確率評価の出発点である GFF を検討し、根拠のチェックを行なう事を目的とする。評価手法として、確率論的破壊力学を用いた配管形状の破損確率計算ソフト WinPraise を用いて、配管の GFF(Rupture) 値との比較を行なった。WinPraise は Fig.28 の配管周方向内部半楕円表面き裂による配管の破損確率の評価を行なうソフトである[10][11]。

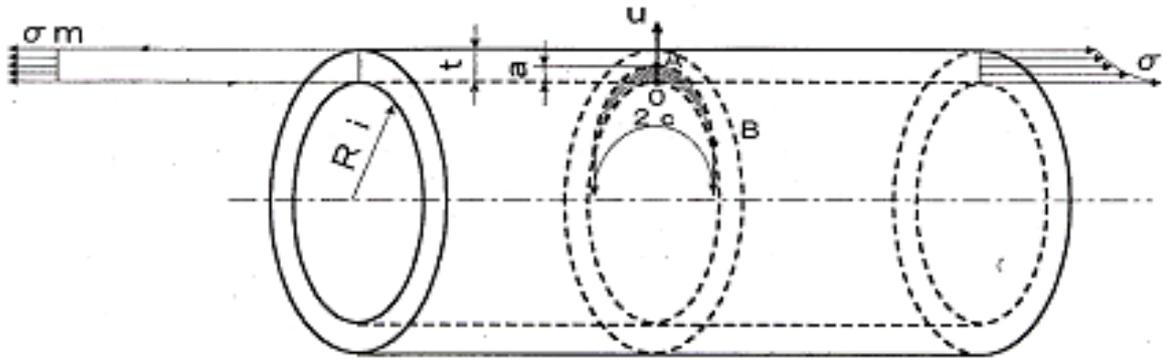


Fig. 28 Estimation form of WinPraise

## 解析条件

GFF 値のうち、配管の Rupture 確率を比較に用いた。Table.18 で与えられるように、GFF 値は、配管の呼び径サイズごとの確率が記載されているが、他解析条件については全く記載されていない。そこで、WinPraise での解析では、配管サイズ以外の他計算条件パラメータの値は、主に WinPraise に含まれているデフォルト値を使用するとして計算を行なった。デフォルト値は、配管の平均的な値として入力されている。WinPraise で用いた計算条件パラメータを以下に示す。WinPraise では呼び径と呼び厚さを変更して計算を行なった。

呼び径は、計算を行なう配管の内径を表す。1/4, 1, 4 の数字はそれぞれ発生する円孔のサイズ(インチ)を表している。Rupture は破損の確率を表している。

配管の呼び径・呼び厚さごとの外径と板厚をインチで表したものを Table.21 に示す。

Table. 21 Diameter and Thickness of Piping

呼び径	d(in)	SCH10	SCH20	SCH30	SCH40	SCH60	SCH80	SCH100	SCH120	SCH140	SCH160
0.75	1.05				0.113		0.154				0.218
1	1.315				0.133		0.179				0.25
2	2.375				0.154		0.218				0.343
4	4.5				0.237		0.337		0.437		0.531
6	6.625				0.28		0.432		0.562		0.718
8	8.625		0.25	0.277	0.322	0.406	0.5	0.593	0.718	0.812	0.906
10	10.75		0.25	0.307	0.365	0.5	0.593	0.718	0.843	1	1.125
12	12.75		0.25	0.33	0.406	0.562	0.687	0.843	1	1.125	1.312
16	16	0.25	0.312	0.375	0.5	0.656	0.842	1.031	1.218	1.437	1.593

呼び径が 6 までは，SCH40，呼び径が 8 から 12 は，SCH20，呼び径が 16 では SCH10 の呼び厚さが最薄である．

Winpraise においては，初期き裂寸法分布（Log Normal）として Khaleel と Simonen の近似式[10]を用いている．これは，配管の厚さ（h）の関数で表される．

材料 304

$$\text{Median Crack Depth } a, (\text{in}) \quad 0.112 - 0.02299 h + 0.0001481 h^2$$

$$\text{Shape Factor} \quad 0.09733 + 0.3425 h - 0.07268 h^2$$

材料 carbon

$$\text{Median Crack Depth } a, (\text{in}) \quad 0.0519h^{(-0.4572+0.04326\ln(h))}$$

$$\text{Shape Factor} \quad 0.5102+0.2294\ln(h)$$

$$\text{Median } b/a \quad 1.336$$

$$\text{Shape Factor} \quad 0.538$$

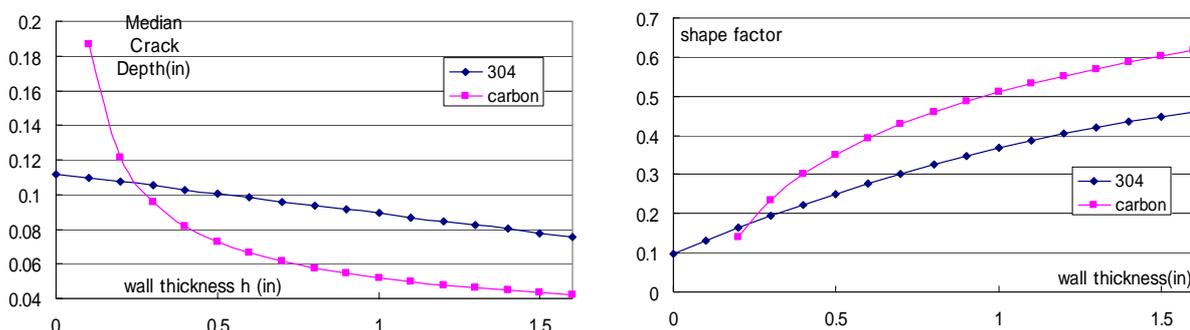


Fig. 29 Median crack depth and Shape factor of Initiated Cracks

Fig.29 は，配管厚さごと，初期き裂分布のパラメータを表す．板厚が厚くなるほど，初期き裂長さの中央値は減少するが，バラつきは大きくなる．

Winpraise における応力値の設定は，Low，Medium，High から選択する．変化するパラメータは，プラント運転中の定常応力(ksi)，応力の不確実性・分散，プラントの昇温/冷却に対応する頻度/年，設計上限応力，寿命中の最大荷重制御応力である．Table.22 にそれぞれの値を示す．

Table. 22 Stress

	低	中	高
<b>定常応力 (HU/CD)</b>			
定常応力, ksi	4	8	16
頻度/年	0.5	2	5
応力の不確実性、分散	0	0.2	0.5
<b>応力一様過渡変化, <math>\sigma_{unif}</math></b>			
変化量, ksi	5	10	20
頻度、HU/CD ごと	1	5	10
応力の不確実性、分散	0	0.2	0.5
<b>熱応力過渡変化</b>			
変化量(ランプ)または 変化量(ステップ)	100°F/hr 20°F	100°F/min 100°F	10°F/sec 300°F
頻度、HU/CD ごと	1	5	10
<b>高サイクル疲労</b>			
表 10-2 を参照			
<b>残留応力</b>			
高応力の割合 <sup>1</sup>	1/4	1/2	1
<b>設計上限応力(最大 LC)</b>			
寿命中の最大荷重制御 応力	$0.2\sigma_{f0}$	$0.4\sigma_{f0}$	$0.8\sigma_{f0}^2$

WinPraise における材料は、2 種類について評価が行なえる。炭素鋼（フェライト）と 304（オーステナイト）である。それぞれについて、異なるパラメータは、正規分布に従うとした流動応力の母数(Table.23)と、初期き裂分布の母数である (Fig.29)。

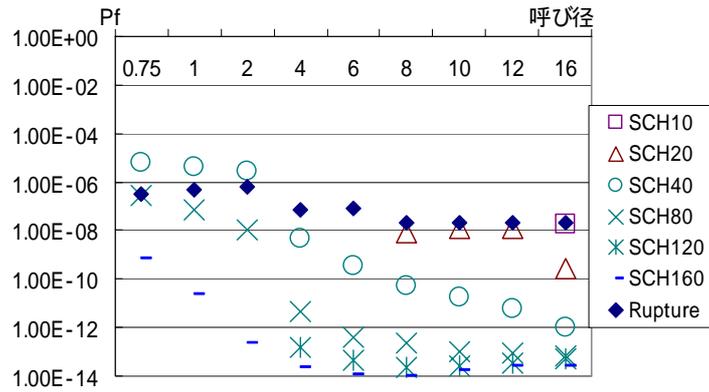
Table. 23 Factor of Flow stress

流動応力（正規分布）	炭素鋼	304
平均値(Ksi)	52	44.9
標準偏差	2.2	1.9

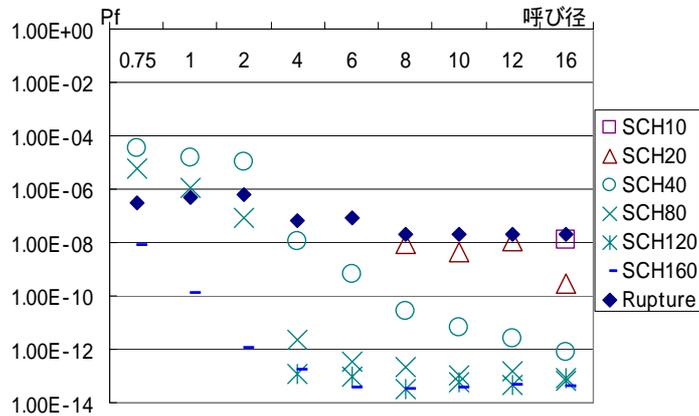
## 解析結果

以下の条件を変更し、解析を行った。呼び径、呼び厚さごとの破損確率を示す。

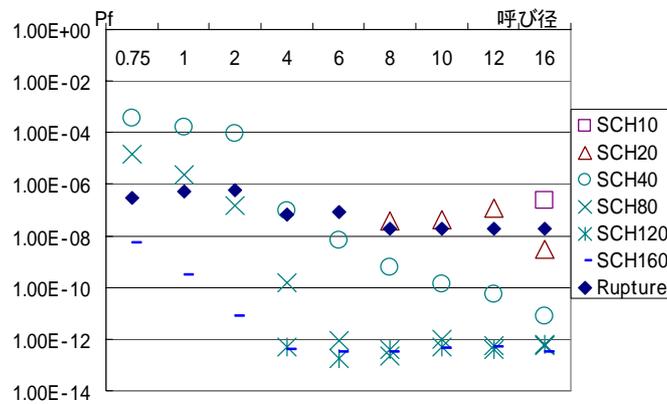
- ・ 応力 定常応力のみ (A), 定常応力と応力一様・熱応力過渡変化 (B)
- ・ 材料 304 (オーステナイト), 炭素鋼 (フェライト)
- ・ 応力レベル Low, Medium, High



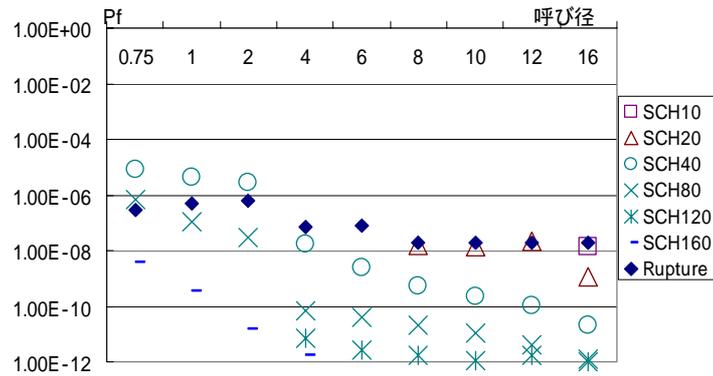
**Fig. 30 Failure Probability of Piping (Stress: A,Material:304,Stress level:Low)**



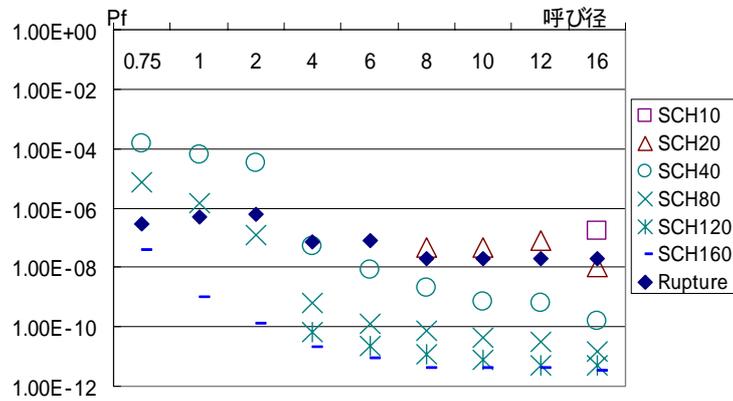
**Fig. 31 Failure Probability of Piping (Stress: A,Material:304,Stress level:Medium)**



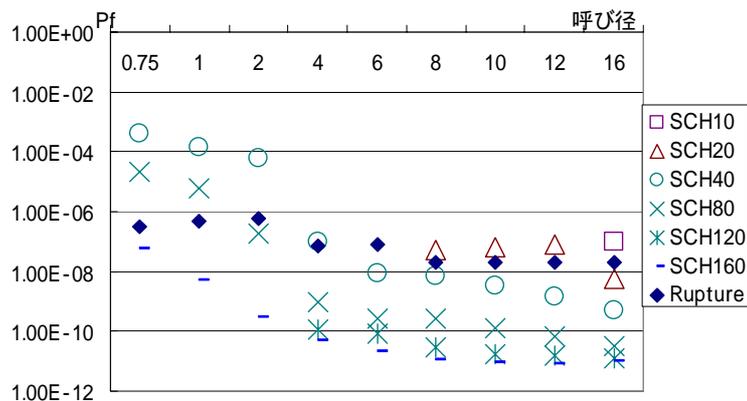
**Fig. 32 Failure Probability of Piping (Stress: A,Material:304,Stress level:High)**



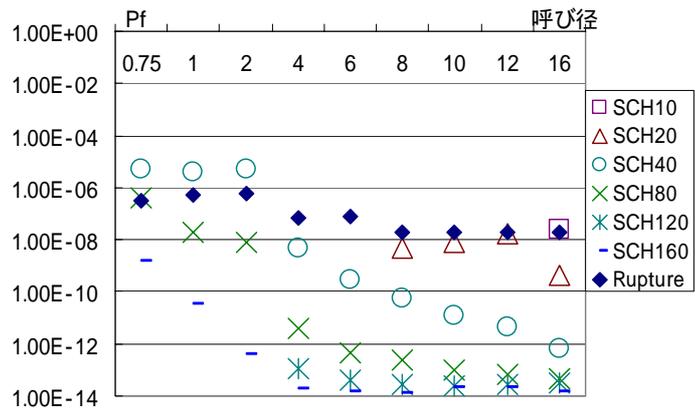
**Fig. 33 Failure Probability of Piping (Stress: A,Material:Carbon,Stress level:Low)**



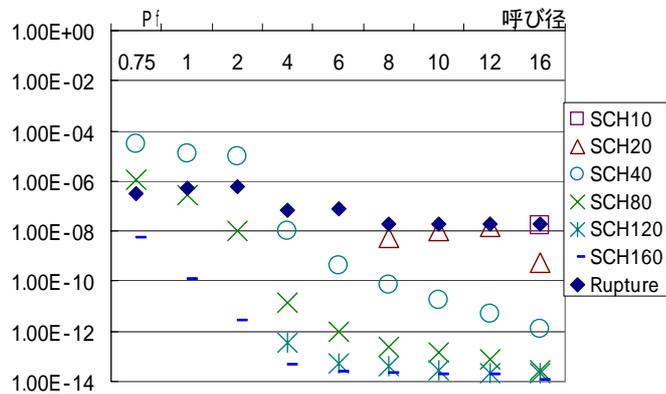
**Fig. 34 Failure Probability of Piping (Stress: A,Material:Carbon,Stress level:Medium)**



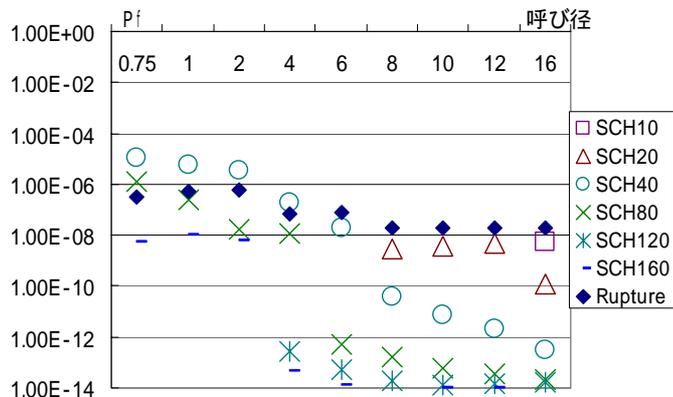
**Fig. 35 Failure Probability of Piping (Stress: A,Material:Carbon,Stress level:High)**



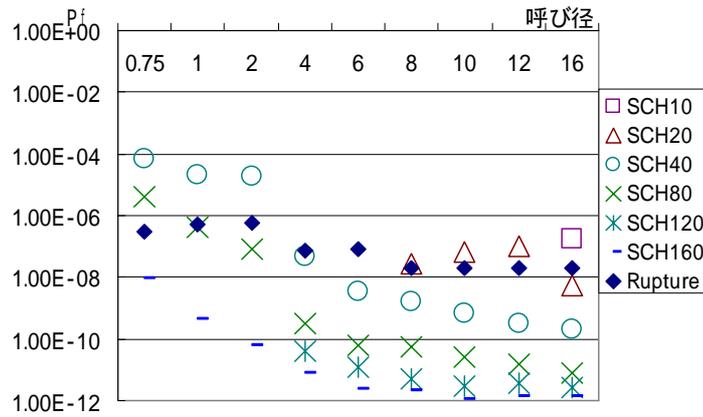
**Fig. 36 Failure Probability of Piping (Stress: B ,Material:304,Stress level:Low)**



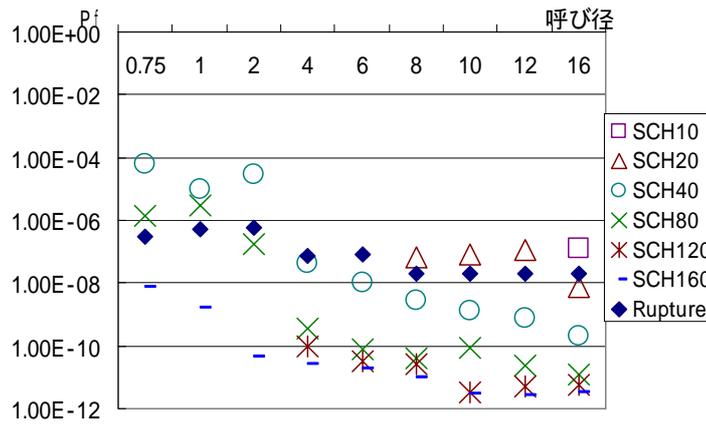
**Fig. 37 Failure Probability of Piping (Stress: B ,Material:304,Stress level:Medium)**



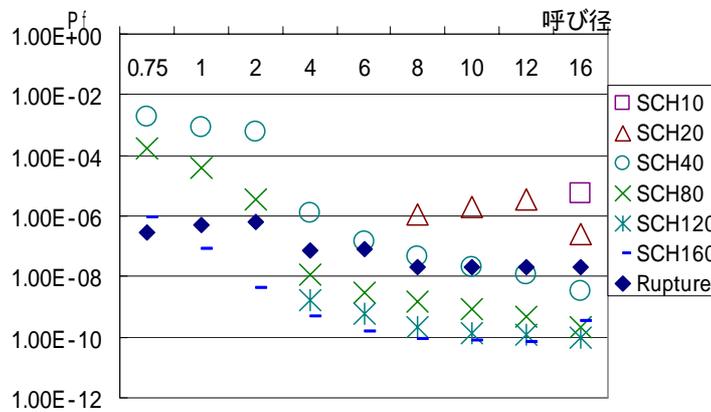
**Fig. 38 Failure Probability of Piping (Stress: B ,Material:304,Stress level:High)**



**Fig. 39 Failure Probability of Piping (Stress: B ,Material:Carbon,Stress level:Low)**



**Fig. 40 Failure Probability of Piping (Stress: B ,Material:Carbon,Stress level:Medium)**



**Fig. 41 Failure Probability of Piping (Stress: B ,Material:Carbon,Stress level:High)**

level:High)

Fig.30 ~ 41 より確認されたことを以下に示す。

材料が炭素鋼の場合，定常応力のみ比べ，定常応力に応力一様・熱応力過渡変化を考慮した場合は，破損確率が大きくなった。

応力レベル Low, Medium, High の差異では，破損確率がそれぞれ約 10 倍ごとに高くなった。しかし，呼び径・呼び厚さ間の関係性（グラフの形）は，ほとんど変わらなかった。

材料パラメータの差異（304 と炭素鋼）による違いはほとんどなかった。この結果，どちらの材料においても破損確率はほぼ同じである。

配管の呼び径ごとの板厚種数は，4, 8 インチで増加している，一方，GFF の値も，4, 8 インチで大きく変化している。

それぞれの呼び径における，最薄の呼び厚さの破損確率と，GFF の Rupture 値が近い値となっている。これにより，GFF の Rupture 値は，各呼び径ごとの保守的な厚さにおける破損確率を表していると受け取れる。しかし，呼び径が 2 以下の場合は，保守側を満足し切れていない。

き裂による破損ではなく，応力腐食割れ(SCC)の破損確率評価もWinPraiseで行なうことができる。しかし，SCCはき裂と異なり，突発的と考えられるため，WinPraiseで解析を行なうと，数年確率が 0 となり，10 年後以降に  $10^{-1}$  オーダーの確率が算出される。これは，GFFの値とは，あまりに異なる。

## 結言

API581 における一般破損確率(GFF)の配管 Rupture が表す値は，WinPraise による解析の結果，以下の通りとみなす事ができる。

- ・ 損傷モードは，SCC ではなく，き裂による破損を考慮している。
- ・ 材料は，オーステナイト，フェライトどちらも考慮されている。
- ・ 配管の呼び径ごとの，最薄である呼び厚さの破損確率，つまり最も保守的な破損確率を表している。

# あとかき

## 謝辞

本研究は、東京大学院工学系研究科 酒井信介教授のご指導のもとに進められました。酒井先生、そしてD2の岡島さんには、お忙しい中、様々なアドバイスを頂きました。本当にありがとうございました。また、(財)日本海事協会の皆様にも大変お世話になりました。特に、椎原氏、黒澤氏、岡本氏には、何度もお世話になりました。本当にありがとうございました。

泉先生、助手だった岩崎先生、助手の原先生、大変お世話になりました。ありがとうございました。技官の浅川さん、秘書の入口さん、大変お世話になりました。ありがとうございました。博士の廬さん、熊谷さん、栗本さん、博士だった高梨さん、大変お世話になりました。ありがとうございました。カナダからいらしたハダッド先生、大変お世話になりました。ありがとうございました。2学年上だった村井さん、山口さん、渡辺さん、大変お世話になりました。ありがとうございました。1学年上だった小林さん、笹尾さん、大変お世話になりました。ありがとうございました。ほぼ同学年だったハサン、本田さん、大変お世話になりました。ありがとうございました。1学年下だった武君、久保寺君、川口君、前君、杉本君、丸田君、柴田君、清水君、岡田君、大変お世話になりました。ありがとうございました。2学年下だった大石君、中村君、藤本君、程島君、牧野君、松本君、大変お世話になりました。ありがとうございました。あと、リョーマさん、佐野さんも。そして、同学年だった門脇君、好子さん、小玉君、松下君、ありがとう。いつも一緒だった木村君、新国君、安田君、中嶋君、大場君、ありがとう。書き忘れた人、ごめんなさい。

## 参考文献

- [1] 椎原裕美, 黒澤忠彦, 岡本和行, “ リスク評価に基づく検査の船用主機関への適用 ” 平成 18 年度 ClassNK 研究発表会講演集, pp.53-69, (財)日本海事協会
- [2] 木原重光, 富士彰夫 『RBI/RBM 入門』, 日本プラントメンテナンス協会, 2002
- [3] API Publication 581, Risk-Based Inspection Base Resource Document (2000)
- [4] 渡辺洋, 『ベイズ統計学入門』, 福村出版, 1999
- [5] B.P. Carlin and T.A. Louis, “ Bayes And Empirical Bayes Methods For Data Analysis Second edition ”, Chapman and Hall/CRC(2000)
- [6] J.M. Bernardo and A.F.M. Smith, “ Bayesian Theory ”, John Wiley and sons, Ltd
- [7] 岡島智史, 東京大学修士論文(2005)
- [8] 岡村弘之, 板垣浩, 『強度の統計的取り扱い』, 培風館, 1979
- [9] D. Sun, “ A note on Noninformative Priors for Weibull Distributions ”, J. - Statical Planning and Inference, 61, 319, 1997
- [10] WinPraise 41E33-002RP01 Revision: C, D.O. Harris, D. Dedhia, 1998
- [11] 社団法人, 日本高圧力技術協会, 『欠陥評価に関わる破壊力学評価手法の向上に関する研究(フェーズ2)』平成 13 年 3 月

以上

p.1 ~ p.75 完

修士論文

平成 19 年 2 月 9 日提出

56205 山崎 康平