

卒業論文

ロケット地上設備の  
リスクベースメンテナンス評価

p.1~p.81 完

平成23年2月4日提出  
指導教員 酒井 信介 教授  
90223 桐谷聡一

# 目次

• 第1章 序論	7
1.1 研究背景	8
1.1.1 設備保全の事情	8
1.1.2 リスクベースメンテナンス(RBM :Risk-Based Maintenance)	8
1.1.3 RBM 導入に関する問題点	9
1.1.4 先行研究[6][7]	10
1.2 研究目的	10
1.3 本論文の構成	11
• 第2章 故障率算出に関する理論	12
2.1 故障率	13
2.1.1 信頼度と故障率	13
2.1.2 故障率のモデル化	14
2.1.3 故障率の算出方法	14
2.2 不完全データを考慮した故障率の算出	17
2.2.1 不完全データ[8]とは	17
2.2.2 平均順位法	17
2.3 ベイズの定理	19
2.4 ベイズ推定の手順	20
2.4.1 事前分布の設定	20
2.4.2 ベイズの定理による更新	20
2.4.3 事後分布の評価	21
• 第3章 シミュレーションによる解析	22
3.1 緒言	23
3.2 故障時間の発生方法	23
3.3 平均順位法の検討	23
3.3.1 観測中断データの発生方法	23
3.3.2 シミュレーション条件	24
3.3.3 解析結果	24
3.4 ベイズ推定の検討	30
3.4.1 解析の目的	30
3.4.2 解析手法	30
3.4.3 シミュレーション条件	32
3.4.4 解析結果	33

3.5 結言 .....	36
• 第4章 故障率の解析            38	
4.1 緒言 .....	39
4.2 評価の対象および故障の定義.....	39
4.3 故障率のモデル化 .....	43
4.4 事前分布の設定方法.....	43
4.4.1 平均値の設定 .....	44
4.4.2 標準偏差の設定 .....	47
4.5 解析結果 .....	47
4.6 結言 .....	50
• 第5章 リスクの評価            51	
5.1 緒言 .....	52
5.2 影響度の定量的評価手法.....	52
5.2.1 影響度基本点.....	53
5.2.2 補正係数.....	56
5.2.3 総合評価.....	57
5.3 影響度評価の結果 .....	57
5.4 リスクマトリクスを作成.....	59
5.5 リスク評価の結果 .....	60
5.6 結言 .....	63
• 第6章 結論                    64	
• 付録A 影響度評価の結果    66	
• 付録B リスク評価の結果    75	

# 表目次

• Table 2-1	Failure data1	16
• Table 3-1	Simulation condition 1	24
• Table 3-2	Result of simulation 1	25
• Table 3-3	Abs data	29
• Table 3-4	Simulation condition 2	32
• Table 3-5	Parameter condition	33
• Table 3-6	Abs	33
• Table 3-7	Parameter condition	34
• Table 3-8	Abs	34
• Table 3-9	Parameter condition	35
• Table 3-10	Abs	35
• Table 3-11	Parameter condition	36
• Table 3-12	Abs	36
• Table 4-1	Elements and their failure modes	42
• Table 4-2	The Number of connecting points	43
• Table 4-3	Data of Failure and Inspection for Safety Valve	45
• Table 4-3	Data of Failure and Inspection for Safety Valve	45
• Table 4-4	Method of extraction	45
• Table 4-5	Extraction results	46
• Table 4-6	Failure rate of some elements	49
• Table 5-1	Point Ranking	53
• Table 5-2	Revising coefficients	56
• Table 5-3	Consequence of each Element	58
• Table 5-4	Ranking Pattern	60
• Table 5-5	Risk rank	62
• Table A-1	Consequences of all elements	67
• Table B-1	Failure rate and Risk rank of all elements	76

# 目次

• Fig. 1-1	Risk Matrix	9
• Fig. 2-1	Weibull probability paper	16
• Fig. 2-2	Failure data2	17
• Fig. 2-3	Failure data3	18
• Fig. 2-4	The Bayes' theorem	19
• Fig. 2-5	Process of Bayes'	20
• Fig. 2-6	100×(1-k)% credible interval	21
• Fig. 3-1	Failure rate 1 (n=10)	27
• Fig. 3-2	Failure rate 2 (n=20)	27
• Fig. 3-3	Failure rate 3 (n=30)	28
• Fig. 3-4	Failure rate 4 (n=100)	28
• Fig. 3-5	Flowchart	30
• Fig. 3-6	Failure rate( $\alpha=2, \beta=4$ )	33
• Fig. 3-8	Failure rate( $\alpha=2.4, \beta=4$ )	34
• Fig. 3-8	Failure rate( $\alpha=3.2, \beta=5$ )	35
• Fig. 3-9	Failure rate( $\alpha=4.6, \beta=6$ )	36
• Fig. 4-1	HGS He supplying system	41
• Fig. 4-2	Weibull probability paper	46
• Fig. 4-3	1998 prior distribution of HRV-3328	47
• Fig. 4-4	2007 posterior distribution of HRV-3328	48
• Fig. 4-5	Failure rate of HRV-3328	48
• Fig. 5-1	Working Elements in supplying Gas He to tank "TK-3004" by using Compressor "C-3004"	54
• Fig. 5-2	Working Elements in supplying Gas He to tank "TK-3005" by using Compressor "C-3004"	54
• Fig. 5-3	Working Elements in supplying Gas He to VBA from tank "TK-3004"	55
• Fig. 5-4	Working Elements in supplying Gas He to VBA from tank "TK-3005"	55
• Fig. 5-5	Risk Matrix	59
• Fig. 5-6	Risk Matrix of Pattern 1	60
• Fig. 5-7	Risk Matrix of Pattern 2	61
• Fig. 5-8	Risk Matrix of Pattern 3	61



# 第1章 序論

本章では，研究背景を概説し，本研究の目的を述べる．

## 1.1 研究背景

### 1.1.1 設備保全の事情

現在の日本の産業において、プラント設備の新設は頭打ちの状態となり、老朽化した設備が様々なメンテナンスや延命策を施され今日も稼動している場合が多い[1]。これは、宇宙ロケット地上設備に関しても類似している。現在、日本の宇宙ロケット打ち上げ施設としては種子島宇宙センター(TNSC)があるが、1969年の開設以来40年以上使用されてきた。次期主力ロケット H-2B の発射設備は、先々代の主力ロケット H-2 の時より用いられてきたものであり、20年近く使用されている。このように、宇宙ロケット地上設備は、老朽化していく設備を引き続きメンテナンスや延命策を施し稼動を続けていく必要がある。

宇宙ロケットの打ち上げに際しては信頼性が最優先事項とされており、地上設備においても不具合がないように確実なメンテナンスを行いながら稼動していく必要がある。しかしながら、商業用ロケット産業においては、国際的な競争力も維持しなければならないという要求もあり、あらゆることに対して可能な限りのコスト削減を求められる状況が生まれている。設備維持のためのコストも当然削減を迫られている。このように相反する要求のあるなかで、メンテナンスのあり方には必然的に科学的合理性と経済性の両立が求められるようになっていく。

### 1.1.2 リスクベースメンテナンス(RBM :Risk-Based Maintenance)

メンテナンスを合理化し、コストを低減するための手法としてリスクベースメンテナンス(RBM : Risk-Based Maintenance)が注目を集めている[2][3][4]。

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。

$$\text{リスク} = \text{「故障率(故障の起こりやすさ)」} \times \text{「影響度(故障時の被害の大きさ)」} \quad (1.1)$$

また、リスクを視覚的にわかりやすくまとめたものとして、Fig. 1-1 に示すようなリスクマトリクスがある。リスクマトリクスによって、機器ごとのリスクの高低やリスクの種類が、マトリクス上の位置としてわかりやすく表現される。

リスクマトリクスにおいて右上に位置するリスクの高い機器に対して検査を集中し、リスクを軽減する行為を行うことで、メンテナンスが効率的に行える。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。

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。

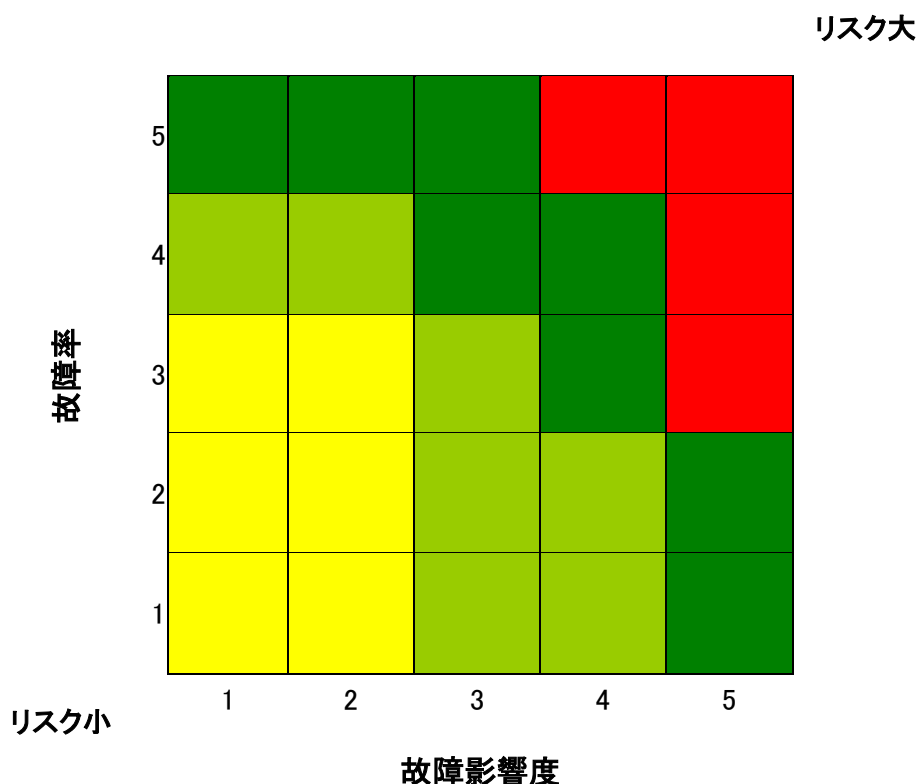


Fig. 1-1 Risk Matrix

### 1.1.3 RBM 導入に関する問題点

施設に対して RBM を行う際には、機器ごとに故障率を求める必要がある。RBM に利用可能である故障率データとしては、米国石油協会の API581[5]に記載されたものが広く認知されている。しかし、API581 の故障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、今回のような宇宙ロケット地上設備に単純に適用することには疑問がある。故障率の評価においては、設備の実情に即したデータを用いることが必要であるが、日本の施設ではこれまでリスク評価への適用を意識した多様な機器に対する故障率及び寿命分布データの系統的な整備が行われてこなかったため

に、故障率評価に資するような情報が十分に得られないという問題が存在する。このため、RBM の導入にあたっては、対象となる設備の過去の定期検査データ等から故障率の評価を行う必要がある。特に、対象を一つの設備とした場合、得られる過去のデータは少数になってしまう。従って、宇宙ロケット地上設備に RBM を導入するにあたっては、その少ないデータから、故障率を評価する必要がある。

#### 1.1.4 先行研究[6][7]

2008 年度の篠田らの先行研究と 2009 年度の滝川らの先行研究において

- ・ 故障率を指数分布もしくはワイブル分布としてモデル化し、ベイズ推定の手法を用いて検査データを基に更新することで、個々の機器に対する故障率を算出した。
- ・ 算出した故障率と独立行政法人宇宙航空研究開発機構(JAXA)に作成を依頼した破損影響度を組み合わせることにより、リスクの高い機器を抽出することができた。しかしながら、以下のような問題点があった
- ・ ベイズ推定に必要な故障率の事前分布のパラメータ推定を、不完全データを考慮しない方法で行ったため、解析結果に疑問があった。
- ・ 故障率算出において、どの程度の検査データが必要で、どのくらいの検査間隔・期間であればよいかということがわからなかった。

## 1.2 研究目的

前節で述べた背景を踏まえ、以下の 3 点を本研究の目的とする。

- ・ 対象機器を先行研究と同様の JAXA 種子島宇宙センター高圧ガス貯蔵供給所(HGS)の GHe 供給設備とし、不完全データを考慮した方法で機器の損傷確率を算出する。
- ・ 解析結果にどの程度信頼が置けるかをシミュレーションによって検討する。
- ・ 故障率の解析を行う際にこれまで疑問であったこと（どの程度データ数が必要であるか・検査間隔と期間はどのくらいであればよいか）をシミュレーションによって明らかにし、より正確な故障率の算出のために、今後に履歴管理をすべきデータ項目の検討を行う。

## 1.3 本論文の構成

本論文の構成は以下の通りである.

第1章「序論」では, 研究背景を概説し, 本研究の目的を述べる.

第2章「故障率算出に関する理論」では, 故障率を算出するための基礎理論として, 信頼性工学の理論と, ベイズ統計学の手法を概説する.

第3章「シミュレーションによる解析」では, シミュレーションによって, 故障率解析の検討を行う.

第4章「故障率の解析」では, 第2章で示した理論と第3章の結果を用いて, 実在の各機器の故障率の算出を行う.

第5章「リスクの評価」では, 第4章で求めた故障率を, 対象範囲について行った影響度の評価と合わせることで, リスクの評価を行い, その結果を示す.

第6章「結論」では, 本論文によって得られた結論を示す.

## 第 2 章 故障率算出に関する理論

本章では，故障率を算出するための基礎理論として，信頼性工学の理論と，ベイズ統計学の手法を概説する．

## 2.1 故障率

### 2.1.1 信頼度と故障率

機器を使用し始めてからある時間 $t$ が経過したときに、その機器に故障が起こらず、使用を続けられる状態にある確率 $R(t)$ を機器の信頼度と呼び、時間 $t$ の関数として表される[8]。一方、ある時間 $t$ までに故障が起こり、機器が使用できなくなる確率を $F(t)$ と表すと、以下の関係が成り立つ。

$$R(t) = 1 - F(t) \quad (2.1)$$

このとき、 $F(t)$ は機器の寿命の累積分布関数を意味する。一方、機器の寿命の密度分布関数を $f(t)$ とすると、

$$F(t) \equiv \int_0^t f(t)dt \quad (2.2)$$

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = -\frac{dR(t)}{dt} \quad (2.3)$$

という関係が成り立つ。

故障率(failure rate)は、信頼性工学で最も基本的な概念の一つである[9]。JIS では故障率を「ある時点まで動作してきたアイテムが引き続く単位時間内に故障をおこす割合」と定義している。ある時間を $t$ としてを式に表すと、

$$\text{(時間}t\text{における)故障率} = \frac{\text{時間}t\text{の瞬間に故障する機器の数}}{\text{時間}t\text{まで故障していない機器の数}} \quad (2.4)$$

時間 $t$ までに故障していない機器の数とは、言い換えれば時間 $t$ において使用している機器の数である。

$N$  個の機器を同時に使用を開始して、時間 $t$ が経過したときの故障率 $\lambda(t)$ を考える。時間 $t$ まで故障していない機器の個数は $N \cdot R(t)$ であり、時間 $t$ からの微小時間 $dt$ の間に故障する機器の個数は $N \cdot f(t)dt$ となる。従って、引き続く $dt$ の期間に故障する確率 $\lambda(t)$ は、

$$\lambda(t)dt = \frac{N \cdot f(t)dt}{N \cdot R(t)} \quad (2.5)$$

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = -\frac{dR(t)/dt}{R(t)} \quad (2.6)$$

となる.

### 2.1.2 故障率のモデル化

今研究では故障時間は、ワイブル分布に従うとして扱う.

ワイブル分布とは、1939年に Weibull によって材料の破壊強度の分布形として提案されたものであり、機械・構造系の分野では、それ以来広く用いられている[9]. 摩耗により故障率が増加していく系に適している.

ワイブル分布の信頼度関数は、

$$R(t) = \exp\left(-\left(\frac{t}{\beta}\right)^\alpha\right) \quad (2.7)$$

となる.

このとき故障率 $\lambda(t)$ は、

$$\lambda(t) = -\frac{dR(t)/dt}{R(t)} = \frac{\alpha t^{\alpha-1}}{\beta^\alpha} \quad (2.8)$$

となる.

$\alpha$  を形状母数 (shape parameter),  $\beta$  を尺度母数 (scale parameter) と呼ぶ.

### 2.1.3 故障率の算出方法

前節で定義した故障率の算出方法について解説する. 故障率の算出には色々な方法があるが、取り扱いの簡単さと不完全データの取り扱いやすさを考慮し、今研究では確率紙を使った方法を採用する.

ワイブル分布の信頼度関数は、

$$R(t) = 1 - F(t) = \exp\left(-\left(\frac{t}{\beta}\right)^\alpha\right) \quad (2.9)$$

であったが、両辺の対数をとると、

$$\ln \frac{1}{1-F(t)} = \left(\frac{t}{\beta}\right)^\alpha \quad (2.10)$$

となり，さらにもう一度対数をとると，

$$\ln \ln \frac{1}{1-F(t)} = \alpha(\ln t - \ln \beta) \quad (2.11)$$

となる．ここで  $Y = \ln \ln 1/\{1 - F(t)\}$ ,  $X = \ln t$  とおけば，

$$Y = \alpha(X - \ln \beta) \quad (2.12)$$

となり，縦軸に  $\ln \ln 1/\{1 - F(t)\}$ ，横軸に  $\ln t$  をとれば，ワイブル分布に従う場合には直線が得られることとなる．実際に利用されているワイブル確率紙の例を fig2.1 に示した．その直線の傾きから  $\alpha$  が分かり，切片から  $\ln \beta$  が分かる．

ここで， $F(t)$  は  $r$  を故障順位として以下のように設定する．

$$F(t) = \frac{r}{n+1} \quad (2.13)$$

この方法は順序統計量の平均値を利用したもので，以下のように導出される [8]．

$n$  個のデータを小さい順に並べたときの  $r$  番目のデータの確率密度関数  $f_r(t)$  は，現確率密度関数を  $f(t)$ ，累積分布関数を  $F(t)$  とすると，

$$f_r(t) = \frac{n!}{(r-1)!(n-r)!} \{F(t)\}^{r-1} \{1-F(t)\}^{n-r} f(t) \quad (2.14)$$

と表すことができる．

ここで， $r$  番目の故障データに対応する  $F$  の値の平均値を求めると，

$$\begin{aligned} & \int_0^\infty \frac{n!}{(r-1)!(n-r)!} \{F(t)\}^{r-1} \{1-F(t)\}^{n-r} f(t) dt \\ &= \frac{n!}{(r-1)!(n-r)!} \int_0^1 \{F(t)\}^r \{1-F(t)\}^{n-r} dF(t) \\ &= \frac{n!}{(r-1)!(n-r)!} \frac{r!(n-r)!}{(n+1)!} = \frac{r}{n+1} \end{aligned} \quad (2.15)$$

例. 以下の表のような故障データが与えられたとして, ワイブルパラメータ ( $\alpha \cdot \beta$ ) の推定を行う. ( $n=9$ )

Table 2-1 Failure data1

r	故障時間	F(t)
1	1.07	0.1
2	1.80	0.2
3	3.12	0.3
4	4.16	0.4
5	4.81	0.5
6	6.59	0.6
7	8.00	0.7
8	10.65	0.8
9	16.10	0.9

fig2-2 の直線の傾きから  $\alpha = 1.2$ , 切片の値から  $\ln \beta = 2.2$  とわかり,  $\beta = \exp(2.2) = 9.03$  となる.

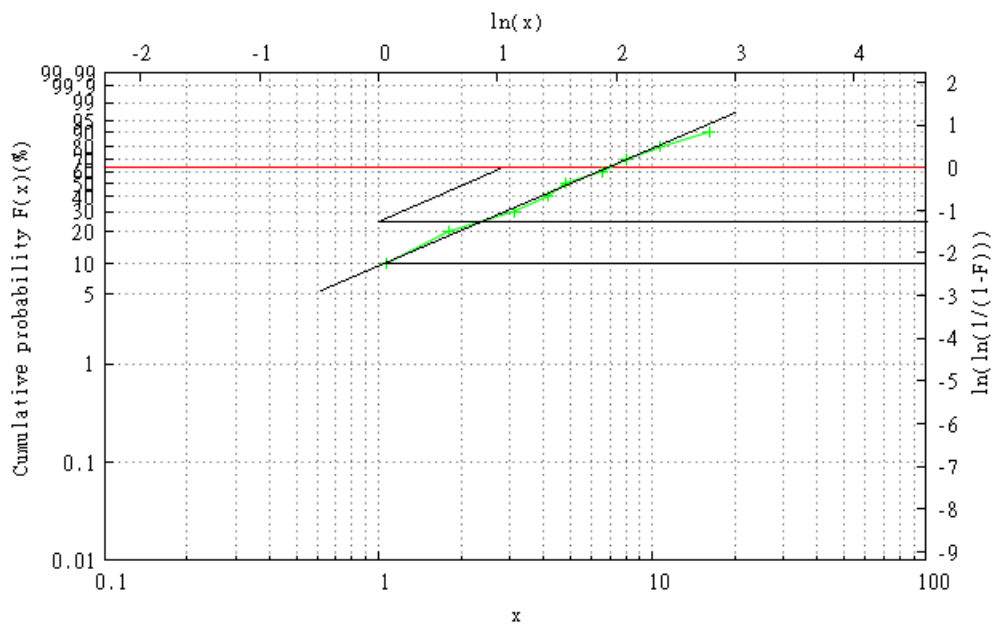


Fig. 2-1 Weibull probability paper



## 2.2 不完全データを考慮した故障率の算出

### 2.2.1 不完全データ[8]とは

以下のようなデータを不完全データという。

- ・ 故障モードが分からないようなデータ
- ・ 使用開始時期が分からないようなデータ
- ・ 故障時間だけでなく、ある時間使用して故障しなかったというデータ（観測中断データ）を含むようなデータ

これらのデータをどのようにして故障率解析に役立てていくかが、データ数の少ない解析においては重要である。

### 2.2.2 平均順位法

平均順位法（「ジョンソンの方法」とも言う）とは観測中断データをうまく取り扱い、故障率解析に役立てる方法の一つである。以下に平均順位法の概要を示す。

Fig2-3 のようなデータが得られたとする。1つ目のデータは1番目の故障データであることに疑いはない。しかしながら、3つ目以降のデータは2番目の観測中断データを考慮に入れるか入れないかで、故障順位が変わってくる。ここで、3つ目のサンプルに着目する。もし2番目のサンプルがこのサンプルの故障より前に故障すれば、3つ目のサンプルの故障順位は3となり、それより後に故障すれば故障順位は2となる。したがって、このサンプルの故障順位は2もしくは3ということになる。

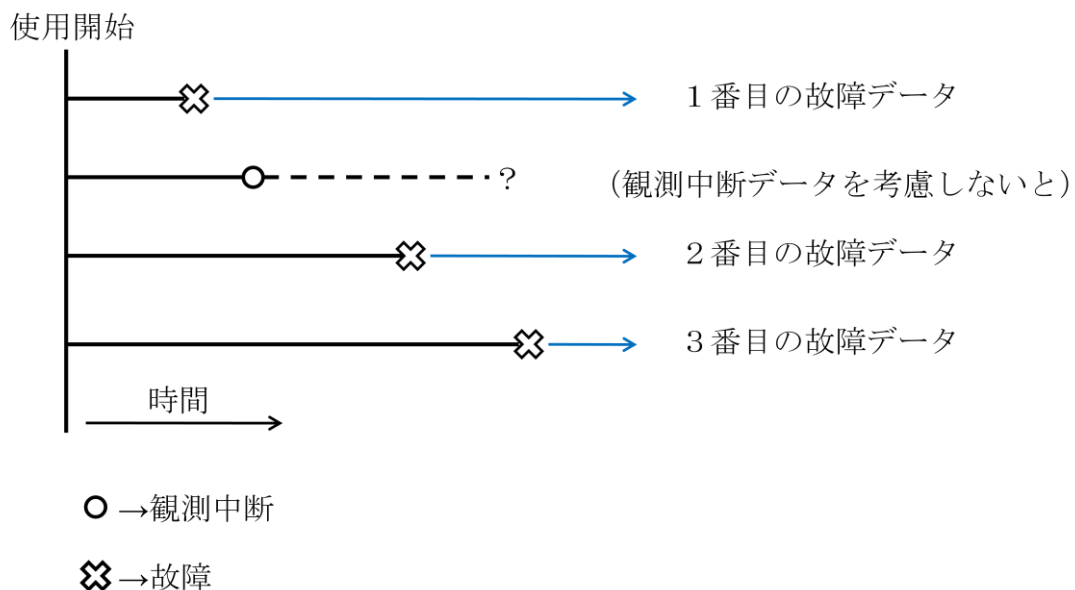


Fig. 2-2 Failure data2

そこで、次のような式を使い故障順位に補正をかける。  $i$  番目の故障時間  $t_i$  に対し、次の順位数  $j$  を計算する。

$$j = j_0 + \frac{(n+1) - j_0}{(n+1) - (i-1)} \quad (2.16)$$

ここで、 $j_0$  は  $t_i$  のすぐ前の故障順位に対する  $j$  の値である。  $i = 1$  のときは  $j_0 = 0$  とする。 Fig2-3 のデータに式(2.16)を適用した様子を Fig2-4 に示す。

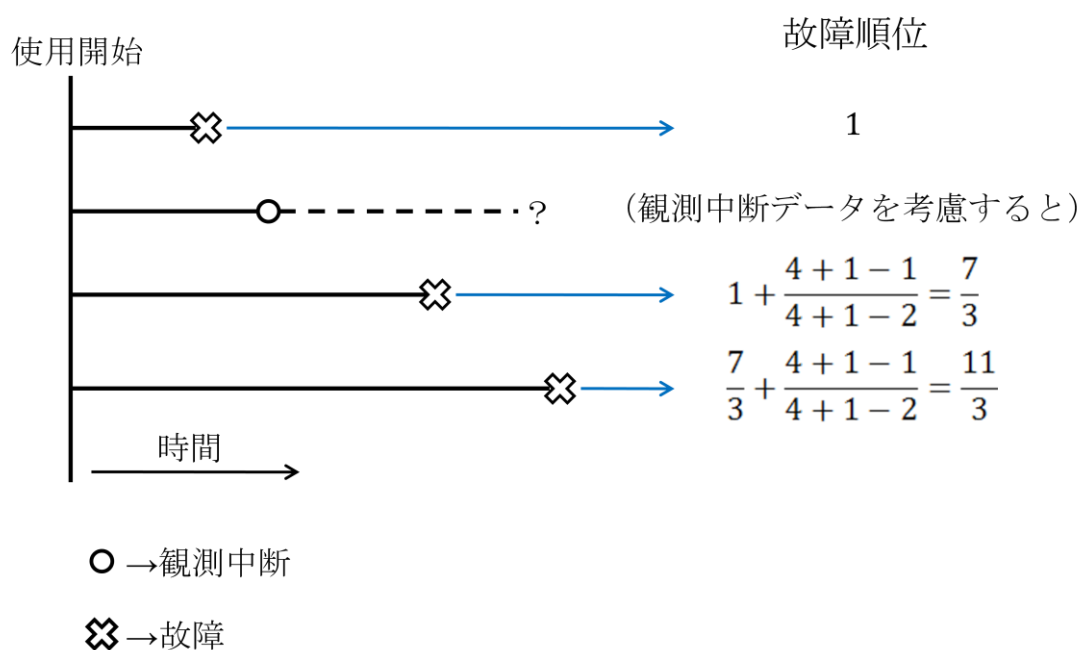


Fig. 2-3 Failure data3

式(2.16)は以下のようにして導かれる。今、観測中断データのない  $n$  個の故障データが得られたとすると、それらの故障順位は故障時間の短い方から  $1, 2, 3, \dots, n$  となる。このことを別の視点から考えると、 $n$  個の番号を  $0 \sim n+1$  の間に等間隔に挿入したと言える。観測中断データを得た時もこの基本的な現象を適用すると、観測中断データ直前の故障データの順位と  $n+1$  との間に等間隔に順位を挿入すると考えることができる [10].

## 2.3 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．

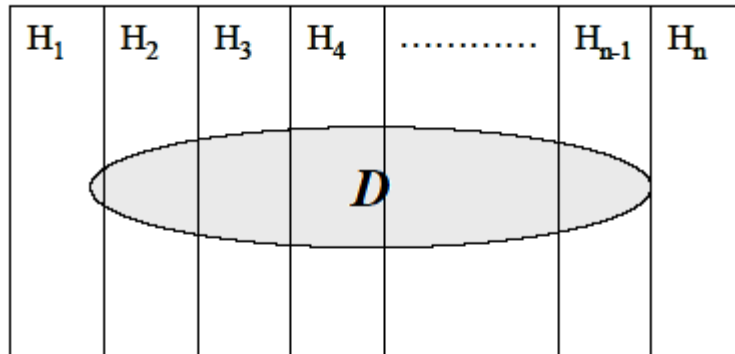


Fig. 2-4 The Bayes' theorem

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(2.17)で求められる．

$$P(D \cap H_i) = P(H_i|D)P(D) = P(D|H_i)P(H_i) \quad (2.17)$$

これを変形することで，ベイズの定理が得られる．

$$P(H_i|D) = \frac{P(D|H_i)P(H_i)}{P(D)} = \frac{P(D|H_i)P(H_i)}{\sum_{i=1}^n P(D|H_i)P(H_i)} \quad (2.18)$$

仮説が連続的である場合には，ベイズの定理は式(2.19)となる．

$$f(\theta|D) = \frac{P(D|\theta)P(\theta)}{\int P(D|\theta)f(\theta)d\theta} \quad (2.19)$$

$\theta$ 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．

## 2.4 ベイズ推定の手順

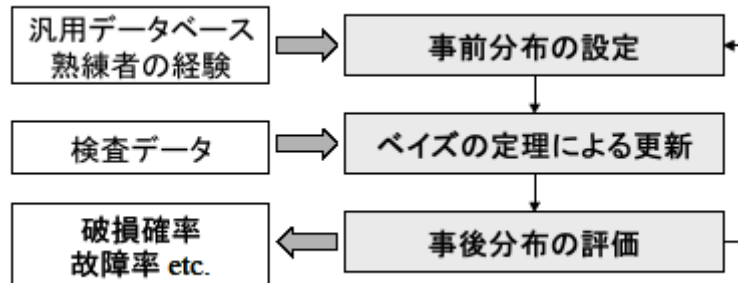


Fig. 2-5 Process of Bayes'

Fig. 2-6 はベイズ推定の手順を示したものである。以下、各手順について順に解説する。

### 2.4.1 事前分布の設定

ベイズ推定では、初回の推定前に推定する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。この分布は、主観的に決めることなので画一的に決まるものではない。客観的手続きで決めることではないので、確率というよりは確信度と呼ぶ方が適当である[11]。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、通常の数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。

### 2.4.2 ベイズの定理による更新

- ・
- ・ 式(2.19)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 $\theta$ がある値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。

### 2.4.3 事後分布の評価

事後分布をもとに，母数を推定する．母数の点推定を行いたい場合には，事後分布の確率密度が最も大きい点(最頻値)を採用することが考えられる．母数の区間推定を行いたい場合には，事後分布から確信区間を求める． $100 \times (1-k)\%$  確信区間は，Fig. 2-7 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．

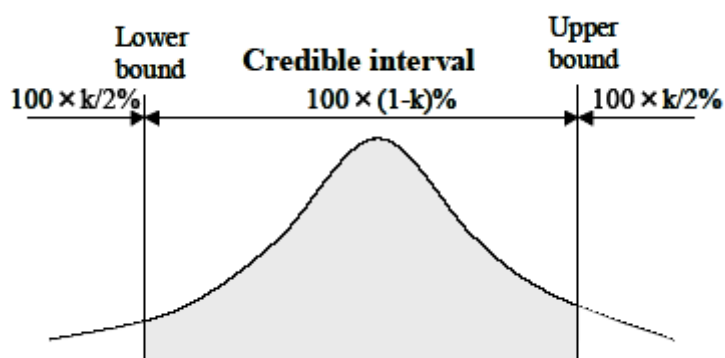


Fig. 2-6  $100 \times (1-k)\%$  credible interval

## 第3章 シミュレーションによる解析

## 3.1 緒言

本章では、平均順位法・ベイズ推定の故障率解析における有用性をシミュレーションにより検討する。本来ならば、実際の検査データに基づいて検証を行うのが正しいが、今回は十分な量のデータが得られなかったため、シミュレーションによって広範囲の検討を行う。

## 3.2 故障時間の発生方法

シミュレーションにおける故障時間の発生方法を解説する。  
ワイブル分布の信頼度関数 $R(t)$ は以下のようなになる。

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

両辺の対数をとって、変形すると、

$$t = \beta(-\ln R(t))^{\frac{1}{\alpha}} \quad (3.2)$$

となる。 $R(t)$ は0から1の値をとるので、 $R(t)$ の部分に0から1の一様乱数を代入すれば、所望の $\alpha \cdot \beta$ のワイブル分布に対応する故障時間を得ることができる。今回、乱数の発生にはメルセンヌ・ツイスタ[12]を使用した。

## 3.3 平均順位法の検討

### 3.3.1 観測中断データの発生方法

平均順位法に使用する観測中断データの発生方法を解説する。  
式(3.2)によって得られた故障時間に0から1の一様乱数をかけることによって、観測中断データを発生させた。この乱数の発生にもメルセンヌ・ツイスタを使用した。

### 3.3.2 シミュレーション条件

以下のような条件でシミュレーションを行った。

Table 3-1 Simulation condition 1

$\alpha$	1.0, 1.2, ..., 3.0
$\beta$	1, 2, ..., 10
故障データ数	10, 20, ..., 100, 200
観測中断データ数	故障データ数の 10%, 20%, ..., 50%
試行回数	2000 回

### 3.3.3 解析結果

実際に使用されている機器では、故障した瞬間に故障が分かるという事は少なく、検査をして故障が分かるとうことが少なくない。その場合、正確な故障時間は分からず、検査の間のどこかで故障したということが分かるのみである。今回、JAXA より入手したデータからも正確な故障時間は分からず、定期検査の間のどこかで故障したということが分かるのみである

現状に即した検討をするならば、検査間隔を考慮すべきであるが、ここでは検査間隔を考慮しない解析について述べる。この解析の主な目的は、以下の二つである。

- ・ 平均順位法の有用性の確認すること
- ・ 平均順位法による結果にどのような特性があるか確認すること

$\alpha = 2$ ,  $\beta = 4$  とした場合の解析結果の一部を Fig. 3-2 に掲載した。解析結果から読み取れることは、

- ・ 平均順位法を用いて、観測中断データを故障率解析に役立てるほど  $\alpha$  の値は真の値に近づいていく。特にデータ数が少ない時ほど、平均順位法は有用であると言える
- ・  $\beta$  の値は一部の例外を除いて中断データを考慮に入れるほど真の値から離れていく
- ・ 上記の二つの結果から考えて、 $\alpha$  の値は中断データを一番多く含んだ物、 $\beta$  の値は中断データを含んでいない物を採用すればいいということが分かる。この方法を「Improvement」と呼ぶことにする

ここには  $\alpha = 2$ ,  $\beta = 4$  とした場合しか掲載していないが、シミュレーションを行った全ての  $\alpha \cdot \beta$  について同じ傾向が認められた。



Table 3-2 Result of simulation 1

故障データ数	中断データ数	$\alpha$ 平均	$\alpha$ 分散	$\beta$ 平均	$\beta$ 分散
10	0	1.3081755	0.0046326	4.3587021	0.0111843
10	1	1.7758649	0.3214169	4.2674437	0.4979196
10	2	1.7584748	0.3020927	4.3084368	0.5134248
10	3	1.7907765	0.3238377	4.4027738	0.4882753
10	4	1.8051273	0.3388209	4.4920989	0.5289932
10	5	1.8571724	0.3717036	4.5250817	0.5219486
20	0	1.5356188	0.0001096	4.2240298	0.0002142
20	2	1.8123001	0.1780586	4.2076685	0.2456977
20	4	1.8343035	0.1613922	4.2673189	0.2346464
20	6	1.8511535	0.1714546	4.3415837	0.244867
20	8	1.8658019	0.1717384	4.4205223	0.2522069
20	10	1.892798	0.1685105	4.4751529	0.2481182
30	0	1.6464916	0.0004315	4.1603445	0.0003761
30	3	1.8319156	0.1203197	4.1614657	0.1647542
30	6	1.8656524	0.1183888	4.2500388	0.1709325
30	9	1.8747265	0.1221418	4.3321442	0.1583924
30	12	1.901513	0.1207231	4.3959889	0.1589125
30	15	1.90271	0.1191985	4.4704529	0.1758125
40	0	1.7037996	0.0001657	4.1293069	0.0001076
40	4	1.8670808	0.0911956	4.1637012	0.1194457
40	8	1.8922444	0.0939245	4.2361034	0.1216618
40	12	1.9202792	0.0962719	4.3100432	0.1137201
40	16	1.9187682	0.0890245	4.3755156	0.1306383
40	20	1.9309289	0.0945284	4.4562722	0.1205175
50	0	1.7339009	0.0006326	4.1218344	0.000083
50	5	1.8734025	0.0765666	4.1462218	0.1037991
50	10	1.9136284	0.0737665	4.2259118	0.1010757
50	15	1.9264239	0.0791112	4.2902312	0.0941758
50	20	1.9387393	0.0728632	4.354241	0.1039407
50	25	1.9643737	0.077103	4.4348939	0.0939147
60	0	1.7710322	0.000168	4.1053896	0.0002631
60	6	1.8938169	0.0619453	4.1422618	0.0806215
60	12	1.9125473	0.0621004	4.2076157	0.083927
60	18	1.9413454	0.0653673	4.2978271	0.0816135
60	24	1.9466905	0.0691678	4.3566675	0.0839896
60	30	1.9661984	0.0673265	4.4316316	0.0886875
70	0	1.7975404	0.0000434	4.0786664	0.0002132
70	7	1.9048291	0.0566589	4.1361347	0.0687394
70	14	1.9417665	0.0599733	4.2137784	0.0676407
70	21	1.9461332	0.0580719	4.2861792	0.0712757
70	28	1.9600594	0.0571055	4.3453852	0.0680659
70	35	1.9779575	0.0588395	4.423034	0.0704235

しかしながら、これだけでは $\alpha \cdot \beta$ を数値的に評価したのみで、故障率分布との適合性を評価したことにはならない。そこで、使用年数を横軸、故障率を縦軸にとったグラフを Fig.3-1~Fig3-4 に掲載した。故障データ数（ $n$ とする）はそれぞれ 10 個、20 個、30 個、100 個である。

Fig.3-1~Fig.3-4 から読み取れることは、

- すべての場合において、Improvement が真の故障率と一番よく合致している
- 故障データ数を増やすほど、真の故障率に近くなる
- 観測中断データを増やしても、必ずしも真の故障率に近くなるわけではない

以上のことは、シミュレーションを行ったほぼ全ての $\alpha \cdot \beta$ について同じ傾向が認められた。シミュレーションにより、広範囲な検討を行うことができた。

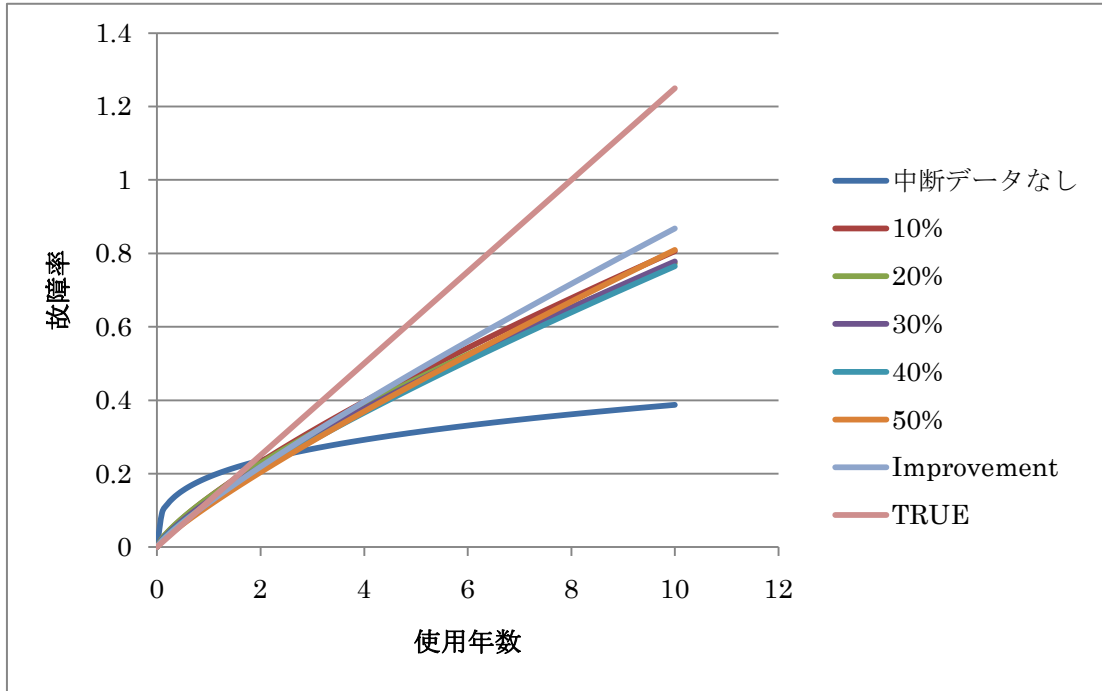


Fig. 3-1 Failure rate 1 (n=10)

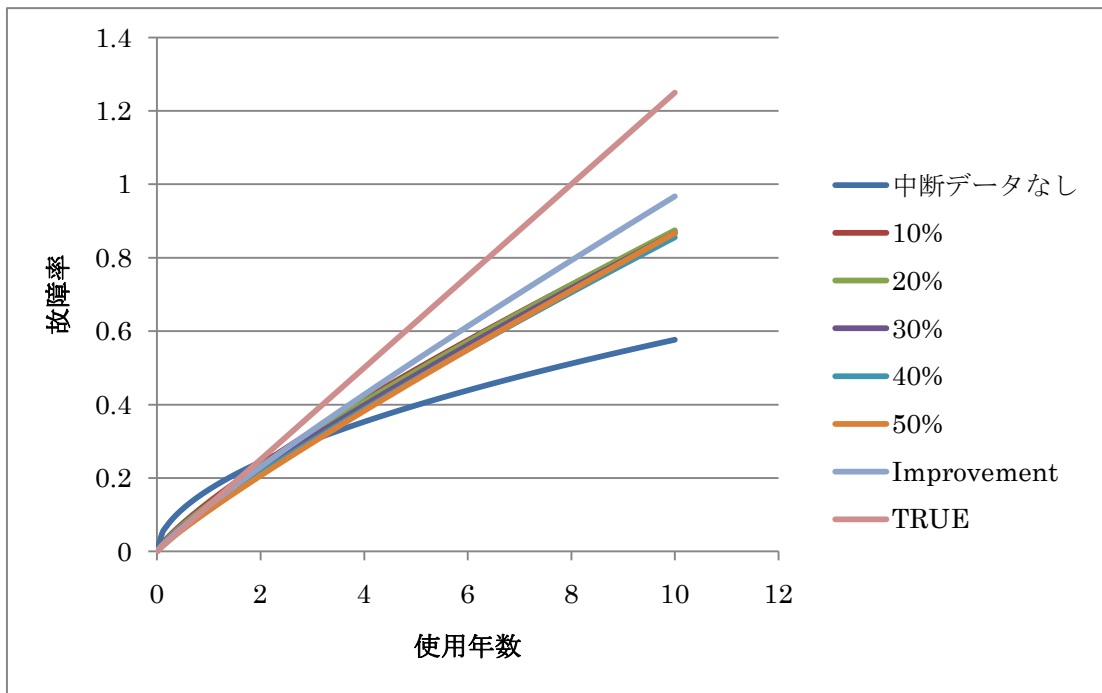


Fig. 3-2 Failure rate 2 (n=20)

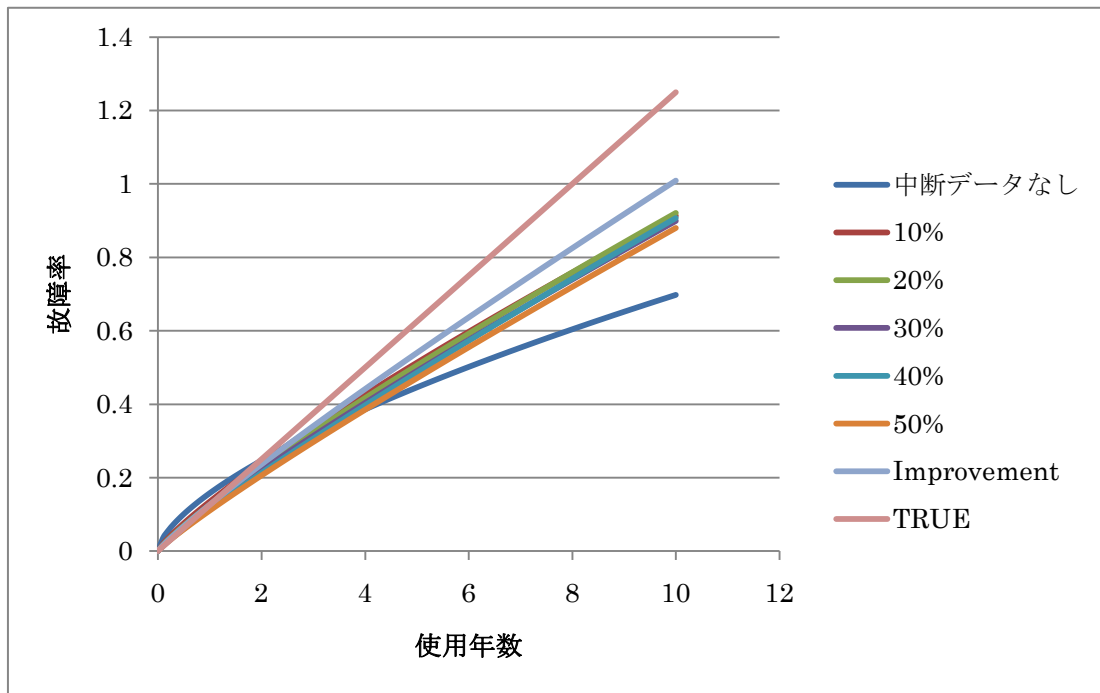


Fig. 3-3 Failure rate 3 (n=30)

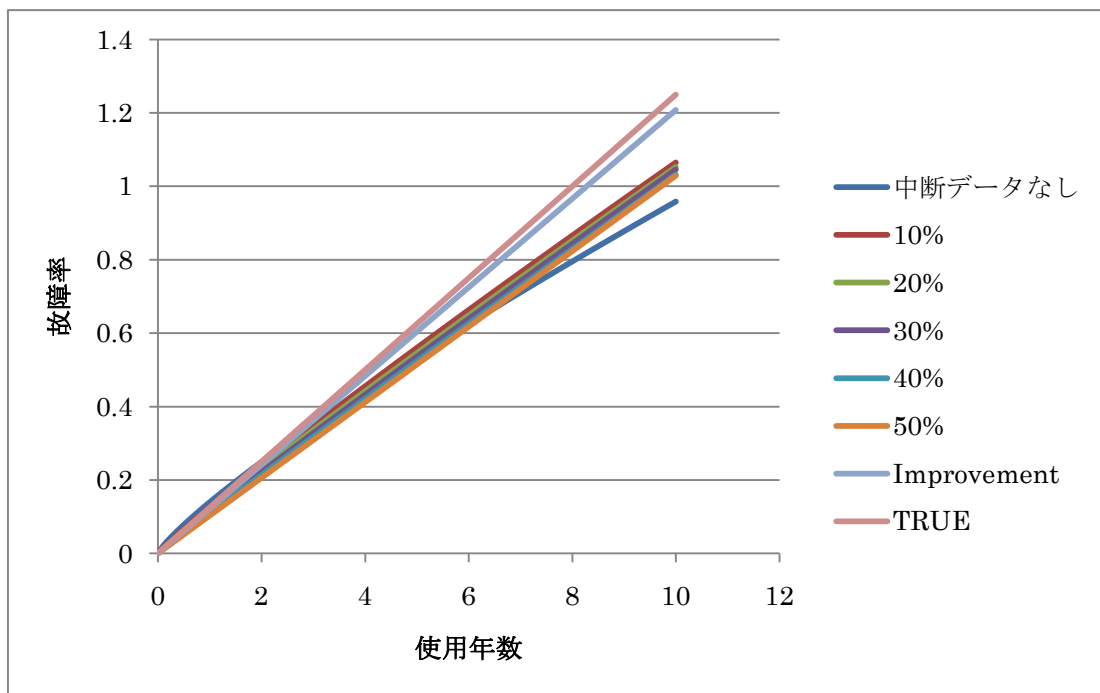


Fig. 3-4 Failure rate 4 (n=100)

また，故障率の適合性を定量的に評価するために，以下のような指標 **abs** を定義する．評価したい故障率を $\lambda(t)$ ，真の故障率を $\lambda_{true}(t)$ とする．**abs** の値が小さいほど，真の故障率に適合しているといえる．実際に計算するときは，右辺の式を使う．総和をとる範囲は， $t=0$  から 10 もしくは $\lambda_{true} \leq 1$  となる $t$  までとした．

$$abs = \int |\lambda(t) - \lambda_{true}(t)| dt \approx \sum_{t=0}^{10 \text{ or } \lambda_{true} \leq 1} \frac{|\lambda(0.1t) - \lambda_{true}(0.1t)|}{10} \quad (3.3)$$

**abs** の計算結果を Table3-3 に掲載した．これにより，Fig3-1～Fig3-4 より読み取れた

- ・ すべての場合において，**Improvement** が真の故障率と一番よく合致している
- ・ 故障データ数を増やすほど，真の故障率に近くなる
- ・ 観測中断データを増やしても，必ずしも真の故障率に近くなるわけではない

以上の三点が定量的に確認できた．

Table 3-3 Abs data

		中断データ数						Imp
		なし	10%	20%	30%	40%	50%	
n	10	3.551	1.766	1.910	1.944	2.043	1.913	1.600
	20	2.662	1.495	1.515	1.591	1.686	1.689	1.160
	30	2.139	1.311	1.341	1.474	1.496	1.642	0.965
	100	1.089	0.741	0.855	0.939	1.047	1.117	0.212

## 3.4 ベイズ推定の検討

### 3.4.1 解析の目的

この解析の目的はベイズ推定の有用性を確認することであるが、実際にベイズ推定が使われるのはデータ数が少ない時であるので、とくにデータ数が少ない時に有用であるかを確認する。

### 3.4.2 解析手法

Fig.3-5 にベイズ推定の流れ図を示す。

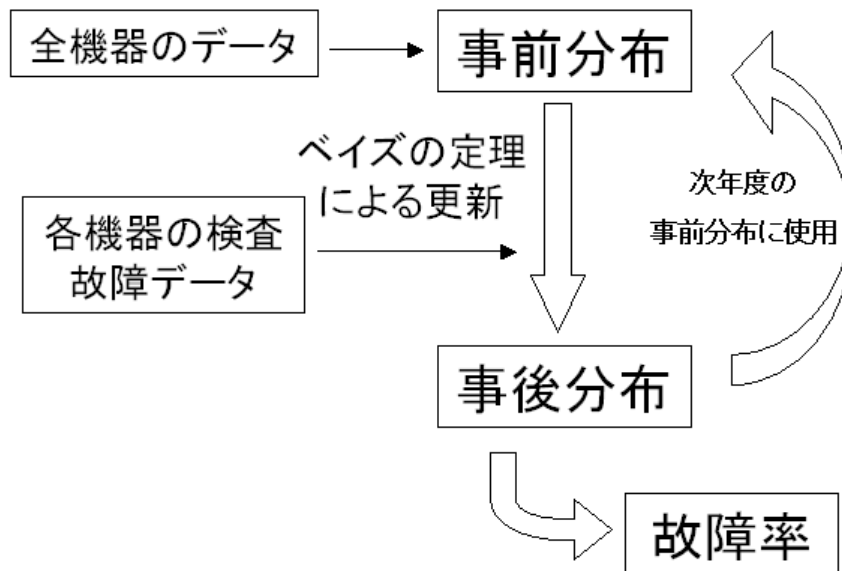


Fig. 3-5 Flowchart

故障率の定義式，式(2.8)

$$\lambda(t) = -\frac{dR(t)/dt}{R(t)} = \frac{\alpha t^{\alpha-1}}{\beta^\alpha} \quad (2.8)$$

のうち $\alpha \cdot \beta$ の2母数を確率変数とみなし、事前分布を基に $\alpha \cdot \beta$ の値を推定する。推定した $\alpha \cdot \beta$ の値と使用年数を式(2.8)に代入することで故障率を算出する。このよ

うな推定方法は日本海事協会による論文「開発した世界初となる船用機関・機器を含めた回転機械の RBM システムの概要」[13]の考え方を発展させたものである。

設定した事前分布を検査間隔ごとに検査データを用いて更新していく。このとき、更新された事後分布は、その時の  $\alpha \cdot \beta$  の推定に用いるとともに、次の更新における事前分布として用いる。

### ① 事前分布の設定

本研究では、推定する母数  $\alpha \cdot \beta$  の確信度の事前分布を正規分布として与えることとする。  $\alpha$  の分布を  $Q(\alpha)$ 、  $\beta$  の分布を  $R(\beta)$  とする。  $Q(\alpha)$  の平均を  $\mu_\alpha$ 、標準偏差を  $\sigma_\alpha$ 、  $R(\beta)$  の平均を  $\mu_\beta$ 、標準偏差を  $\sigma_\beta$  とすると、

$$Q(\alpha) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_\alpha} \exp\left(-\frac{(\alpha - \mu_\alpha)^2}{2\sigma_\alpha^2}\right) \quad (3.4)$$

$$R(\beta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_\beta} \exp\left(-\frac{(\beta - \mu_\beta)^2}{2\sigma_\beta^2}\right) \quad (3.5)$$

となる。推定する母数が  $\alpha \cdot \beta$  と二つあるので、二次元分布として考える。  $\alpha \cdot \beta$  が独立であると仮定したとき、密度関数は

$$\begin{aligned} P(\alpha, \beta) &= Q(\alpha)R(\beta) \\ &= \frac{1}{2\pi\sigma_\alpha\sigma_\beta} \exp\left(-\frac{(\alpha - \mu_\alpha)^2}{2\sigma_\alpha^2} - \frac{(\beta - \mu_\beta)^2}{2\sigma_\beta^2}\right) \end{aligned} \quad (3.6)$$

となる。

### ② 尤度関数の設定

ベイズの定理で分布を更新する際には、尤度関数  $P(D|\alpha, \beta)$  を考えなければならない。今回の場合、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、故障が発生しなかった事象(safety)と故障が発生した事象(failure)の二通りが考えられる。

$t_{i-1}$  年目までの検査で故障が発見されず、  $t_i$  年目の検査でも故障が発見されないときの尤度関数は、

$$\begin{aligned} P(\text{safety}|\alpha, \beta) &= \frac{1 - F(t_i)}{1 - F(t_{i-1})} \\ &= \exp\left[-\left(\frac{t_i}{\beta}\right)^\alpha + \left(\frac{t_{i-1}}{\beta}\right)^\alpha\right] \end{aligned} \quad (3.7)$$

となる。また、 $t_{i-1}$ 年目まで故障が発見されず、 $t_i$ 年目の検査で故障が起きた場合の尤度関数は、

$$\begin{aligned}
 P(\text{failure}|\alpha, \beta) &= \frac{F(t_i) - F(t_{i-1})}{1 - F(t_{i-1})} \\
 &= 1 - \exp \left[ -\left(\frac{t_i}{\beta}\right)^\alpha + \left(\frac{t_{i-1}}{\beta}\right)^\alpha \right]
 \end{aligned}
 \tag{3.8}$$

となる。

### ③ 事後分布の評価

更新された事後分布から  $\alpha \cdot \beta$  の値を点推定する。具体的には、分布中の最頻値を示す  $\alpha \cdot \beta$  により故障率を求める。また、前述のとおりこの事後分布を次の更新における事前分布として用いる。

### 3.4.3 シミュレーション条件

シミュレーション条件を Table3-4 に示す。 $\alpha$  の真の値を  $\alpha_{true}$ 、 $\beta$  の真の値を  $\beta_{true}$  とする。

Table 3-4 Simulation condition 2

$\alpha_{true}$	2.0, 2.2, ..., 5.0
$\mu_\alpha$	$\alpha_{true}$ の-10%, -8%, ..., 10%
$\sigma_\alpha$	$0.1\mu_\alpha$
$\beta_{true}$	1, 2, ..., 10
$\mu_\beta$	$\beta_{true}$ の-10%, -8%, ..., 10%
$\sigma_\beta$	$0.1\mu_\beta$
検査間隔	3ヶ月, 6ヶ月, 1年
更新期間	25年
試行回数	100回



### 3.4.4 解析結果

解析結果の一例を以下に掲載する.

Table 3-5 Parameter condition

	$\alpha$	$\beta$
TRUE	2	4
initial	1.84	4.24
3ヶ月	1.859	4.148
6ヶ月	1.857	4.179
1年	1.862	4.185

Table 3-6 Abs

	initial	3ヶ月	6ヶ月	1年
abs	3.975	3.043	3.319	3.315

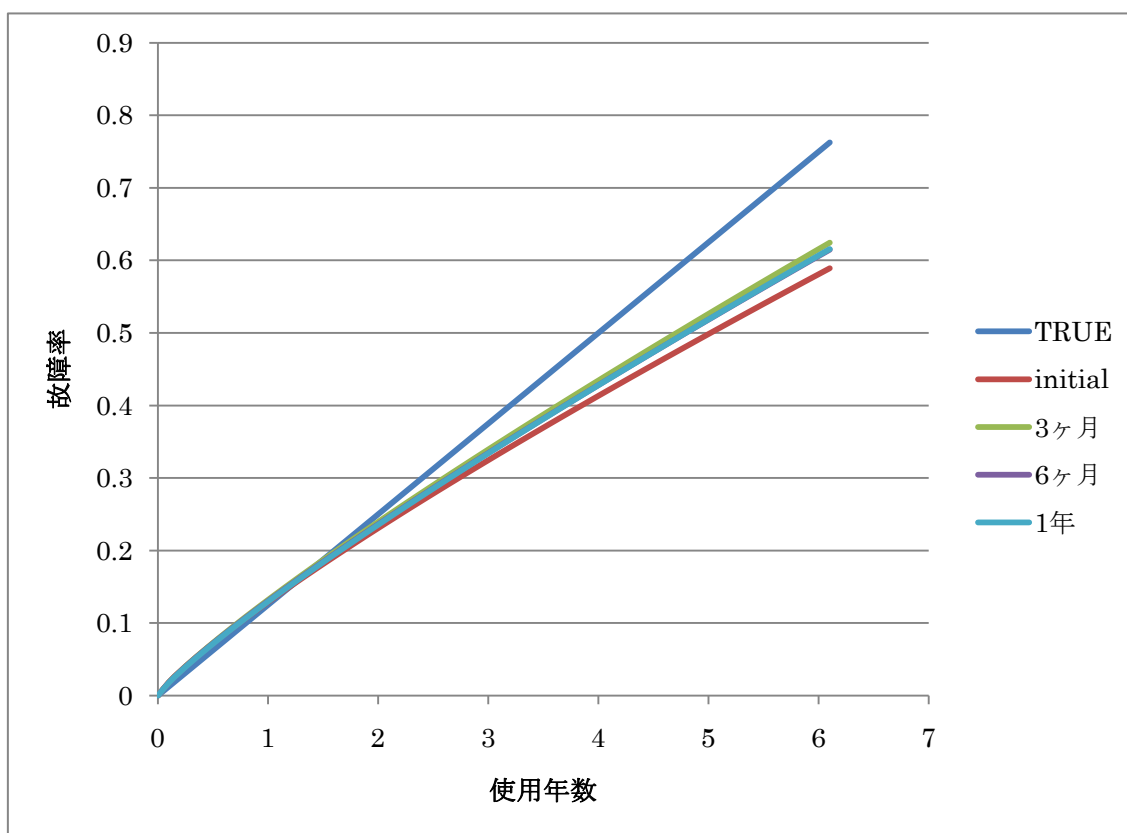


Fig. 3-6 Failure rate( $\alpha=2, \beta=4$ )

Table 3-7 Parameter condition

	$\alpha$	$\beta$
TRUE	2.4	4
initial	2.592	4.32
3ヶ月	2.595	4.202
6ヶ月	2.592	4.199
1年	2.602	4.235

Table 3-8 Abs

	initial	3ヶ月	6ヶ月	1年
abs	2.908	1.445	1.424	1.743

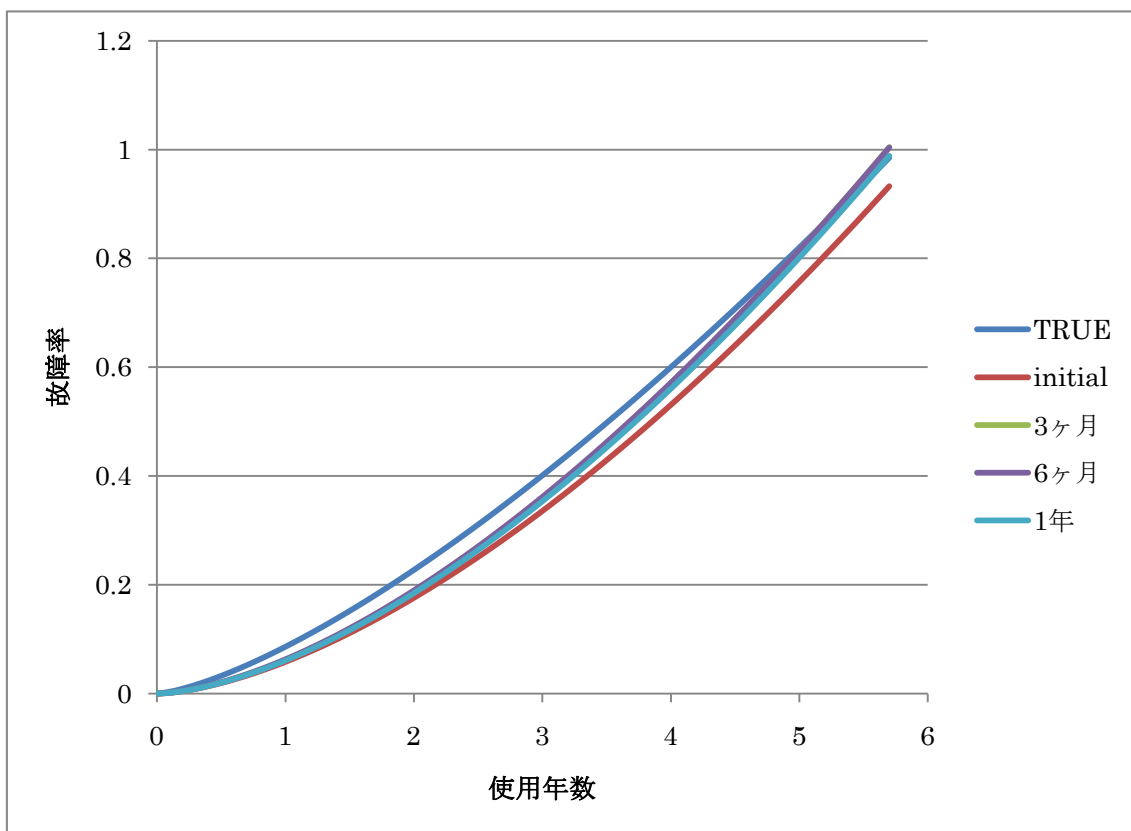


Fig. 3-8 Failure rate( $\alpha=2.4, \beta=4$ )

Table 3-9 Parameter condition

	$\alpha$	$\beta$
TRUE	3.2	5
initial	3.136	5.3
3ヶ月	3.164	5.179
6ヶ月	3.154	5.176
1年	3.150	5.189

Table 3-10 Abs

	initial	3ヶ月	6ヶ月	1年
abs	3.451	2.166	2.170	2.321

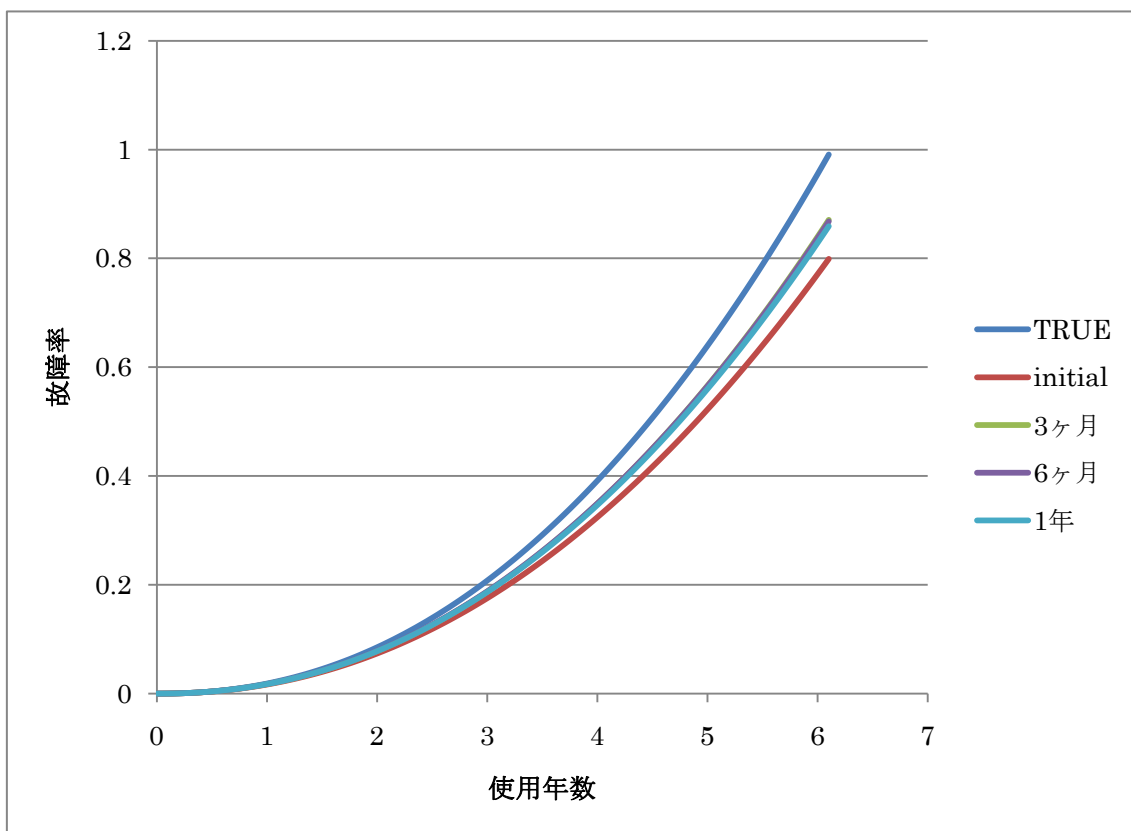


Fig. 3-8 Failure rate ( $\alpha=3.2, \beta=5$ )

Table 3-11 Parameter condition

	$\alpha$	$\beta$
TRUE	4.6	6
initial	5.06	5.4
3ヶ月	5.035	5.688
6ヶ月	5.058	5.662
1年	5.035	5.688

Table 3-12 Abs

	initial	3ヶ月	6ヶ月	1年
abs	8.109	3.648	4.026	3.651

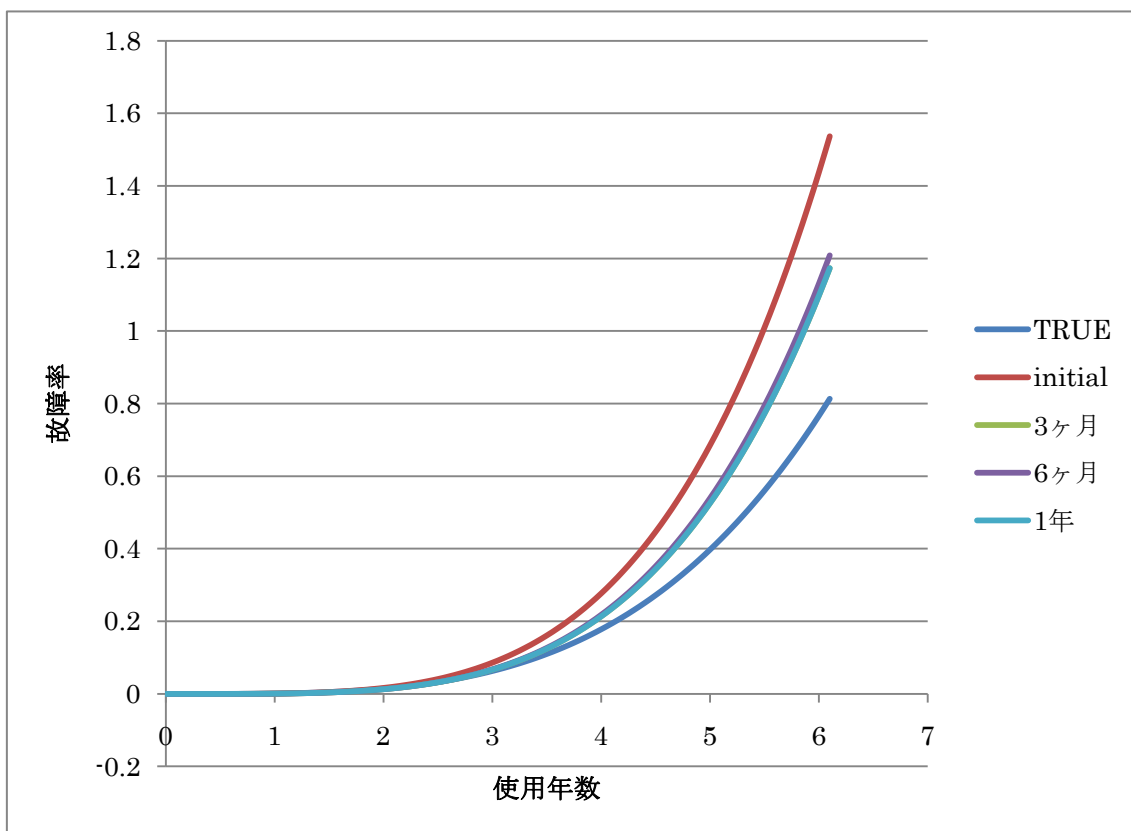


Fig. 3-9 Failure rate( $\alpha=4.6, \beta=6$ )

以上の結果から分かることは、

- ベイズ推定を行った後の故障率は、初期の故障率よりも真の故障率に近付いている
- 検査間隔を短くしたからと言って、必ずしも真の故障率への収束性が高くなるわけではなく、検査間隔にとらわれずベイズ推定を行うことに意味がある

ここでは、検査期間を 25 年として 1 つの機器からのみ検査データが得られるという系を仮定しているが、同じ条件に置かれている機器が 2 つであれば、検査期間を半分にしてほぼ同等の結果が得られる。以上より、比較的少ないデータしか得られない場合でもベイズ推定により正しい値に近付いていることが確認できた。

### 3.5 結言

本章では、平均順位法・ベイズ推定の有用性をシミュレーションによって明らかにした。

平均順位法において、ワイブル分布の  $\alpha$ （形状母数）の推定を行う際は平均順位法により、観測中断データを出来るだけ考慮に入れたほうが良い結果が得られるが、 $\beta$ （尺度母数）の推定を行う際は観測中断データを考慮に入れないほうが良い結果が得られるということが分かった。

ベイズ推定において、検査間隔による違いはあまりないことが分かった。少ないデータしか得られない場合でもベイズ推定により正しい値に近付いていることが確認できた。

## 第 4 章 故障率の解析

## 4.1 緒言

本章では、第2章で示した信頼性工学の理論とベイズ統計の手法と第3章のシミュレーションの結果を用いて、具体的に各機器の故障率を算出していく。

## 4.2 評価の対象および故障の定義

本研究で対象とした設備は、JAXA 種子島宇宙センター高圧ガス貯蔵供給所(HGS)の GHe 供給系設備である。高圧ガス貯蔵供給所の GHe 供給設備では、液体ヘリウムが気化・昇圧され、高圧のヘリウムガスが製造・貯蔵される。Fig.4-1 にその概要を示す。また、製造されたヘリウムガスの主な用途は、ロケット気蓄器充填や液体水素系配管等ページであり、VAB(大型ロケット組み立て塔)や LP1(第1射点：ロケットの打ち上げ場所)に供給される。ロケット組み立て期間中にヘリウムガスの VAB への供給が止まれば、ロケットが損傷する恐れがある。また、打ち上げ当日に LP1 への供給が止まれば、打ち上げが遅延される。このように、高圧ヘリウムガスの安定した供給はロケットの打ち上げに必要不可欠である。

故障率の算出に用いるデータは、種子島宇宙センターにおいて蓄積された 1998 年度から 2007 年度までの保全手順書[14]を基にする。この保全手順書には、対象範囲にある機器の過去の定期検査データ、ヘリウムガスの製造記録、機器の不具合記録が載っている。

対象範囲内にある構成機器の種類と数、それぞれの故障モードをまとめたものが Table.4-1 である。なお、今回の解析においては、機器ごとの故障率の評価を行うため、故障モードごとの区分けはしない。正確な解析を行うためには故障モードごとに解析をおこなうべきであるが、メンテナンスにおいて欲しい情報は故障の有無であり、加えて故障モードごとの故障報告データは、極端に少なくなるためそのようにした。従って、これらの確認された故障モードに加え、機器の機能が失われた状態を全て故障と定義して解析を進めていく。

なお、全く検査がなされていなかったり、検査データが全くなかったりする機器については、類似の機器によるデータを用いることや適切な仮定をすることをして解析を行った。

具体的には、以下のような仮定をおいた。

- ・ 内部流体が He の逆止弁およびフィルタについては、気密漏洩点検において機器の記録項目はなかったが、配管ラインの気密点検をする際に合わせて点検が行わ

れているとみなし、不具合報告がなければ検査に合格したとみなした。

- 温度計の校正・点検作業で、報告書の項目に載っていない機器については、同じシステム内の温度計が校正・点検されている場合は、合わせて校正・点検が行われたとみなし、不具合報告がなければ検査に合格したとみなした。
- スイッチ類に関しては、全て圧縮機で使用されているので、圧縮機を更新した2003年度から使用を開始したものとした。また、圧縮機の開放点検時に検査が行われ、その際に不具合報告がなければ、検査に合格したとみなした。
- その他、圧縮機の内部の機器については、開放点検時に不具合報告がなければ検査に合格したとみなす。
- C-3005 圧縮機の開放点検における交換機器の記録がなかったが、交換機器はC-3004 圧縮機の開放点検時と同じであると仮定する。たとえば、C-3005 圧縮機内にある逆止弁の HCV-3329,HCV-3330 を交換したという記録はなかったが、C-3004 圧縮機において同等の役割をしている HCV-3327,HCV-3328 の交換は行われたため、HCV-3329,HCV-3330 は交換が行われたとみなす。

また、配管ラインに関する取り扱いを述べる。今回、対象範囲の配管を複数のユニットラインに分けた上で、それぞれのラインを1つの要素として取り扱った。しかし、1つのラインは複数の継ぎ手部を有しており、検査においてはそれぞれの継ぎ手部において漏洩があるか否か等が調べられている。よって、配管ラインは継ぎ手部の数の機器をグルーピングした要素と考えて更新を行っていく。なお、各ラインの有する継ぎ手部の数はTable 3-2のとおりである。また、継ぎ手部の数が計測不能であったC-3004 圧縮機ライン、C-3005 圧縮機ライン、移充填装置ライン、気蓄器系貯気槽ラインは、継ぎ手部の数はそれぞれ80、80、10、20であると仮定した。



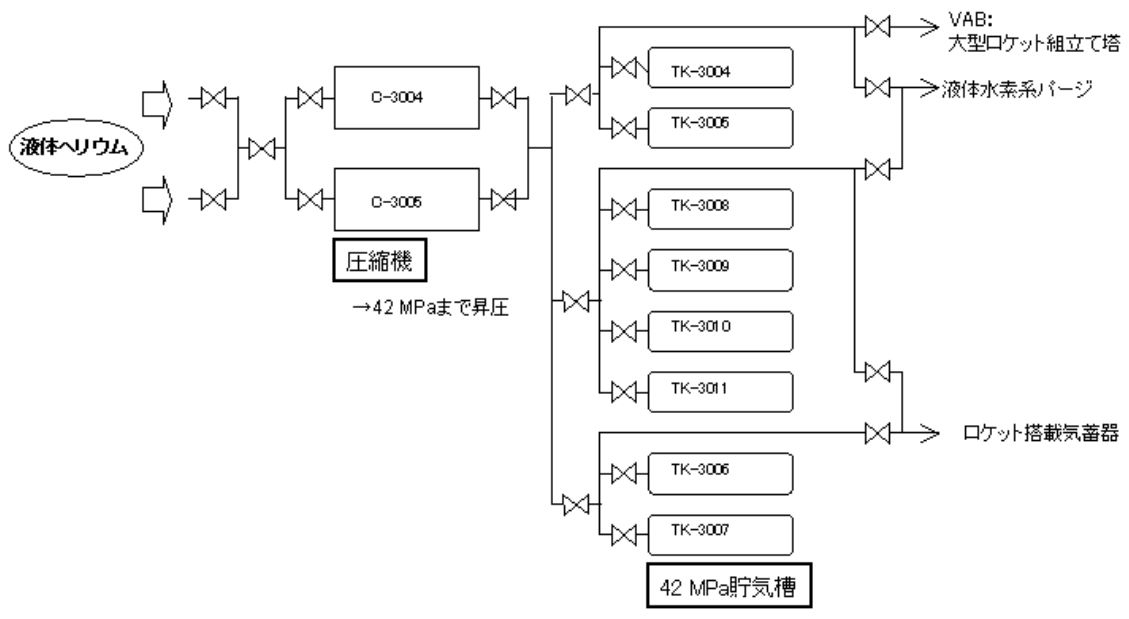


Fig. 4-1 HGS He supplying system

Table 4-1 Elements and their failure modes

機器種類	数	故障モード	確認された故障モード
手動弁	176	外部漏洩	グランドパッキンの劣化
			継手部のシール劣化
			継手部のクラック
			弁箱(ボディー)のクラック及びピンホール
		内部漏洩	弁体の不良
		開閉不良	ハンドルの硬化
			軸受け部の硬化
気体作動弁	8	破断・折損	弁棒(ステム)の折損
			ハンドルロックナットの破断
		漏洩	シートの劣化
			グランドパッキンの劣化
		内部漏洩	内部シールの劣化
		開閉不良	駆動部の不良(引っかかり等)
			駆動圧力の低下
減圧弁	8		ステムの不良
			弁体の引っかかり
		漏洩	継手部のシール劣化
			継手部のクラック
逆止弁	11	内部漏洩	シール不良
		調圧不良	シール不良による内部漏洩
			弁体、弁座の不良
安全弁	24	作動不良	弁体、弁座の不良
			設定不良
			設定圧力以下の圧力での作動
		漏洩	弁座漏洩
圧力計	42		作動前の前漏れ
		指示不良	内部ボルト脱落
			針の動きに引っかかり
			振動による等による指針の脱落
温度計	28	外観不良	塗装の剥離
		指示不良	
圧力発信器	13	精度外れ	発信器本体の不良
			信号変換器の不良
		表示部の不良	画面が見にくい
温度発信器	12	精度外れ	熱伝対の不良
配管	17	外部漏洩	溶接部のクラック、ピンホール
			継手部のクラック
スイッチ類	24		
フィルタ	14		
タンク	8		
その他	74		

Table 4-2 The Number of connecting points

ライン	継ぎ手
圧縮機吸入ライン	103
圧縮機吐出ライン	10
C-3004圧縮機ライン	80
C-3005圧縮機ライン	80
一般パージ系貯気槽ライン	11
共通系貯気槽ライン	28
気蓄器系貯気槽ライン	20
TK-3004ライン	14
TK-3005ライン	18
TK-3006ライン	19
TK-3007ライン	13
TK-3008ライン	15
TK-3009ライン	14
TK-3010ライン	17
TK-3011ライン	18
回収ライン	27
移充填装置ライン	10

### 4.3 故障率のモデル化

前述のとおり，故障率を式(2.8)によりモデル化する

$$\lambda(t) = -\frac{dR(t)/dt}{R(t)} = \frac{\alpha t^{\alpha-1}}{\beta^\alpha} \quad (2.8)$$

### 4.4 事前分布の設定方法

3.3.1 で述べたように，本研究ではベイズ推定に用いる  $\alpha \cdot \beta$  からなる 2次元の事前分布を以下のような正規分布の積である式(3.6)で表す。

$$\begin{aligned} P(\alpha, \beta) &= Q(\alpha)R(\beta) \\ &= \frac{1}{2\pi\sigma_\alpha\sigma_\beta} \exp\left(-\frac{(\alpha - \mu_\alpha)^2}{2\sigma_\alpha^2} - \frac{(\beta - \mu_\beta)^2}{2\sigma_\beta^2}\right) \end{aligned} \quad (3.6)$$

#### 4.4.1 平均値の設定

平均値 $\mu_\alpha$ ,  $\mu_\beta$ の設定方法について述べる.

得られたデータから, 使用年数のわかるデータを抽出し, 同種の機器ごとにまとめた. 得られたデータのの一つとして, 安全弁の故障・検査履歴表を Table 4-3 に示す. 以下, 例としてこの安全弁の故障率評価について述べていく. この表は, 各年度において, 使用中の故障および検査時の故障があった場合には「1」を, 検査を行い合格した場合は「0」を入れ, 検査がなく故障も報告されなかった場合にも「0」を入れ作成した. 機器は, 故障があった場合には交換され, それ以外のときは使用され続ける. このデータは 1998 年以前の情報はなく, 各機器が 1998 年以前のいつから使用をはじめたのか不明である. これに対する対処方法は 2 通りある.

① 1997 年に使用を開始したと仮定する

この場合, 使用時間を実際の使用時間よりも短く見積もってしまうので, 安全側の解析となってしまうが, データ数を増やすことができるという利点がある.

② 1998 年以降で一度故障した後から使用を開始したとして, それまでのデータは考慮しない

この場合, データの抽出方法は正しいといえるが, データ数が少なくなってしまう.

今回は, 第 3 章のシミュレーションの結果から考えて, ある程度のデータ数が必要であると判断し, 安全弁の解析においては①の方法を採用する.

Table 4-3 Data of Failure and Inspection for Safety Valve

TAG No	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
HRV-3320	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0
HRV-3321	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0
HRV-3322	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1
HRV-3323	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1
HRV-3324	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
HRV-3325	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0
HRV-3326	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0
HRV-3327	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
HRV-3328	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
HRV-3329	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
HRV-3330	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
HRV-3331	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
HRV-3334	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
HRV-3335	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
HRV-3336	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
HRV-3337	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

データの抽出方法

Table 4-4 のようにデータを抽出する. Table 4-4 のデータから 3 年の故障データ 2 つと 4 年の観測中断データ 1 つが得られる.

Table 4-4 Method of extraction

TAG No	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
HRV-3320	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0

## 抽出結果

抽出結果を Table 4-5 に示す.

Table 4-5 Extraction results

故障データ

1年	2年	3年	4年	5年	6年	7年	8年	9年	10年
1	6	3	3	2	3	0	0	0	1

観測中断データ

1年	2年	3年	4年	5年	6年	7年	8年	9年	10年
0	3	0	1	0	0	0	1	0	7

Fig.4-2 は、安全弁について平均順位法で故障順位を出し、横軸を  $lnt$ 、縦軸を  $\ln \ln 1/(1-F(t))$  として、得られた結果をプロットしたものである。

得られたデータを最小二乗法で線形近似したグラフの傾きが  $\alpha$ 、切片が  $-\alpha \ln \beta$  となる。したがって、 $\alpha = 1.628$ 、 $\beta = (\exp(3.0668))^{1/\alpha} = 6.575$  となる。

このようにして得られた  $\alpha \cdot \beta$  を事前分布の  $\mu_\alpha$ 、 $\mu_\beta$  として使用する。

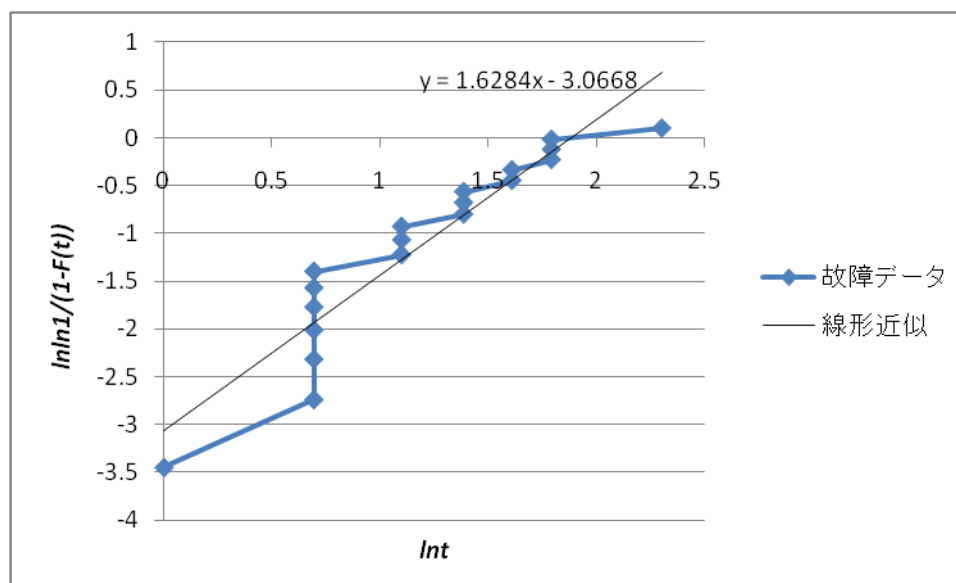


Fig. 4-2 Weibull probability paper

#### 4.4.2 標準偏差の設定

標準偏差 $\sigma_\alpha$ ,  $\sigma_\beta$ の設定方法について述べる.

平均順位法のシミュレーションによる解析結果である Fig.3-2 を参照すると, 故障データ数が 20 個以上で, かつ観測中断データが故障データ数の 10%以上である場合は, 解析結果の $\alpha \cdot \beta$ の平均値は真の $\alpha \cdot \beta$ から高々10%しかずれていないことが分かる. シミュレーションを行ったほぼすべての $\alpha \cdot \beta$ についてこの傾向が認められた. このことを考慮して, 次のように標準偏差 $\sigma_\alpha$ ,  $\sigma_\beta$ を設定する.

$$\begin{aligned}\sigma_\alpha &= 0.1\mu_\alpha \\ \sigma_\beta &= 0.1\mu_\beta\end{aligned}\tag{4.1}$$

#### 4.5 解析結果

ここでは, 例として安全弁 HRV-3328 の解析結果を掲載する.

4.4 より,  $\mu_\alpha = 1.628$ ,  $\mu_\beta = 6.575$ ,  $\sigma_\alpha = 0.1628$ ,  $\sigma_\beta = 0.6575$ として, 事前分布を設定する. Table 4-4 の検査データに基づいて, ベイズ推定を行い, 分布を更新していく. その分布の最頻値を採用して,  $\alpha \cdot \beta$ を算出する.  $\alpha \cdot \beta$ の 1998 年の初期分布を Fig.4-3 に, 2007 年の事後分布を Fig.4-4 に, 故障率の時間変化を Fig.4-5 に示す.

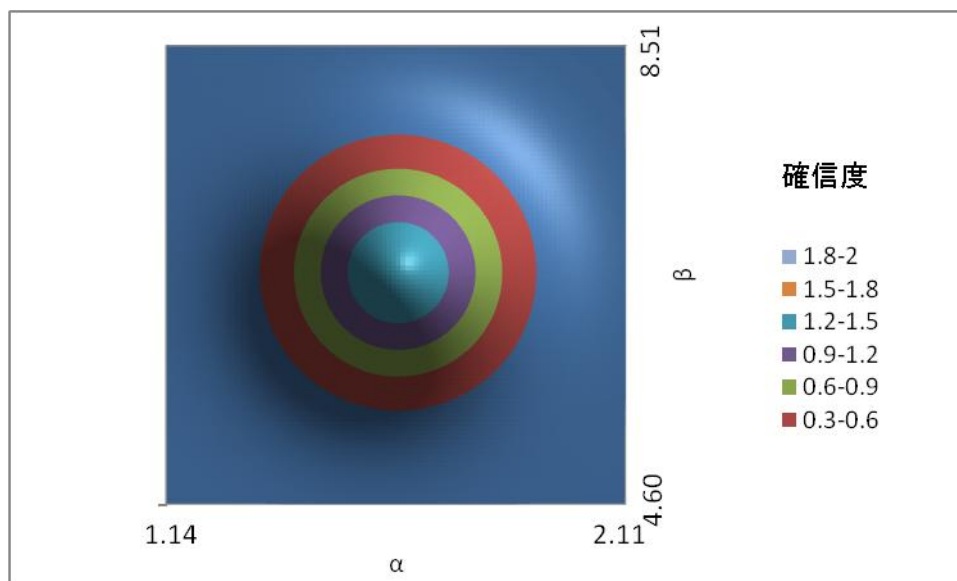


Fig. 4-3 1998 prior distribution of HRV-3328

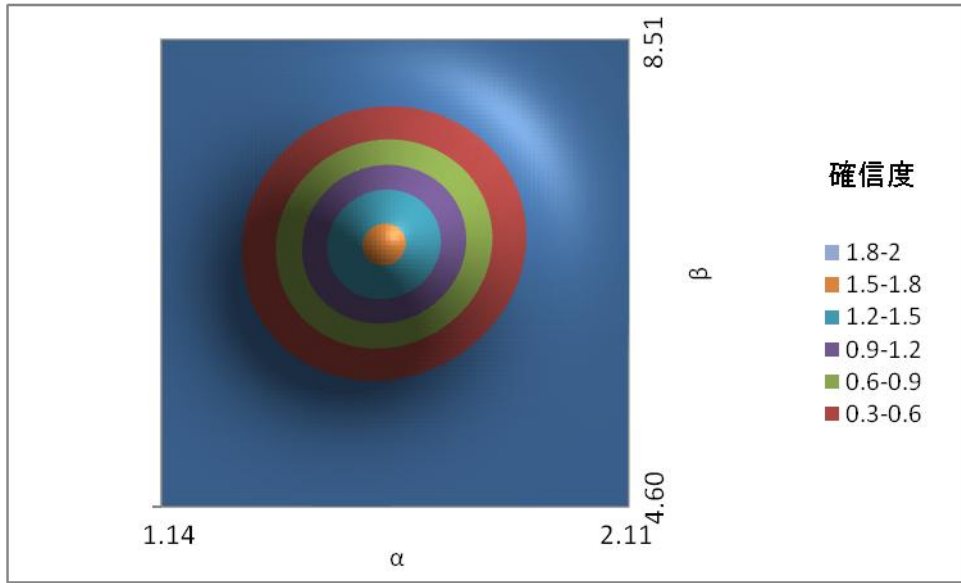


Fig. 4-4 2007 posterior distribution of HRV-3328

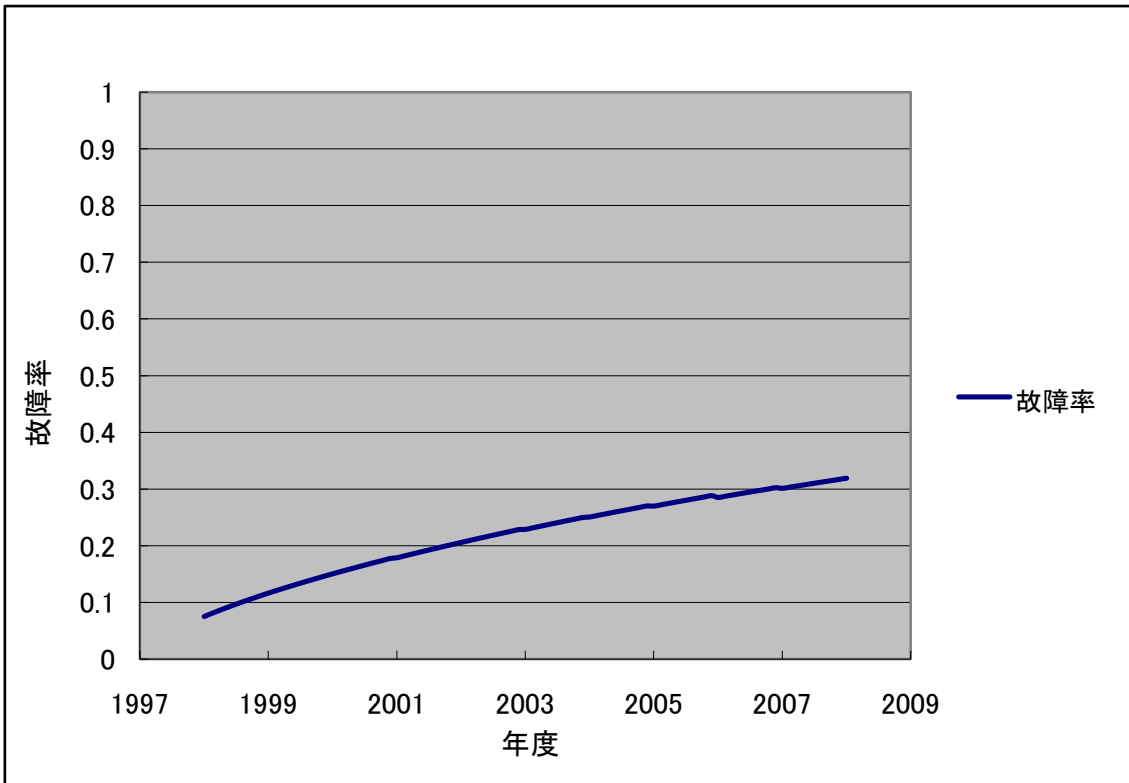


Fig. 4-5 Failure rate of HRV-3328



HRV-3328の検査データは10年間ずっと故障なしというものであるが、そのデータを基にベイズ推定を行った結果、 $\alpha$ の値が低くなり $\beta$ の値が高くなっていることがFig.4-3とFig.4-4から読み取れる。これは式(2.4)から考えて故障率が低い方への遷移であると分かる。すなわち、故障なしというデータにより故障率が低い方へ更新されたと考えられる。その様子がFig.4-5のグラフに表れている。

解析により得られた一部の機器に対する2008年度の故障率評価をTable 4-6に示す。2008年度の故障率とは、ベイズ推定の2007年の事後分布における最頻値の $\alpha \cdot \beta$ を用いて算出したものである。全機器の2008年度の故障率評価は付録Bを参照のこと。

Table 4-6 Failure rate of some elements

要素	TAG No.	2008年故障率
Ghe受入元弁1	HMV-3301	0.039
Ghe受入元弁2	HMV-3302	0.036
Ghe送給元弁	HMV-3303	0.022
Ghe受入ラインVENT弁1	HMV-3305	0.039
Ghe受入ラインVENT弁2	HMV-3306	0.039
PG-3301元弁	HMV-3307	0.039
PG-3301元弁圧力校正ポート元弁	HMV-3308	0.039
GHeカードル圧力計	PG-3301	0.150
Ghe圧縮機吸入元弁	HMV-3304	0.036
PG-3302元弁	HMV-3309	0.039
PG-3302圧力校正ポート元弁	HMV-3310	0.039
RV-3301元弁	MV-3311	0.022
PG-3303元弁	MV-3312	0.039
PG-3303圧力校正ポート元弁	MV-3313	0.039
RV-3302元弁	MV-3314	0.022
PG-3304元弁	MV-3315	0.039
PG-3304圧力校正ポート元弁	MV-3316	0.039
Ghe圧縮機吸入減圧弁1	HPR-3301D	0.023
HPR-3301用設定減圧弁	HPR-3301H	0.023
Ghe圧縮機吸入減圧弁2	PR-3302D	0.023
PR-3302用設定減圧弁	PR-3302H	0.023
吸入ライン安全弁1	RV-3301	0.050
吸入ライン安全弁2	RV-3302	0.050
Ghe圧縮機吸入圧力計1	PG-3302	0.091
Ghe圧縮機吸入圧力計2	PG-3303	0.030
Ghe圧縮機吸入圧力計3	PG-3304	0.301
Ghe圧縮機吐出止弁1	HMV-3320	0.055
Ghe圧縮機吐出止弁2	HMV-3321	0.055
バイパス充填弁	HMV-3322	0.056
PX-3334元弁	HMV-3334	0.055

## 4.6 結言

本章では、信頼性工学の理論とシミュレーションの結果を考慮して、実際の機器の故障率を算出する手法を概説した。この方法で、全機器の故障率を算出し、第 5 章の影響度の評価と組み合わせることで、リスク評価を行うことができる。

## 第5章 リスクの評価

.

## 5.1 緒言

本章では、第4章で求めた故障率を対象範囲について行った影響度の評価と合わせることで、リスクの評価を行い、結果を示す。

はじめに、影響度の定量的な評価手法を概説する。

続いて、故障率と影響度を組み合わせることでリスクマトリクスを作成する。合わせて、対象範囲内の機器のリスクランキングを示す。

## 5.2 影響度の定量的評価手法

影響判定のための定量的評価方法を概説する。

機器の影響度評価を行ううえで、以下の事象に対する影響度を評価する。

- ①I/W 期間中(ロケットが大型ロケット整備組立塔(VBA)に入ってから打ち上げられるまでの期間中)、VBAへHeを供給できず、ロケット(機体)へのページ供給不可となり、ロケット(機体)が損傷する。
- ②ロケット打ち上げ当日、射点(LP1)へHeを供給できず、ロケット(機体)へのページ供給不可となり、打ち上げが遅延する。
- ③ロケット打ち上げ当日、射点(LP1)へHeを供給できず、気蓄器への供給不可となり、打ち上げが遅延する。
- ④I/W 期間中、貯気槽の加圧が出来ず、打ち上げ時の要求に満足できなくなり、打ち上げが遅延する。

これらの事象に対する機器の影響度をそれぞれ求めていった。

まず、影響度点数を以下の式(5.1)で定義する。

$$\text{影響度点数} = \text{影響度基本点数} \times \text{補正係数} \quad (5.1)$$

計算した影響度点数を0~1に正規化する。すなわち、全機器のうち最大の影響度点数で、各機器の影響度点数を割った点数を計算する。そして、機器の点数をA~Cまでの3段階に分けることで、各機器の影響度をランク付けする。

以下のTable 5-1にランクの点数を示す。

Table 5-1 Point Ranking

ランク	点数
A	1.0~0.66
B	0.66~0.33
C	0.33~0

### 5.2.1 影響度基本点

影響度点数を計算するためにはまず、機器の影響度基本点を算出しなければならない。以下に、その方法を説明する。

影響度評価を行ううえで、上記4つの各事象に対するFTAを作成し、それぞれの事象に関連するタスクおよび機器の洗い出しを行う。作成したFTAによって、洗い出したタスクの項目ごとに点数を決め、それらタスクで使用する機器の使用頻度を点数として加点する。機器の獲得得点の合計を、その機器の影響度基本点として評価する。なお、各タスクについては同時に実行されることもあるが、それらについては考慮しないこととする。例えば、「タンク①とタンク②からVBAへ同時にHeを供給するタスク」については、「タンク①からVBAへHeを供給するタスク」と「タンク②からVBAへHeを供給するタスク」として加点を行う。

Fig.5-1~Fig.5-4を用いてこの手法を説明していく。Fig. 5-1はC-3004圧縮機を用いてTK-3004貯気槽に高圧ヘリウムガスを充填するタスクを表したものである。これに関連する機器に加点をする。Fig. 5-2はC-3004圧縮機を用いてTK-3005貯気槽に高圧ヘリウムガスを充填するタスクを表したものである。このタスクに関連する機器については、先ほどの点数にさらに加点する。Fig. 5-3はTK-3004貯気槽からVBA(大型ロケット組み立て塔)に高圧ヘリウムガスを供給するタスクである。このタスクに関連する機器についても、先ほどの点数にさらに加点する。Fig. 5-4はTK-3005貯気槽からVBA(大型ロケット組み立て塔)に高圧ヘリウムガスを供給するタスクである。このタスクに関連する機器についても、先ほどの点数にさらに加点する。このようにして、全てのタスクについて使用する機器に加点していくことで、機器の影響度基本点として評価する。

本手法により、冗長系のないラインでは自動的に点数が加点され、また、全然関係のない機器においては点数が加点されないので、影響度を機械的に抽出することが出来る。

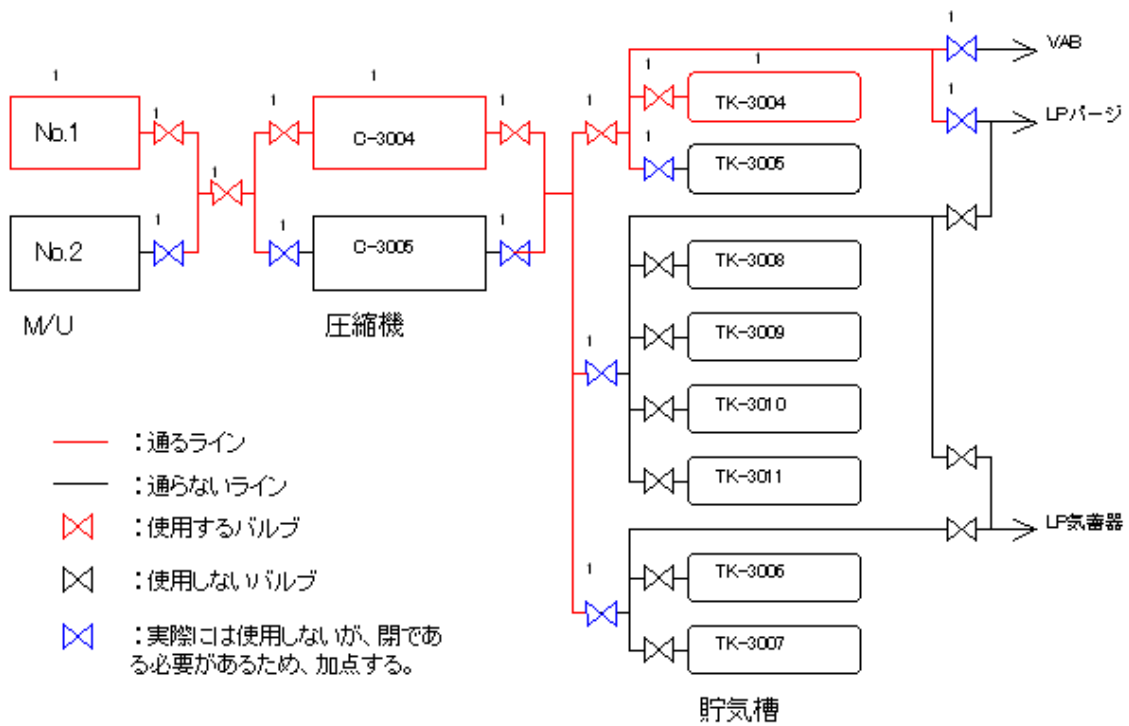


Fig. 5-1 Working Elements in supplying Gas He to tank “TK-3004” by using Compressor “C-3004”

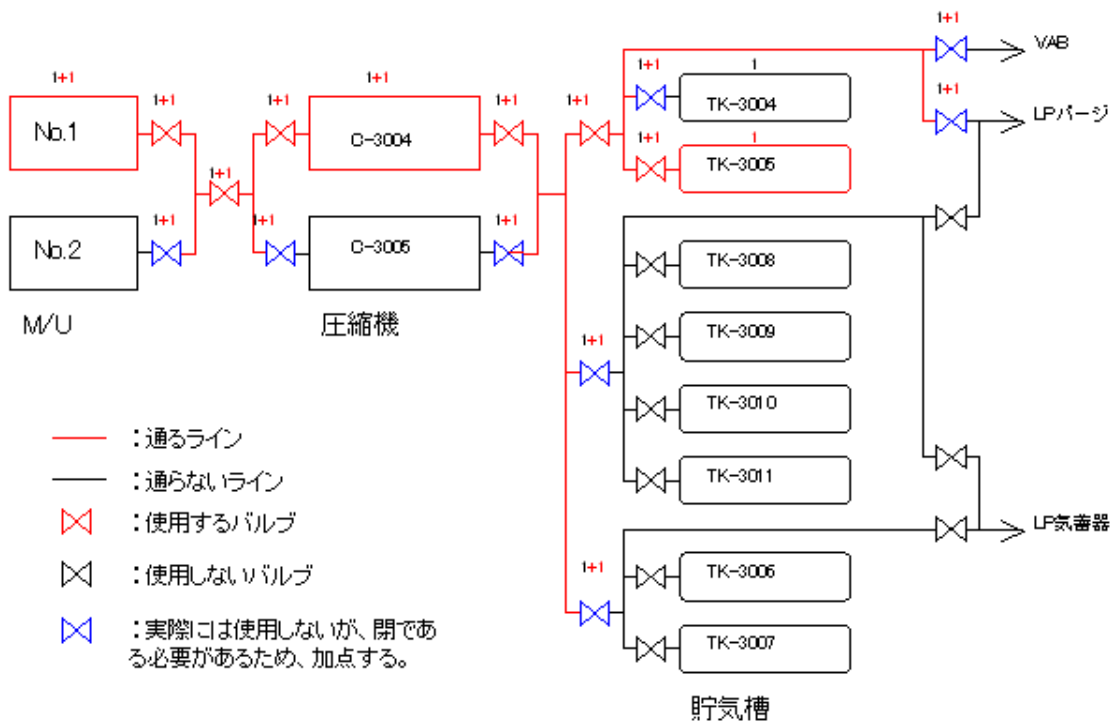


Fig. 5-2 Working Elements in supplying Gas He to tank “TK-3005” by using Compressor “C-3004”

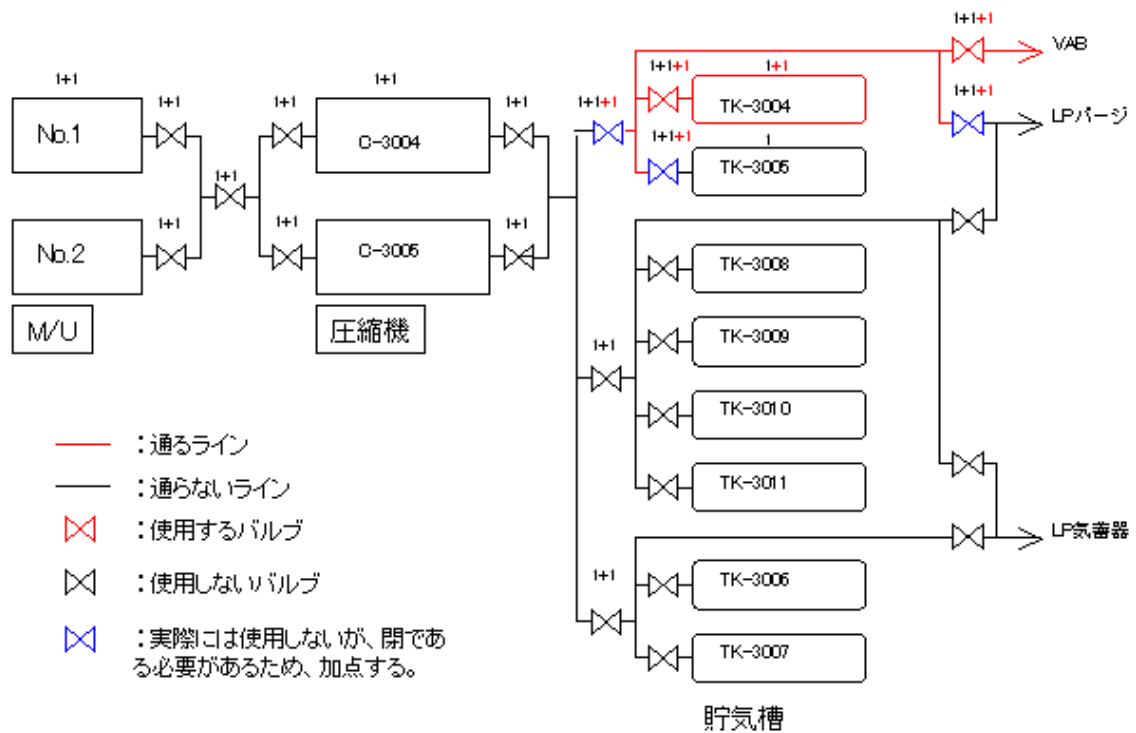


Fig. 5-3 Working Elements in supplying Gas He to VBA from tank “TK-3004”

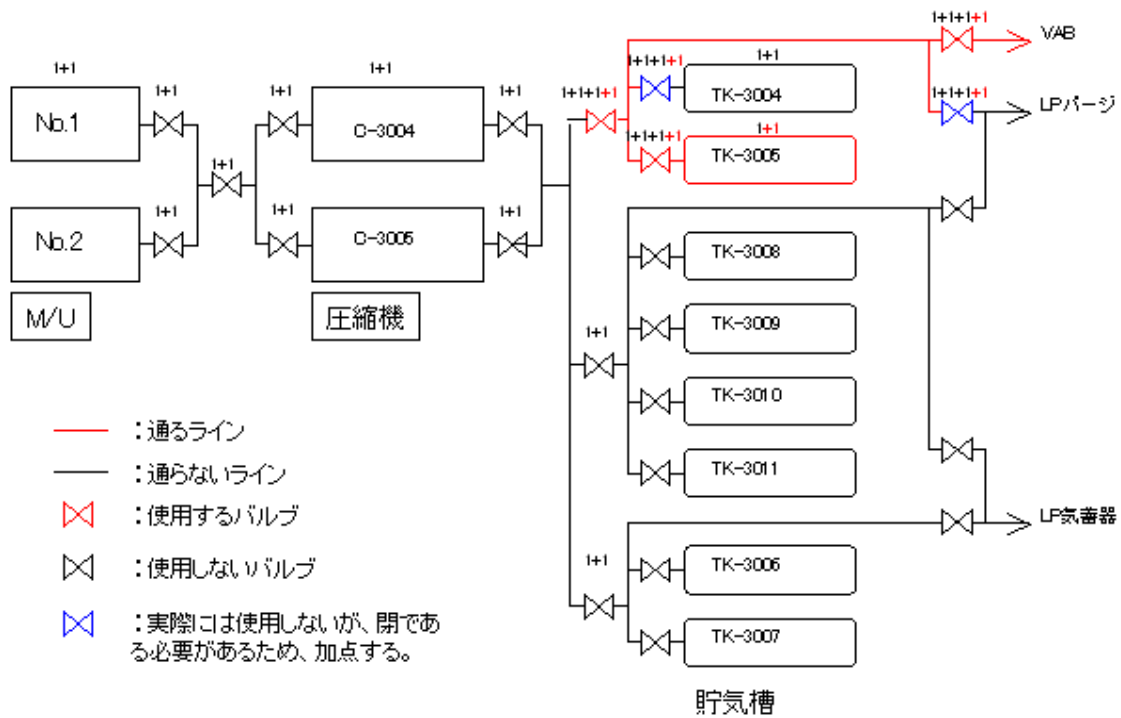


Fig. 5-4 Working Elements in supplying Gas He to VBA from tank “TK-3005”

## 5.2.2 補正係数

今回の評価方法では、同じラインにある機器は全て同じ評価になってしまう。このことを考慮し、「予備品の交換にかかる時間」を補正係数としてかけることで、それぞれの機器に対し影響度の差をつけることとする。

「予備品の交換にかかる時間」の考え方として、予備品があることを前提にして、普通の手動弁の交換における時間を基準として、それぞれ手動弁より交換し易いかし難いかでランク分けをし、係数を掛けることとする。以下 Table 5-2 に、各機器の係数を示す。

Table 5-2 Revising coefficients

機器別	ランク	係数
圧力計	1	0.6
温度計	1	0.6
圧力計元弁	1	0.6
ベント弁	1	0.6
校正ポート元弁	1	0.6
温度スイッチ	1	0.6
圧力スイッチ	1	0.6
フロースイッチ	1	0.6
安全弁元弁	2	0.8
バイパス弁	2	0.8
減圧弁ハンド	2	0.8
減圧弁ドーム	3	1.0
逆止弁	3	1.0
手動弁	3	1.0
安全弁	3	1.0
フィルタ	4	1.2
発信機	4	1.2
気体作動弁	4	1.2
機体作動弁バイパス	4	1.2
電磁弁	4	1.2
圧縮機の機器 2	4	1.2
大きい機体作動弁	5	1.4
貯気槽	5	1.4
圧縮機の機器 1	5	1.4
各ライン	5	1.4



### 5.2.3 総合評価

総合評価として、4つの事象に対して算出したランクの中で、何れかに「A」ランクが入っていれば「A」、何れかに「B」ランクが入っていれば「B」、全て「C」ランクの機器については「C」とする評価を与える。

リスクマトリクスの作成においては、影響度として総合評価を用いて作成する。

## 5.3 影響度評価の結果

.

以下 Table 5-3 に影響度の評価結果の一部を示す。全機器についてのリスクの評価結果は付録 A を参照。

Table 5-3 Consequence of each Element

要素	TAG No.	VAB供給	LPバージ	LP気蓄器	充填/回収	最終評価
GHe受人元弁1	HMV-3301	C	C	C	C	C
GHe受人元弁2	HMV-3302	C	C	C	C	C
GHe送給元弁	HMV-3303	C	C	C	A	A
GHe受人ラインベント弁1	HMV-3305	C	C	C	C	C
GHe受人ラインベント弁2	HMV-3306	C	C	C	C	C
PG-3301元弁	HMV-3307	C	C	C	C	C
PG-3301元弁圧力校正ポート元弁	HMV-3308	C	C	C	C	C
GHe受人フィルタ	HFL-3301	C	C	C	C	C
GHeカードル元圧	PX-3301	C	C	C	C	C
GHeカードル圧力計	PG-3301	C	C	C	C	C
GHe圧縮機吸入元弁	HMV-3304	C	C	C	A	A
PG-3302元弁	HMV-3309	C	C	C	B	B
PG-3302圧力校正ポート元弁	HMV-3310	C	C	C	B	B
RV-3301元弁	MV-3311	C	C	C	B	B
PG-3303元弁	MV-3312	C	C	C	B	B
PG-3303圧力校正ポート元弁	MV-3313	C	C	C	B	B
RV-3302元弁	MV-3314	C	C	C	B	B
PG-3304元弁	MV-3315	C	C	C	B	B
PG-3304圧力校正ポート元弁	MV-3316	C	C	C	B	B
GHe圧縮機吸入減圧弁1	HPR-	C	C	C	A	A
HPR-3301用設定減圧弁	HPR-	C	C	C	B	B
GHe圧縮機吸入減圧弁2	PR-3302D	C	C	C	A	A
PR-3302用設定減圧弁	PR-3302H	C	C	C	B	B
吸入ライン安全弁1	RV-3301	C	C	C	A	A
吸入ライン安全弁2	RV-3302	C	C	C	A	A
吸入フィルタ	HFL-3302	C	C	C	A	A
GHe圧縮機吸入圧力計1	PG-3302	C	C	C	B	B
GHe圧縮機吸入圧力計2	PG-3303	C	C	C	B	B
GHe圧縮機吸入圧力計3	PG-3304	C	C	C	B	B
GHe圧縮機吸入圧	PX-3304	C	C	C	A	A
GHe圧縮機吐出止弁1	HMV-3320	B	C	C	B	B
GHe圧縮機吐出止弁2	HMV-3321	B	C	C	B	B
ハイパス充填弁	HMV-3322	C	C	C	A	A
PX-3334元弁	HMV-3334	C	C	C	C	C
PX-3335元弁	HMV-3335	C	C	C	C	C
HRV-3320元弁	HMV-3336	C	C	C	C	C
HRV-3321元弁	HMV-3337	C	C	C	C	C
GHe圧縮機と出ラインベント弁1	HMV-3338	C	C	C	C	C
GHe圧縮機と出ラインベント弁2	HMV-3339	C	C	C	C	C
吐出ライン安全弁1	HRV-3320	C	C	C	B	B
吐出ライン安全弁2	HRV-3321	C	C	C	B	B
ハイパス充填逆止弁	HCV-3320	B	C	C	A	A
C-3004吐出圧	PX-3334	C	C	C	B	B
C-3005吐出圧	PX-3335	C	C	C	B	B
C-3004吐出温度	TX-3303	C	C	C	B	B
C-3005吐出温度	TX-3304	C	C	C	B	B

## 5.4 リスクマトリクスの作成

第4章で求めた故障率と、5.2節で評価した影響度ランクを用いて、リスクマトリクスを作成する。横軸に影響度、縦軸に故障率をとり、Fig. 5-5に示すような3×3のリスクマトリクスを作成する。このマトリクスでは、それぞれ右方向、上方向にいくほどリスクが高くなっていく。マトリクスの9つの領域をリスクの高さによって3つに分ける。Fig. 5-5において、赤の領域は「リスク高」、黄色の領域は「リスク中」、緑の領域は「リスク低」として色分けをする。

故障率のランクの区切り方については、確立された方法はないため、いくつかの区切り方を検討した。具体的には、以下に示す3通りの区切り方を検討し、分布の状況から適切な区切り方を判断する。なお、Table 5-4で示した範囲は、「0~0.3」とある場合は0以上0.3未満である。

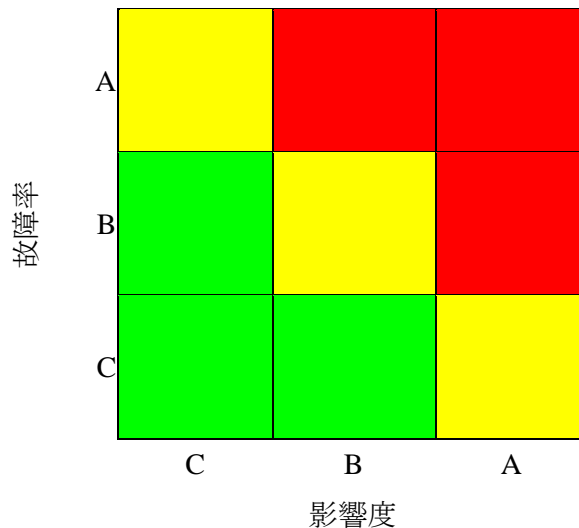


Fig. 5-5 Risk Matrix

Table 5-4 Ranking Pattern

	パターン 1	パターン 2	パターン 3
A ランク	0.67~1	0.7~1	0.3~1
B ランク	0.33~0.67	0.3~0.7	0.15~0.3
C ランク	0~0.33	0~0.3	0~0.15

## 5.5 リスク評価の結果

前節 Table 5-4 で示した，故障率の区切り方についての 3 つのパターンについて，それぞれリスクマトリクスを作成した．以下の Fig 5-6~Fig5-8 に，そのマトリクスの中にプロットされる機器の数を載せたマトリクスを示す．

リスクベースメンテナンスにおいて必要なのは，機器のリスクに順位をつけることである．従って，機器のリスクの順位がはっきりとすることの出来ない区切り方では，リスクベースメンテナンスに有効ではない．分布の状態から，パターン 3 の区切り方がリスクベースメンテナンスに適当であると考えられる．そこで，パターン 3 の場合にける機器のリスクリストの一部を Table 5-5 に示す．全機器のリスクリストについては，付録 C を参照．

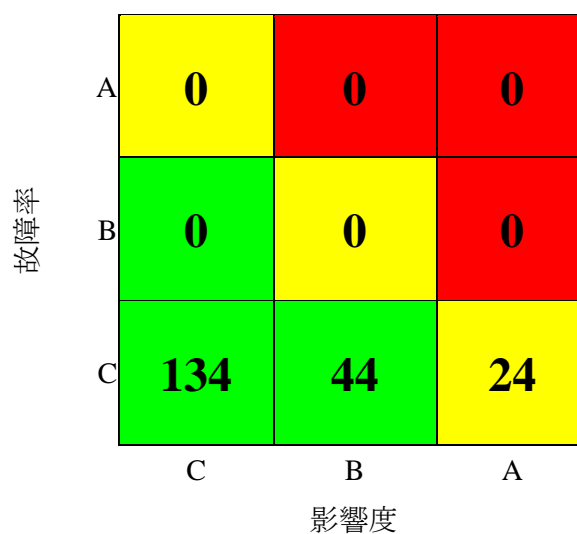


Fig. 5-6 Risk Matrix of Pattern 1

故障率	A	0	0	0
	B	16	5	0
	C	118	39	24
		C	B	A
		影響度		

Fig. 5-7 Risk Matrix of Pattern 2

故障率	A	16	5	0
	B	15	2	0
	C	103	37	24
		C	B	A
		影響度		

Fig. 5-8 Risk Matrix of Pattern 3

Table 5-5 Risk rank

要素	TAG No.	2008年故障率	故障率ランク	影響度	リスクランク	マトリクス位置
GHe受入元弁1	HMV-3301	0.039	C	C	低	1
GHe受入元弁2	HMV-3302	0.036	C	C	低	1
GHe送給元弁	HMV-3303	0.022	C	A	中	3
GHe受入ラインバント弁1	HMV-3305	0.039	C	C	低	1
GHe受入ラインバント弁2	HMV-3306	0.039	C	C	低	1
PG-3301元弁	HMV-3307	0.039	C	C	低	1
PG-3301元弁圧力校正ポート元弁	HMV-3308	0.039	C	C	低	1
GHeカードル圧力計	PG-3301	0.150	C	C	低	1
GHe圧縮機吸入元弁	HMV-3304	0.036	C	A	中	3
PG-3302元弁	HMV-3309	0.039	C	B	低	2
PG-3302圧力校正ポート元弁	HMV-3310	0.039	C	B	低	2
RV-3301元弁	MV-3311	0.022	C	B	低	2
PG-3303元弁	MV-3312	0.039	C	B	低	2
PG-3303圧力校正ポート元弁	MV-3313	0.039	C	B	低	2
RV-3302元弁	MV-3314	0.022	C	B	低	2
PG-3304元弁	MV-3315	0.039	C	B	低	2
PG-3304圧力校正ポート元弁	MV-3316	0.039	C	B	低	2
GHe圧縮機吸入減圧弁1	HPR-3301D	0.023	C	A	中	3
HPR-3301用設定減圧弁	HPR-3301H	0.023	C	B	低	2
GHe圧縮機吸入減圧弁2	PR-3302D	0.023	C	A	中	3
PR-3302用設定減圧弁	PR-3302H	0.023	C	B	低	2
吸入ライン安全弁1	RV-3301	0.050	C	A	中	3
吸入ライン安全弁2	RV-3302	0.050	C	A	中	3
GHe圧縮機吸入圧力計1	PG-3302	0.091	C	B	低	2
GHe圧縮機吸入圧力計2	PG-3303	0.030	C	B	低	2
GHe圧縮機吸入圧力計3	PG-3304	0.301	B	B	中	5
GHe圧縮機吐出止弁1	HMV-3320	0.055	C	B	低	2
GHe圧縮機吐出止弁2	HMV-3321	0.055	C	B	低	2
バイパス充填弁	HMV-3322	0.056	C	A	中	3
PX-3334元弁	HMV-3334	0.055	C	C	低	1
PX-3335元弁	HMV-3335	0.056	C	C	低	1
HRV-3320元弁	HMV-3336	0.055	C	C	低	1
HRV-3321元弁	HMV-3337	0.055	C	C	低	1
GHe圧縮機と出ラインバント弁1	HMV-3338	0.056	C	C	低	1
GHe圧縮機と出ラインバント弁2	HMV-3339	0.055	C	C	低	1
吐出ライン安全弁1	HRV-3320	0.215	C	B	低	2
吐出ライン安全弁2	HRV-3321	0.162	C	B	低	2
気蓄器充填系GHe回収元弁	HMV-3420	0.056	C	B	低	2
共通切換系GHe回収元弁	HMV-3421	0.056	C	B	低	2
一般バージ系GHe回収元弁	HMV-3422	0.055	C	A	中	3
GHe回収弁	HMV-3423	0.039	C	A	中	3
PG-3333元弁	HMV-3424	0.056	C	C	低	1
PG-3333バント弁	HMV-3425	0.054	C	C	低	1
PG-3334元弁	HMV-3426	0.039	C	C	低	1
PG-3334圧力校正ポート元弁	HMV-3427	0.039	C	C	低	1
HRV-3330元弁	HMV-3428	0.039	C	B	低	2
GHe回収圧減圧弁	HPR-3304D	0.058	C	B	低	2
HPR-3304用設定減圧弁	HPR-3304H	0.056	C	B	低	2
GHe回収ライン安全弁	HRV-3330	0.319	B	B	中	5
GHe回収元圧圧力計	PG-3333	0.098	C	C	低	1
GHe回収圧圧力計	PG-3334	0.301	B	C	低	4

## 5.6 結言

本章では，対象範囲内にある各機器のリスクを評価した．

はじめに，影響度の評価手法を概説した．

故障率については，第 4 章で求めた数値を基に，ランク分けについての検討を行った．

最後に，影響度と故障率を組み合わせることによってリスクマトリクスを作成した．また，マトリクス上の領域を 3 段階にリスクランク分けすることで，各機器のリスクランクを示した．これにより，各機器のリスクランクを示すことが可能になり，リスクが高い機器を抽出することが出来た．このランク分け・抽出により，検査プログラムの適切な見直しが容易になると考えられる．

## 第 6 章 結論

本章では，本研究によって得られた結論を示す．



本研究では、種子島宇宙センターの設備にリスクベースメンテナンスを導入するための検討を行ってきた。そのために、宇宙センターの設備の一部を対象として、過去のデータから故障率を算出し、JAXA が行った影響度の調査とあわせることでリスクの評価を行った。また、故障率算出の際に疑問であったことをシミュレーションにより明らかにした。結論を以下に示す。

- 平均順位法において、ワイブル分布の  $\alpha$  (形状母数) の推定を行う際は平均順位法により、観測中断データを出来るだけ考慮に入れたほうが良い結果が得られるが、 $\beta$  (尺度母数) の推定を行う際は観測中断データを考慮に入れないほうが良い結果が得られる
- ベイズ推定において、検査間隔による違いはあまりない
- ベイズ推定において、事前分布の標準偏差の設定は平均値の 10% とすればよい
- ベイズ推定において、少ないデータしか得られない場合でも正しい値に近付いていることが確認できた
- 算出した故障率と影響度を組み合わせることにより、リスクマトリクスを作成した。作成したリスクマトリクスを基に、機器のリスクランクを示し、リスクの高い機器を抽出することができた。このリスクランクにより、検査プログラムの見直しが可能であると考えられる

以上が本論文の結論である。

## 付録 A 影響度評価の結果

第 5 章で行った影響度評価で、全機器の影響度評価結果を示す。

Table A-1 Consequences of all elements

要素	TAGNo.	VAB供給	LPパージ	LP気蓄器	充填/回収	最終評価
GHe受入元弁1	HMV-3301	C	C	C	C	C
GHe受入元弁2	HMV-3302	C	C	C	C	C
GHe送給元弁	HMV-3303	C	C	C	A	A
GHe受入ラインベント弁1	HMV-3305	C	C	C	C	C
GHe受入ラインベント弁2	HMV-3306	C	C	C	C	C
PG-3301元弁	HMV-3307	C	C	C	C	C
PG-3301元弁圧力校正ポート元弁	HMV-3308	C	C	C	C	C
GHe受入フィルタ	HFL-3301	C	C	C	C	C
GHeカードル元圧	PX-3301	C	C	C	C	C
GHeカードル圧力計	PG-3301	C	C	C	C	C
GHe圧縮機吸入元弁	HMV-3304	C	C	C	A	A
PG-3302元弁	HMV-3309	C	C	C	B	B
PG-3302圧力校正ポート元弁	HMV-3310	C	C	C	B	B
RV-3301元弁	MV-3311	C	C	C	B	B
PG-3303元弁	MV-3312	C	C	C	B	B
PG-3303圧力校正ポート元弁	MV-3313	C	C	C	B	B
RV-3302元弁	MV-3314	C	C	C	B	B
PG-3304元弁	MV-3315	C	C	C	B	B
PG-3304圧力校正ポート元弁	MV-3316	C	C	C	B	B
GHe圧縮機吸入減圧弁1	HPR-3301D	C	C	C	A	A
HPR-3301用設定減圧弁	HPR-3301H	C	C	C	B	B
GHe圧縮機吸入減圧弁2	PR-3302D	C	C	C	A	A
PR-3302用設定減圧弁	PR-3302H	C	C	C	B	B
吸入ライン安全弁1	RV-3301	C	C	C	A	A
吸入ライン安全弁2	RV-3302	C	C	C	A	A
吸入フィルタ	HFL-3302	C	C	C	A	A
GHe圧縮機吸入圧力計1	PG-3302	C	C	C	B	B
GHe圧縮機吸入圧力計2	PG-3303	C	C	C	B	B
GHe圧縮機吸入圧力計3	PG-3304	C	C	C	B	B
GHe圧縮機吸入圧	PX-3304	C	C	C	A	A
GHe圧縮機吐出止弁1	HMV-3320	B	C	C	B	B
GHe圧縮機吐出止弁2	HMV-3321	B	C	C	B	B
バイパス充填弁	HMV-3322	C	C	C	A	A
PX-3334元弁	HMV-3334	C	C	C	C	C
PX-3335元弁	HMV-3335	C	C	C	C	C
HRV-3320元弁	HMV-3336	C	C	C	C	C
HRV-3321元弁	HMV-3337	C	C	C	C	C
GHe圧縮機と出ラインベント弁1	HMV-3338	C	C	C	C	C
GHe圧縮機と出ラインベント弁2	HMV-3339	C	C	C	C	C
吐出ライン安全弁1	HRV-3320	C	C	C	B	B
吐出ライン安全弁2	HRV-3321	C	C	C	B	B
バイパス充填逆止弁	HCV-3320	B	C	C	A	A
C-3004吐出圧	PX-3334	C	C	C	B	B
C-3005吐出圧	PX-3335	C	C	C	B	B
C-3004吐出温度	TX-3303	C	C	C	B	B
C-3005吐出温度	TX-3304	C	C	C	B	B

要素	TAG No.	VAB供給	LPパーシ	LP気蓄器	充填/回収	最終評価
気蓄器充填系GHe回収元弁	HMV-3420	C	C	C	B	B
共通切換系GHe回収元弁	HMV-3421	B	B	B	B	B
一般パーシ系GHe回収元弁	HMV-3422	A	C	C	B	A
GHe回収弁	HMV-3423	C	C	C	A	A
PG-3333元弁	HMV-3424	C	C	C	C	C
PG-3333ベント弁	HMV-3425	C	C	C	C	C
PG-3334元弁	HMV-3426	C	C	C	C	C
PG-3334圧力校正ホート元弁	HMV-3427	C	C	C	C	C
HRV-3330元弁	HMV-3428	C	C	C	B	B
GHe回収圧減圧弁	HPR-3304D	C	C	C	B	B
HPR-3304用設定減圧弁	HPR-3304H	C	C	C	B	B
GHe回収ライン安全弁	HRV-3330	C	C	C	B	B
GHe回収元圧圧力計	PG-3333	C	C	C	C	C
GHe回収圧圧力計	PG-3334	C	C	C	C	C
420K GHe貯気槽	TK-3004	C	C	C	C	C
TK-3004元弁	HMV-3326	A	C	C	B	A
HRV-3322元弁	HMV-3342	C	C	C	C	C
PG-3321元弁	HMV-3349	C	C	C	C	C
TK-3004ベント弁	HMV-3350	C	C	C	C	C
TK-3004安全弁	HRV-3322	C	C	C	C	C
TK-3004圧力計	PG-3321	C	C	C	C	C
420K GHe貯気槽	TK-3005	C	C	C	C	C
TK-3005元弁	HMV-3327	A	C	C	B	A
HRV-3323元弁	HMV-3343	C	C	C	C	C
PG-3322元弁	HMV-3351	C	C	C	C	C
TK-3005ベント弁	HMV-3352	C	C	C	C	C
TK-3005安全弁	HRV-3323	C	C	C	C	C
TK-3005圧力計	PG-3321	C	C	C	C	C
420K GHe貯気槽	TK-3006	C	C	C	C	C
TK-3006元弁	HMV-3328	C	C	C	C	C
HRV-3324元弁	HMV-3344	C	C	C	C	C
PG-3324元弁	HMV-3357	C	C	C	C	C
TK-3006ベント弁	HMV-3358	C	C	C	C	C
TK-3006安全弁	HRV-3324	C	C	C	C	C
TK-3006圧力計	PG-3324	C	C	C	C	C
420K GHe貯気槽	TK-3007	C	C	C	C	C
TK-3007元弁	HMV-3329	C	C	C	C	C
HRV-3325元弁	HMV-3345	C	C	C	C	C
PG-3325元弁	HMV-3359	C	C	C	C	C
TK-3007ベント弁	HMV-3360	C	C	C	C	C
TK-3007安全弁	HRV-3325	C	C	C	C	C
TK-3007圧力計	PG-3325	C	C	C	C	C
420K GHe貯気槽	TK-3008	C	C	C	C	C
TK-3008元弁	HMV-3330	B	B	B	B	B
HRV-3326元弁	HMV-3346	C	C	C	C	C
PG-3326元弁	HMV-3361	C	C	C	C	C
TK-3008ベント弁	HMV-3362	C	C	C	C	C
TK-3008安全弁	HRV-3326	C	C	C	C	C
TK-3008圧力計	PG-3326	C	C	C	C	C
420K GHe貯気槽	TK-3009	C	C	C	C	C
TK-3009元弁	HMV-3331	B	B	B	B	B
HRV-3327元弁	HMV-3347	C	C	C	C	C
PG-3327元弁	HMV-3363	C	C	C	C	C
TK-3009ベント弁	HMV-3364	C	C	C	C	C
TK-3009安全弁	HRV-3327	C	C	C	C	C
TK-3009圧力計	PG-3327	C	C	C	C	C
420K GHe貯気槽	TK-3010	C	C	C	C	C
TK-3010元弁	HMV-3332	B	B	B	B	B
HRV-3328元弁	HMV-3348	C	C	C	C	C
PG-3328元弁	HMV-3365	C	C	C	C	C
TK-3010ベント弁	HMV-3366	C	C	C	C	C
TK-3010安全弁	HRV-3328	C	C	C	C	C
TK-3010圧力計	PG-3328	C	C	C	C	C
420K GHe貯気槽	TK-3011	C	C	C	C	C
TK-3011元弁	HMV-3429	B	B	B	B	B

要素	TAGNo.	VAB供給	LPパージ	LP気蓄器	充填/回収	最終評価
PG-3335元弁	HMV-3431	C	C	C	C	C
TK-3011ベント弁	HMV-3432	C	C	C	C	C
TK-3011安全弁	HRV-3331	C	C	C	C	C
TK-3011圧力計	PG-3335	C	C	C	C	C
GHe移充填装置元弁	HMV-3370	C	C	C	C	C
GHe移充填弁1	HMV-3371	C	C	C	C	C
GHe移充填弁2	HMV-3372	C	C	C	C	C
PG-3331元弁	HMV-3373	C	C	C	C	C
PG-3332元弁	HMV-3374	C	C	C	C	C
PG-3332圧力校正ポート元弁	HMV-3375	C	C	C	C	C
HRV-3329元弁	HMV-3376	C	C	C	C	C
41.2MPa GHe移充填ライン元弁	HMV-3433	C	C	C	C	C
41.2Mpa GHe移充填弁	HMV-3434	C	C	C	C	C
GHe移充填装置安全弁	HRV-3329	C	C	C	C	C
GHe移充填装置減圧弁	HPR-3303D	C	C	C	C	C
HPR-3303D設定減圧弁	HPR-3303H	C	C	C	C	C
GHe移充填元圧圧力計	PG-3331	C	C	C	C	C
GHe移充填圧力計	PG-3332	C	C	C	C	C
GHe移充填装置フィルタ	HFL-3324	C	C	C	C	C
GHe移充填ライン	HFL-3325	C	C	C	C	C
一般パージ系GHe貯気槽充填弁 ※	HMV-3323	A	C	C	A	A
共通切換系GHe貯気槽充填弁 ※	HMV-3324	B	B	B	A	A
気蓄器充填系GHe貯気槽充填弁 ※	HMV-3325	B	C	C	A	A
PG-3320元弁	HMV-3340	C	C	C	B	B
PG-3320圧力校正ポート元弁	HMV-3341	C	C	C	B	B
GHe貯気槽充填圧力計	PG-3320	C	C	C	B	B
GHe貯気槽充填フィルタ	HFL-3320	B	C	C	A	A
TS・VAB系420K GHe供給弁	HMV-3333	A	C	C	B	A
PG-3323元弁	HMV-3353	B	C	C	C	B
TS・VAB系420K GHe供給弁バイパス	HMV-3354	B	C	C	C	B
PG-3329元弁	HMV-3367	C	C	C	C	C
PG-3330元弁	HMV-3368	C	C	C	C	C
一般パージ系420KGHe供給弁1	HNV-3320	A	B	C	B	A
一般パージ系420KGHe供給弁2	HNV-3321	B	A	A	A	A
気蓄器充填系420KGHe供給弁1	HNV-3322	B	A	A	A	A
気蓄器充填系420KGHe供給弁2	HNV-3323	C	C	A	B	A
一般パージ系420KGHe供給弁1(バイパス)	HNV-3324	A	C	C	B	A
一般パージ系420KGHe供給弁2(バイパス)	HNV-3325	B	A	B	B	A
気蓄器充填系420KGHe供給弁1(バイパス)	HNV-3326	B	B	B	B	B
気蓄器充填系420KGHe供給弁2(バイパス)	HNV-3327	C	C	C	B	B
一般パージ系GHe圧力計	PG-3323	B	C	C	C	B
共通切替用GHe圧力計	PG-3329	C	C	C	C	C
気蓄器充填系GHe圧力計	PG-3330	C	C	C	C	C
一般パージ系GHe圧力発信器	PX-3323	A	C	C	B	A
共通切替用GHe圧力発信器	PX-3329	B	B	B	B	B
気蓄器充填系GHe圧力発信器	PX-3330	C	C	C	B	B
一般パージ系420KGHe供給逆止弁	HCV-3321	C	A	C	C	A
気蓄器充填系420KGHe供給逆止弁	HCV-3322	C	C	A	C	A
TS・VAB系420K GHe供給ラインサン	HMV-3355	A	C	C	C	A
一般パージ系420K GHe供給ラインサン	HMV-3356	C	A	C	C	A
気蓄器充填系420K GHe供給ラインサン	HMV-3369	C	C	A	C	A
TS・VAB系420K GHe供給フィルタ	HFL-3321	A	C	C	C	A
一般パージ系420K GHe供給フィルタ	HFL-3322	C	A	C	C	A
気蓄器充填系420K GHe供給フィルタ	HFL-3323	C	C	A	C	A
吸入ガス止め弁1	MV-3381	C	C	C	B	B
吸入ガスベント弁1	MV-3382	C	C	C	C	C
バイパス弁1	HMV-3383	C	C	C	C	C
PG-3337元弁	MV-3384	C	C	C	C	C
PG-3337圧力校正ポート元弁	MV-3385	C	C	C	C	C
PS-3301元弁	MV-3386	C	C	C	C	C
PS-3301ベント弁	MV-3387	C	C	C	C	C
HRV-3334元弁	HMV-3388	C	C	C	C	C
PG-3338元弁	HMV-3389	C	C	C	C	C
PG-3338圧力校正ポート元弁	HMV-3390	C	C	C	C	C
RV-3338元弁	MV-3391	C	C	C	C	C

要素	TAG No.	VAB供給	LPパーツ	LP気蓄器	充填/回収	最終評価
PS-3302元弁	MV-3392	C	C	C	C	C
PS-3302ベント弁	MV-3393	C	C	C	C	C
HRV-3335元弁	HMV-3394	C	C	C	C	C
2段吐出ガス元弁1	HMV-3395	C	C	C	B	B
PG-3339元弁	HMV-3396	C	C	C	C	C
PG-3339ベント弁	HMV-3397	C	C	C	C	C
2段吐出ガスベント弁1	HMV-3398	C	C	C	C	C
中間段安全弁1	HRV-3334	C	C	C	B	B
吐出ガス安全弁1	HRV-3335	C	C	C	B	B
吸入ガス安全弁1	RV-3338	C	C	C	B	B
吸入温度計1	TG-3301	C	C	C	C	C
中間段温度計1	TG-3302	C	C	C	C	C
吐出温度計1	TG-3303	C	C	C	C	C
1段吐出ガス温度センサー	TX-3311	C	C	C	B	B
2段吐出ガス温度センサー	TX-3312	C	C	C	B	B
1段吐出ガス温度スイッチ	TS-3301	C	C	C	C	C
2段吐出ガス温度スイッチ	TS-3302	C	C	C	C	C
吸入圧力計1	PG-3337	C	C	C	C	C
中間段圧力計1	PG-3338	C	C	C	C	C
吐出圧力計1	PG-3339	C	C	C	C	C
吸入ガス圧力センサー	PX-3337	C	C	C	B	B
1段吐出ガス圧力センサー	PX-3338	C	C	C	B	B
2段吐出ガス圧力センサー	PX-3339	C	C	C	B	B
低圧側ダイヤフラム破裂表示器1	PS-3301	C	C	C	C	C
高圧側ダイヤフラム破裂表示器1	PS-3302	C	C	C	C	C
吸入ガス圧力スイッチ	PS-3305	C	C	C	C	C
吐出ガス圧力スイッチ	PS-3306	C	C	C	C	C
吸入ガスフィルタ	FL-3301	C	C	C	B	B
一段吐出ガスフィルタ	HFL-3302	C	C	C	B	B
吐出逆止弁1	HCV-3327	C	C	C	B	B
吐出ベント逆止弁1	HCV-3328	C	C	C	B	B
オイルタンクドレン弁1	MV-9301	C	C	C	B	B
PG-9301元弁	MV-9302	C	C	C	C	C
PG-9302元弁	MV-9303	C	C	C	C	C
PG-9303元弁	MV-9304	C	C	C	C	C
PG-9303圧力校正ポート元弁	MV-9305	C	C	C	C	C
1段オイルオーバーフロー弁1	RV-9301	C	C	C	B	B
2段オイルオーバーフロー弁1	RV-9303	C	C	C	B	B
クランクケース油温度計1	TG-9301	C	C	C	C	C
1段側オイル圧力計1	PG-9301	C	C	C	C	C
2段側オイル圧力計1	PG-9302	C	C	C	C	C
潤滑油ポンプ出口圧力計	PG-9303	C	C	C	C	C
潤滑油ポンプ出口圧力スイッチ	PS-9301	C	C	C	C	C
油潤滑用レギュレータ	PR-9301	C	C	C	C	B
1段オイル温度センサー	TX-9301	C	C	C	B	B
2段オイル温度センサー	TX-9302	C	C	C	B	B
クランクケース油温度センサー	TX-9303	C	C	C	B	B
オイルラインフィルタ	FL-9301	C	C	C	B	B
1段側オイル逆止弁	CV-9301	C	C	C	B	B
2段側オイル逆止弁	CV-9302	C	C	C	B	B
油圧アンローダ用電磁弁1	SV-9301	C	C	C	B	B
オイル補償用ポンプ		C	C	C	B	B
潤滑油ポンプ		C	C	C	B	B
油ライン配管		C	C	C	B	B
冷却水ベント弁	MV-8330	C	C	C	B	B
1段ダイヤフラム冷却系元弁	MV-8331	C	C	C	B	B
1段ダイヤフラム冷却系ベント弁	MV-8332	C	C	C	B	B
1段ダイヤフラム冷却系圧力計元弁	MV-8333	C	C	C	B	B
1段ダイヤフラム冷却系圧力計圧力	MV-8334	C	C	C	B	B
1段吐出ガス冷却系元弁	MV-8335	C	C	C	B	B
1段吐出ガス冷却系ベント弁	MV-8336	C	C	C	B	B
1段吐出ガス冷却系圧力計元弁	MV-8337	C	C	C	B	B
1段吐出ガス冷却系圧力計圧力校正	MV-8338	C	C	C	B	B
2段ダイヤフラム冷却系元弁	MV-8339	C	C	C	B	B
2段ダイヤフラム冷却系ベント弁	MV-8340	C	C	C	B	B

要素	TAG No.	VAB供給	LPパーツ	LP気蓄器	充填/回収	最終評価
2段ダイヤフラム冷却系圧力計元弁	MV-8341	C	C	C	B	B
2段ダイヤフラム冷却系圧力計圧力	MV-8342	C	C	C	B	B
2段吐出ガス冷却系元弁	MV-8343	C	C	C	B	B
2段吐出ガス冷却系ベント弁	MV-8344	C	C	C	B	B
2段吐出ガス冷却系圧力計元弁	MV-8345	C	C	C	B	B
2段吐出ガス冷却系圧力計圧力校正	MV-8346	C	C	C	B	B
油ライン冷却系元弁	MV-8347	C	C	C	B	B
油ライン冷却系ベント弁	MV-8348	C	C	C	B	B
油ライン冷却系圧力計元弁	MV-8349	C	C	C	B	B
油ライン冷却系圧力計圧力校正弁	MV-8350	C	C	C	B	B
1段ダイヤフラム冷却系入口温度計	TG-8303	C	C	C	C	C
1段吐出ガス冷却系入口温度計	TG-8304	C	C	C	C	C
2段ダイヤフラム冷却系入口温度計	TG-8305	C	C	C	C	C
2段吐出ガス冷却系入口温度計	TG-8306	C	C	C	C	C
油ライン冷却系入口温度計	TG-8307	C	C	C	C	C
1段ダイヤフラム冷却系出口温度計	TG-8308	C	C	C	C	C
1段吐出ガス冷却系出口温度計	TG-8309	C	C	C	C	C
2段ダイヤフラム冷却系出口温度計	TG-8310	C	C	C	C	C
2段吐出ガス冷却系出口温度計	TG-8311	C	C	C	C	C
油ライン冷却系出口温度計	TG-8312	C	C	C	C	C
1段ダイヤフラム冷却系圧力計	PG-8303	C	C	C	C	C
1段吐出ガス冷却系圧力計	PG-8304	C	C	C	C	C
2段ダイヤフラム冷却系圧力計	PG-8305	C	C	C	C	C
2段吐出ガス冷却系圧力計	PG-8306	C	C	C	C	C
油ライン冷却系圧力計	PG-8307	C	C	C	C	C
1段ダイヤフラム冷却水フロースイッチ	FS-8301	C	C	C	C	C
1段吐出ガス冷却水フロースイッチ	FS-8302	C	C	C	C	C
2段ダイヤフラム冷却水フロースイッチ	FS-8303	C	C	C	C	C
2段吐出ガス冷却水フロースイッチ	FS-8304	C	C	C	C	C
油ライン冷却水フロースイッチ	FS-8305	C	C	C	C	C
ヘッドフランジ		C	C	C	B	B
ヘッドカバー		C	C	C	B	B
ダイヤフラム板		C	C	C	B	B
パフオレート板		C	C	C	B	B
冷却水コイル		C	C	C	B	B
吸入スラストピース		C	C	C	B	B
吐出スラストピース		C	C	C	B	B
吸入段弁		C	C	C	B	B
吐出段弁		C	C	C	B	B
ヘッド用スタッドボルト・ナット		C	C	C	B	B
スラストピース用スタッドボルト		C	C	C	B	B
ヘッドフランジ		C	C	C	B	B
ヘッドカバー		C	C	C	B	B
ダイヤフラム板		C	C	C	B	B
パフオレート板		C	C	C	B	B
冷却水コイル		C	C	C	B	B
吸入スラストピース		C	C	C	B	B
吐出スラストピース		C	C	C	B	B
吸入段弁		C	C	C	B	B
吐出段弁		C	C	C	B	B
ヘッド用スタッドボルト・ナット		C	C	C	B	B
スラストピース用スタッドボルト		C	C	C	B	B
カバー		C	C	C	B	B
ヘルト		C	C	C	B	B
コンロッド		C	C	C	B	B
クランク		C	C	C	B	B
ボルト締結部全般		C	C	C	B	B
フライホイール		C	C	C	B	B
モーター		C	C	C	B	B
1段吐出ガスクーラー		C	C	C	B	B
2段吐出ガスクーラー		C	C	C	B	B
オイルクーラー		C	C	C	B	B
吸入ガス止め弁1	MV-3399	C	C	C	B	B
吸入ガスベント弁1	MV-3400	C	C	C	C	C

要素	TAG No.	VAB供給	LPパーツ	LP気蓄器	充填/回収	最終評価
ハイパス弁1	HMV-3401	C	C	C	C	C
PG-3340元弁	MV-3402	C	C	C	C	C
PG-3340圧力校正ポート元弁	MV-3403	C	C	C	C	C
PS-3303元弁	MV-3404	C	C	C	C	C
PS-3303ベント弁	MV-3405	C	C	C	C	C
HRV-3336元弁	HMV-3406	C	C	C	C	C
PG-3341元弁	HMV-3407	C	C	C	C	C
PG-3341圧力校正ポート元弁	HMV-3408	C	C	C	C	C
RV-3339元弁	MV-3409	C	C	C	C	C
PS-3304元弁	MV-3410	C	C	C	C	C
PS-3304ベント弁	MV-3411	C	C	C	C	C
HRV-3337元弁	HMV-3412	C	C	C	C	C
2段吐出ガス元弁1	HMV-3413	C	C	C	B	B
PG-3342元弁	HMV-3414	C	C	C	C	C
PG-3342ベント弁	HMV-3415	C	C	C	C	C
2段吐出ガスベント弁1	HMV-3416	C	C	C	C	C
中間段安全弁1	HRV-3336	C	C	C	B	B
吐出ガス安全弁1	HRV-3337	C	C	C	B	B
吸入ガス安全弁1	RV-3339	C	C	C	B	B
吸入温度計1	TG-3304	C	C	C	C	C
中間段温度計1	TG-3305	C	C	C	C	C
吐出温度計1	TG-3306	C	C	C	C	C
1段吐出ガス温度センサー	TX-3313	C	C	C	B	B
2段吐出ガス温度センサー	TX-3314	C	C	C	B	B
1段吐出ガス温度スイッチ	TS-3303	C	C	C	C	C
2段吐出ガス温度スイッチ	TS-3304	C	C	C	C	C
吸入圧力計1	PG-3340	C	C	C	C	C
中間段圧力計1	PG-3341	C	C	C	C	C
吐出圧力計1	PG-3342	C	C	C	C	C
吸入ガス圧力センサー	PX-3340	C	C	C	B	B
1段吐出ガス圧力センサー	PX-3341	C	C	C	B	B
2段吐出ガス圧力センサー	PX-3342	C	C	C	B	B
低圧側ダイヤフラム破裂表示器1	PS-3303	C	C	C	C	C
高圧側ダイヤフラム破裂表示器1	PS-3304	C	C	C	C	C
吸入ガス圧力スイッチ	PS-3307	C	C	C	C	C
吐出ガス圧力スイッチ	PS-3308	C	C	C	C	C
吸入ガスフィルタ	FL-3302	C	C	C	B	B
一段吐出ガスフィルタ	HFL-3304	C	C	C	B	B
吐出逆止弁1	HCV-3329	C	C	C	B	B
吐出ベント逆止弁1	HCV-3330	C	C	C	B	B
オイルタンクドレン弁1	MV-9306	C	C	C	B	B
PG-9304元弁	MV-9307	C	C	C	C	C
PG-9305元弁	MV-9308	C	C	C	C	C
PG-9306元弁	MV-9309	C	C	C	C	C
PG-9303圧力校正ポート元弁	MV-9310	C	C	C	C	C
1段オイルオーバーフロー弁1	RV-9303	C	C	C	B	B
2段オイルオーバーフロー弁1	RV-9304	C	C	C	B	B
クランクケース油温度計1	TG-9302	C	C	C	C	C
1段側オイル圧力計1	PG-9304	C	C	C	C	C
2段側オイル圧力計1	PG-9305	C	C	C	C	C
潤滑油ポンプ出口圧力計	PG-9306	C	C	C	C	C
潤滑油ポンプ出口圧力スイッチ	PS-9302	C	C	C	C	C
油潤滑用レギュレータ	PR-9302	C	C	C	C	B
1段オイル温度センサー	TX-9304	C	C	C	B	B
2段オイル温度センサー	TX-9305	C	C	C	B	B
クランクケース油温度センサー	TX-9306	C	C	C	B	B
オイルラインフィルタ	FL-9302	C	C	C	B	B
1段側オイル逆止弁	CV-9303	C	C	C	B	B
2段側オイル逆止弁	CV-9304	C	C	C	B	B
油圧アンロータ用電磁弁1	SV-9302	C	C	C	B	B
オイル補償用ポンプ		C	C	C	B	B
潤滑油ポンプ		C	C	C	B	B
油ライン配管		C	C	C	B	B
冷却水ベント弁	MV-8360	C	C	C	B	B



要素	TAG No.	VAB供給	LPパーツ	LP気蓄器	充填/回収	最終評価
1段タイヤフラム冷却系元弁	MV-8361	C	C	C	B	B
1段タイヤフラム冷却系ベント弁	MV-8362	C	C	C	B	B
1段タイヤフラム冷却系圧力計元弁	MV-8363	C	C	C	B	B
1段タイヤフラム冷却系圧力計圧力	MV-8364	C	C	C	B	B
1段吐出ガス冷却系元弁	MV-8365	C	C	C	B	B
1段吐出ガス冷却系ベント弁	MV-8366	C	C	C	B	B
1段吐出ガス冷却系圧力計元弁	MV-8367	C	C	C	B	B
1段吐出ガス冷却系圧力計圧力校正	MV-8368	C	C	C	B	B
2段タイヤフラム冷却系元弁	MV-8369	C	C	C	B	B
2段タイヤフラム冷却系ベント弁	MV-8370	C	C	C	B	B
2段タイヤフラム冷却系圧力計元弁	MV-8371	C	C	C	B	B
2段タイヤフラム冷却系圧力計圧力	MV-8372	C	C	C	B	B
2段吐出ガス冷却系元弁	MV-8373	C	C	C	B	B
2段吐出ガス冷却系ベント弁	MV-8374	C	C	C	B	B
2段吐出ガス冷却系圧力計元弁	MV-8375	C	C	C	B	B
2段吐出ガス冷却系圧力計圧力校正	MV-8376	C	C	C	B	B
油ライン冷却系元弁	MV-8377	C	C	C	B	B
油ライン冷却系ベント弁	MV-8378	C	C	C	B	B
油ライン冷却系圧力計元弁	MV-8379	C	C	C	B	B
油ライン冷却系圧力計圧力校正	MV-8380	C	C	C	B	B
1段タイヤフラム冷却系入口温度計	TG-8313	C	C	C	C	C
1段吐出ガス冷却系入口温度計	TG-8314	C	C	C	C	C
2段タイヤフラム冷却系入口温度計	TG-8315	C	C	C	C	C
2段吐出ガス冷却系入口温度計	TG-8316	C	C	C	C	C
油ライン冷却系入口温度計	TG-8317	C	C	C	C	C
1段タイヤフラム冷却系出口温度計	TG-8318	C	C	C	C	C
1段吐出ガス冷却系出口温度計	TG-8319	C	C	C	C	C
2段タイヤフラム冷却系出口温度計	TG-8320	C	C	C	C	C
2段吐出ガス冷却系出口温度計	TG-8321	C	C	C	C	C
油ライン冷却系出口温度計	TG-8322	C	C	C	C	C
1段タイヤフラム冷却系圧力計	PG-8308	C	C	C	C	C
1段吐出ガス冷却系圧力計	PG-8309	C	C	C	C	C
2段タイヤフラム冷却系圧力計	PG-8310	C	C	C	C	C
2段吐出ガス冷却系圧力計	PG-8311	C	C	C	C	C
油ライン冷却系圧力計	PG-8312	C	C	C	C	C
1段タイヤフラム冷却水フローズスイッチ	FS-8306	C	C	C	C	C
1段吐出ガス冷却水フローズスイッチ	FS-8307	C	C	C	C	C
2段タイヤフラム冷却水フローズスイッチ	FS-8308	C	C	C	C	C
2段吐出ガス冷却水フローズスイッチ	FS-8309	C	C	C	C	C
油ライン冷却水フローズスイッチ	FS-8310	C	C	C	C	C
ヘッドフランジ		C	C	C	B	B
ヘッドカバー		C	C	C	B	B
タイヤフラム板		C	C	C	B	B
バフオレート板		C	C	C	B	B
冷却水コイル		C	C	C	B	B
吸入スラストピース		C	C	C	B	B
吐出スラストピース		C	C	C	B	B
吸入段弁		C	C	C	B	B
吐出段弁		C	C	C	B	B
ヘッド用スタッドホルト・ナット		C	C	C	B	B
スラストピース用スタッドホルト		C	C	C	B	B
ヘッドフランジ		C	C	C	B	B
ヘッドカバー		C	C	C	B	B
タイヤフラム板		C	C	C	B	B
バフオレート板		C	C	C	B	B
冷却水コイル		C	C	C	B	B
吸入スラストピース		C	C	C	B	B
吐出スラストピース		C	C	C	B	B
吸入段弁		C	C	C	B	B
吐出段弁		C	C	C	B	B
ヘッド用スタッドホルト・ナット		C	C	C	B	B
スラストピース用スタッドホルト		C	C	C	B	B
カバー		C	C	C	B	B
ベルト		C	C	C	B	B

要素	TAG No.	VAB供給	LPパーシ	LP気蓄器	充填/回収	最終評価
コンロッド		C	C	C	B	B
クランク		C	C	C	B	B
ホルト締結部全般		C	C	C	B	B
フライホイール		C	C	C	B	B
モーター		C	C	C	B	B
1段吐出カスクーラー		C	C	C	B	B
2段吐出カスクーラー		C	C	C	B	B
オイルクーラー		C	C	C	B	B
圧縮機吸入ライン		C	C	C	A	A
圧縮機吐出ライン		A	C	C	A	A
C-3004圧縮機ライン		C	C	C	B	B
C-3005圧縮機ライン		C	C	C	B	B
一般ハーン系貯気槽ライン		A	B	C	B	A
共通系貯気槽ライン		B	A	A	A	A
気蓄器系貯気槽ライン		C	C	B	B	B
TK-3004ライン		C	C	C	C	C
TK-3005ライン		C	C	C	C	C
TK-3006ライン		C	C	C	C	C
TK-3007ライン		C	C	C	C	C
TK-3008ライン		C	C	C	C	C
TK-3009ライン		C	C	C	C	C
TK-3010ライン		C	C	C	C	C
TK-3011ライン		C	C	C	C	C
回収ライン		C	C	C	A	A
移充填装置ライン		C	C	C	C	C

## 付録 B リスク評価の結果

第 4 章で行った故障率の算出結果と，第 5 章で行ったリスク評価の結果を故障率が推定できた全機器について示す。

Table B-1 Failure rate and Risk rank of all elements

要素	TAG No.	2008年故障率	故障率ランク	影響度	リスクランク	マトリクス位置
Ghe受入元弁1	HMV-3301	0.039	C	C	低	1
Ghe受入元弁2	HMV-3302	0.036	C	C	低	1
Ghe送給元弁	HMV-3303	0.022	C	A	中	3
Ghe受入ラインベント弁1	HMV-3305	0.039	C	C	低	1
Ghe受入ラインベント弁2	HMV-3306	0.039	C	C	低	1
PG-3301元弁	HMV-3307	0.039	C	C	低	1
PG-3301元弁圧力校正ポート元弁	HMV-3308	0.039	C	C	低	1
GHeカードル圧力計	PG-3301	0.150	C	C	低	1
Ghe圧縮機吸入元弁	HMV-3304	0.036	C	A	中	3
PG-3302元弁	HMV-3309	0.039	C	B	低	2
PG-3302圧力校正ポート元弁	HMV-3310	0.039	C	B	低	2
RV-3301元弁	MV-3311	0.022	C	B	低	2
PG-3303元弁	MV-3312	0.039	C	B	低	2
PG-3303圧力校正ポート元弁	MV-3313	0.039	C	B	低	2
RV-3302元弁	MV-3314	0.022	C	B	低	2
PG-3304元弁	MV-3315	0.039	C	B	低	2
PG-3304圧力校正ポート元弁	MV-3316	0.039	C	B	低	2
Ghe圧縮機吸入減圧弁1	HPR-3301D	0.023	C	A	中	3
HPR-3301用設定減圧弁	HPR-3301H	0.023	C	B	低	2
Ghe圧縮機吸入減圧弁2	PR-3302D	0.023	C	A	中	3
PR-3302用設定減圧弁	PR-3302H	0.023	C	B	低	2
吸入ライン安全弁1	RV-3301	0.050	C	A	中	3
吸入ライン安全弁2	RV-3302	0.050	C	A	中	3
Ghe圧縮機吸入圧力計1	PG-3302	0.091	C	B	低	2
Ghe圧縮機吸入圧力計2	PG-3303	0.030	C	B	低	2
Ghe圧縮機吸入圧力計3	PG-3304	0.301	B	B	中	5
Ghe圧縮機吐出止弁1	HMV-3320	0.055	C	B	低	2
Ghe圧縮機吐出止弁2	HMV-3321	0.055	C	B	低	2
バイパス充填弁	HMV-3322	0.056	C	A	中	3
PX-3334元弁	HMV-3334	0.055	C	C	低	1
PX-3335元弁	HMV-3335	0.056	C	C	低	1
HRV-3320元弁	HMV-3336	0.055	C	C	低	1
HRV-3321元弁	HMV-3337	0.055	C	C	低	1
Ghe圧縮機と出ラインベント弁1	HMV-3338	0.056	C	C	低	1
Ghe圧縮機と出ラインベント弁2	HMV-3339	0.055	C	C	低	1
吐出ライン安全弁1	HRV-3320	0.215	C	B	低	2
吐出ライン安全弁2	HRV-3321	0.162	C	B	低	2
気蓄器充填系Ghe回収元弁	HMV-3420	0.056	C	B	低	2
共通切換系Ghe回収元弁	HMV-3421	0.056	C	B	低	2
一般バージ系Ghe回収元弁	HMV-3422	0.055	C	A	中	3
Ghe回収弁	HMV-3423	0.039	C	A	中	3
PG-3333元弁	HMV-3424	0.056	C	C	低	1
PG-3333ベント弁	HMV-3425	0.054	C	C	低	1
PG-3334元弁	HMV-3426	0.039	C	C	低	1
PG-3334圧力校正ポート元弁	HMV-3427	0.039	C	C	低	1
HRV-3330元弁	HMV-3428	0.039	C	B	低	2
Ghe回収圧減圧弁	HPR-3304D	0.058	C	B	低	2
HPR-3304用設定減圧弁	HPR-3304H	0.056	C	B	低	2
Ghe回収ライン安全弁	HRV-3330	0.319	B	B	中	5
Ghe回収元圧圧力計	PG-3333	0.098	C	C	低	1
Ghe回収圧圧力計	PG-3334	0.301	B	C	低	4

要素	TAG No.	2008年故障率	故障率ランク	影響度	リスクランク	マトリクス位置
TK-3004元弁	HMV-3326	0.057	C	A	中	3
HRV-3322元弁	HMV-3342	0.056	C	C	低	1
PG-3321元弁	HMV-3349	0.056	C	C	低	1
TK-3004ベント弁	HMV-3350	0.056	C	C	低	1
TK-3004安全弁	HRV-3322	0.081	C	C	低	1
TK-3004圧力計	PG-3321	0.150	C	C	低	1
TK-3005元弁	HMV-3327	0.057	C	A	中	3
HRV-3323元弁	HMV-3343	0.055	C	C	低	1
PG-3322元弁	HMV-3351	0.062	C	C	低	1
TK-3005ベント弁	HMV-3352	0.056	C	C	低	1
TK-3005安全弁	HRV-3323	0.075	C	C	低	1
TK-3005圧力計	PG-3322	0.098	C	C	低	1
420K Ghe貯気槽	TK-3006	0.266	C	C	低	1
TK-3006元弁	HMV-3328	0.056	C	C	低	1
HRV-3324元弁	HMV-3344	0.056	C	C	低	1
PG-3324元弁	HMV-3357	0.056	C	C	低	1
TK-3006ベント弁	HMV-3358	0.056	C	C	低	1
TK-3006安全弁	HRV-3324	0.319	B	C	低	4
TK-3006圧力計	PG-3324	0.098	C	C	低	1
TK-3007元弁	HMV-3329	0.056	C	C	低	1
HRV-3325元弁	HMV-3345	0.055	C	C	低	1
PG-3325元弁	HMV-3359	0.055	C	C	低	1
TK-3007ベント弁	HMV-3360	0.056	C	C	低	1
TK-3007安全弁	HRV-3325	0.161	C	C	低	1
TK-3007圧力計	PG-3325	0.091	C	C	低	1
TK-3008元弁	HMV-3330	0.056	C	B	低	2
HRV-3326元弁	HMV-3346	0.056	C	C	低	1
PG-3326元弁	HMV-3361	0.054	C	C	低	1
TK-3008ベント弁	HMV-3362	0.056	C	C	低	1
TK-3008安全弁	HRV-3326	0.155	C	C	低	1
TK-3008圧力計	PG-3326	0.091	C	C	低	1
TK-3009元弁	HMV-3331	0.055	C	B	低	2
HRV-3327元弁	HMV-3347	0.057	C	C	低	1
PG-3327元弁	HMV-3363	0.055	C	C	低	1
TK-3009ベント弁	HMV-3364	0.054	C	C	低	1
TK-3009安全弁	HRV-3327	0.319	B	C	低	4
TK-3009圧力計	PG-3327	0.098	C	C	低	1
TK-3010元弁	HMV-3332	0.056	C	B	低	2
HRV-3328元弁	HMV-3348	0.057	C	C	低	1
PG-3328元弁	HMV-3365	0.056	C	C	低	1
TK-3010ベント弁	HMV-3366	0.057	C	C	低	1
TK-3010安全弁	HRV-3328	0.319	B	C	低	4
TK-3010圧力計	PG-3328	0.091	C	C	低	1
TK-3011元弁	HMV-3429	0.055	C	B	低	2
HRV-3331元弁	HMV-3430	0.057	C	C	低	1
PG-3335元弁	HMV-3431	0.055	C	C	低	1
TK-3011ベント弁	HMV-3432	0.055	C	C	低	1
TK-3011安全弁	HRV-3331	0.075	C	C	低	1
TK-3011圧力計	PG-3335	0.098	C	C	低	1
Ghe移充填装置元弁	HMV-3370	0.062	C	C	低	1
Ghe移充填弁1	HMV-3371	0.026	C	C	低	1
Ghe移充填弁2	HMV-3372	0.039	C	C	低	1
PG-3331元弁	HMV-3373	0.055	C	C	低	1

要素	TAG No.	2008年故障率	故障率ランク	影響度	リスクランク	マトリクス位置
PG-3332元弁	HMV-3374	0.028	C	C	低	1
PG-3332圧力校正ポート元弁	HMV-3375	0.039	C	C	低	1
HRV-3329元弁	HMV-3376	0.039	C	C	低	1
41.2MPa GHe移充填ライン元弁	HMV-3433	0.039	C	C	低	1
41.2Mpa GHe移充填弁	HMV-3434	0.026	C	C	低	1
GHe移充填装置安全弁	HRV-3329	0.291	B	C	低	4
GHe移充填装置減圧弁	HPR-3303D	0.033	C	C	低	1
HPR-3303D設定減圧弁	HPR-3303H	0.023	C	C	低	1
GHe移充填元圧圧力計	PG-3331	0.091	C	C	低	1
GHe移充填圧力計	PG-3332	0.150	C	C	低	1
一般バージ系GHe貯気槽充填弁	HMV-3323	0.057	C	A	中	3
共通切換系GHe貯気槽充填弁	HMV-3324	0.056	C	A	中	3
気蓄器充填系GHe貯気槽充填弁	HMV-3325	0.062	C	A	中	3
PG-3320元弁	HMV-3340	0.058	C	B	低	2
PG-3320圧力校正ポート元弁	HMV-3341	0.055	C	B	低	2
GHe貯気槽充填圧力計	PG-3320	0.091	C	B	低	2
TS・VAB系420K GHe供給弁	HMV-3333	0.056	C	A	中	3
PG-3323元弁	HMV-3353	0.062	C	B	低	2
TS・VAB系420K GHe供給弁バイパス弁	HMV-3354	0.059	C	B	低	2
PG-3329元弁	HMV-3367	0.057	C	C	低	1
PG-3330元弁	HMV-3368	0.057	C	C	低	1
一般バージ系420KGHe供給弁1	HNV-3320	0.099	C	A	中	3
一般バージ系420KGHe供給弁2	HNV-3321	0.099	C	A	中	3
気蓄器充填系420KGHe供給弁1	HNV-3322	0.055	C	A	中	3
気蓄器充填系420KGHe供給弁2	HNV-3323	0.063	C	A	中	3
一般バージ系420KGHe供給弁1(バイパス弁)	HNV-3324	0.046	C	A	中	3
一般バージ系420KGHe供給弁2(バイパス弁)	HNV-3325	0.099	C	A	中	3
気蓄器充填系420KGHe供給弁1(バイパス弁)	HNV-3326	0.087	C	B	低	2
気蓄器充填系420KGHe供給弁2(バイパス弁)	HNV-3327	0.055	C	B	低	2
一般バージ系GHe圧力計	PG-3323	0.098	C	B	低	2
共通切替用GHe圧力計	PG-3329	0.091	C	C	低	1
気蓄器充填系GHe圧力計	PG-3330	0.301	B	C	低	4
TS・VAB系420K GHe供給ラインサンプリング弁	HMV-3355	0.056	C	A	中	3
一般バージ系420K GHe供給ラインサンプリング弁	HMV-3356	0.056	C	A	中	3
気蓄器充填系420K GHe供給ラインサンプリング弁	HMV-3369	0.056	C	A	中	3
吸入ガス止め弁1	MV-3381	0.039	C	B	低	2
吸入ガスベント弁1	MV-3382	0.039	C	C	低	1
バイパス弁1	HMV-3383	0.055	C	C	低	1
PG-3337元弁	MV-3384	0.039	C	C	低	1
PG-3337圧力校正ポート元弁	MV-3385	0.039	C	C	低	1
PS-3301元弁	MV-3386	0.039	C	C	低	1
PS-3301ベント弁	MV-3387	0.039	C	C	低	1
HRV-3334元弁	HMV-3388	0.056	C	C	低	1
PG-3338元弁	HMV-3389	0.056	C	C	低	1
PG-3338圧力校正ポート元弁	HMV-3390	0.056	C	C	低	1
RV-3338元弁	MV-3391	0.039	C	C	低	1
PS-3302元弁	MV-3392	0.039	C	C	低	1
PS-3302ベント弁	MV-3393	0.039	C	C	低	1
HRV-3335元弁	HMV-3394	0.056	C	C	低	1

要素	TAG No.	2008年故障率	故障率ランク	影響度	リスクランク	マトリクス位置
2段吐出ガス元弁1	HMV-3395	0.056	C	B	低	2
PG-3339元弁	HMV-3396	0.056	C	C	低	1
PG-3339ベント弁	HMV-3397	0.056	C	C	低	1
2段吐出ガスベント弁1	HMV-3398	0.056	C	C	低	1
中間段安全弁1	HRV-3334	0.074	C	B	低	2
吐出ガス安全弁1	HRV-3335	0.319	B	B	中	5
吸入ガス安全弁1	RV-3338	0.050	C	B	低	2
吸入圧力計1	PG-3337	0.255	C	C	低	1
中間段圧力計1	PG-3338	0.207	C	C	低	1
吐出圧力計1	PG-3339	0.207	C	C	低	1
1段側オイル圧力計1	PG-9301	0.255	C	C	低	1
2段側オイル圧力計1	PG-9302	0.091	C	C	低	1
潤滑油ポンプ出口圧力計	PG-9303	0.207	C	C	低	1
1段ダイヤフラム冷却系圧力計	PG-8303	0.211	C	C	低	1
1段吐出ガス冷却系圧力計	PG-8304	0.207	C	C	低	1
2段ダイヤフラム冷却系圧力計	PG-8305	0.301	B	C	低	4
2段吐出ガス冷却系圧力計	PG-8306	0.301	B	C	低	4
油ライン冷却系圧力計	PG-8307	0.301	B	C	低	4
吸入ガス止め弁1	MV-3399	0.039	C	B	低	2
吸入ガスベント弁1	MV-3400	0.039	C	C	低	1
バイパス弁1	HMV-3401	0.056	C	C	低	1
PG-3340元弁	MV-3402	0.039	C	C	低	1
PG-3340圧力校正ポート元弁	MV-3403	0.039	C	C	低	1
PS-3303元弁	MV-3404	0.039	C	C	低	1
PS-3303ベント弁	MV-3405	0.039	C	C	低	1
HRV-3336元弁	HMV-3406	0.056	C	C	低	1
PG-3341元弁	HMV-3407	0.056	C	C	低	1
PG-3341圧力校正ポート元弁	HMV-3408	0.056	C	C	低	1
RV-3339元弁	MV-3409	0.039	C	C	低	1
PS-3304元弁	MV-3410	0.039	C	C	低	1
PS-3304ベント弁	MV-3411	0.039	C	C	低	1
HRV-3337元弁	HMV-3412	0.056	C	C	低	1
2段吐出ガス元弁1	HMV-3413	0.056	C	B	低	2
PG-3342元弁	HMV-3414	0.056	C	C	低	1
PG-3342ベント弁	HMV-3415	0.056	C	C	低	1
2段吐出ガスベント弁1	HMV-3416	0.056	C	C	低	1
中間段安全弁1	HRV-3336	0.319	B	B	中	5
吐出ガス安全弁1	HRV-3337	0.319	B	B	中	5
吸入圧力計1	PG-3340	0.301	B	C	低	4
中間段圧力計1	PG-3341	0.207	C	C	低	1
吐出圧力計1	PG-3342	0.098	C	C	低	1
1段側オイル圧力計1	PG-9304	0.091	C	C	低	1
2段側オイル圧力計1	PG-9305	0.301	B	C	低	4
潤滑油ポンプ出口圧力計	PG-9306	0.301	B	C	低	4
1段ダイヤフラム冷却系圧力計	PG-8308	0.301	B	C	低	4
1段吐出ガス冷却系圧力計	PG-8309	0.301	B	C	低	4
2段ダイヤフラム冷却系圧力計	PG-8310	0.301	B	C	低	4
2段吐出ガス冷却系圧力計	PG-8311	0.301	B	C	低	4
油ライン冷却系圧力計	PG-8312	0.301	B	C	低	4

## 参考文献

- [1] 酒井信介：“リスクベース工学導入のための課題”，機械の研究，第59巻，第7号，(2007)，521-531
- [2] 木原重光，富士彰夫 共著：“RBI/RBM 入門”，日本プラントメンテナンス協会，(2002)
- [3] 酒井信介：金属学会誌，66，1170，(2002).
- [4] 小林英男：日本機会学会誌，106，846，(2003)
- [5] API Publication581：“Risk-Based Inspection Base Resource Document”，(2000)
- [6] 篠田治人：“宇宙ロケット地上設備におけるリスクベースメンテナンスの検討”，(2009)
- [7] 滝川善之：“ロケット地上設備のリスクベースメンテナンス評価”，(2010)
- [8] 野中保雄：“信頼性データの取り方、まとめ方”，日科技連，(1983)
- [9] 市川昌弘：“信頼性工学”，裳花房，(1990)
- [10] Leonard G. Johnson：“The Statistical Treatment of Fatigue Experiments”，Elsevier，59，(1964)
- [11] 酒井信介：“リスクベース検査における機器の破損確率データベース収集のためのベイズ定理の応用（第一報 ベイズの定理の原理）”，圧力技術，第42巻，第5号，(2004)，284-290
- [12] M. Matsumoto and T. Nishimura：“Mersenne Twister: A 623-dimensionally equidistributed uniform pseudorandom number generator”，ACM Trans. on Modeling and Computer Simulation Vol. 8, No. 1, January pp.3-30, (1998)
- [13] 椎原裕美 他：“開発した世界初となる船用機関・機器を含めた回転機械のRBMシステムの概要”，日本船舶海洋工学会講演会論文集，(2008)
- [14] JAXA：“射点系保全手順書”，(1998~2007)



# 謝辞

本研究は、東京大学大学院工学系研究科 酒井信介教授の御指導のもとに進められました。酒井先生には、大変お忙しい中、様々な御指導、御鞭撻や助言等を戴きました。至らない私がこうして研究を一つの形としてまとめることが出来たのも、先生の御指導のおかげです。本当にありがとうございました。

また、本研究は、独立行政法人 宇宙航空研究開発機構(JAXA)との共同研究として行われてきました。JAXA 安全信頼性推進部の関田隆一様には、研究を進めていく上での指針を示して戴き、またある時には助言を戴きました。多くの方のお力添えにより、研究を進めてくることが出来ました。この場を借りて篤くお礼申し上げます。

本研究を進めるにあたっては、泉聡志准教授、田中展助教をはじめ、酒井・泉研究室の皆様にお世話になりました。研究室の先輩方にも研究の進め方、論文の書き方など具体的にアドバイスをいただき、とても参考になりました。本当にありがとうございました。

簡単ではありますが、以上をもって私の謝辞とさせていただきます。ありがとうございました。

以上

p.1~p.81 完

平成23年2月4日提出

90223 桐谷聡一