

卒業論文

確率論的破壊力学評価システムの開発 と構造健全性評価への応用

1 P ~ 43P完

平成 17 年 2 月 4 日提出

指導教官 酒井信介教授

30233 山崎康平

目次

第 1 章 序論	5
1.1 研究の背景	6
1.1.1 従来の社会基盤設備検査	6
1.1.2 リスクベース検査 (RBI)	6
1.1.3 破損確率評価	7
1.1.4 問題点	8
1.2 研究の目的	9
1.3 論文の構成	9
第 2 章 理論	10
2.1 緒言	11
2.2 限界状態設計法	11
2.3 FORM	12
2.4 破壊評価線図法	15
2.5 疲労き裂進展	17
第 3 章 破損確率評価システムの意義・特徴	18
3.1 緒言	19
3.2 限界状態設計法	20
3.3 確率評価	20
3.4 検査効果評価	20
3.5 簡便評価	22
3.6 検査合理化	22
第 4 章 破損確率評価システムの作成	23
4.1 緒言	24
4.2 解析モデル	24
4.3 データ入力	24
4.4 出力データ	25
4.5 検証	25
4.5.1 確率評価の検証	25
4.5.2 検査効果評価の検証	29

第 5 章 破損確率評価システムによる検査合理化	31
5.1 緒言	32
5.2 従来 of 定期検査	32
5.3 考察	33
5.4 結言	34
第 6 章 結論	35
付録	37
緒言	37
破損確率評価システムの実行手順	37
シート作成	38
例	38
検査なし	39
定期検査	40
不定期検査	41
故障率	41
参考文献	42

図表目次

図 1	リスクマトリクス	6
図 2 (左)	標準正規空間における設計点と信頼性座標	14
図 3 (右)	非線形限界状態関数と設計点	14
図 4	破壊評価線図	16
図 5	破損確率評価システムの位置付け	19
図 6	検出確率	21
図 7	解析モデル	24
図 8	検証モデル	25
図 9	一次膜応力と破損確率の関係	26
図 10	標準偏差と破損確率の関係	27
図 11	指数分布の場合・中央値 26mm	27
図 12	指数分布の場合・中央値 5mm	28
図 13	二次膜応力と破損確率の関係	28
図 14	検査なし累積破損確率の比較	29
図 15	検査あり故障率の比較	30
図 17	故障率の推移、Poor検査	33
図 18	故障率の推移、Good検査	34
図 19	メニューバー	37
図 20	破損確率評価システムの実行手順フローチャート	37
図 21	初期条件シート	38
図 22	例パラメータ	38
図 23	検査なしの累積破損確率	39
図 24	定期検査ウィンドウ	40
図 25	定期検査の累積破損確率	40
図 26	不定期検査ウィンドウ	41
図 27	故障率ウィンドウ	41
表 1	240 ヶ月目の累積破損確率	32

第1章 序論

1.1 研究の背景

1.1.1 従来の社会基盤設備検査

近年、我が国では、戦後の高度経済成長期に建設された多くの社会基盤設備の老朽化が進行し、更新時期を迎えつつあるものの、新規設備への投資が困難である事情から、経年構造物を適切な管理のもとに使用する必要性が高まっている¹⁾。そのため、今まで以上の検査によりその損傷、異常を診断することが必要不可欠となっている。しかしながら、現状と同様の画一的な定期検査では、検査による信頼性の向上は、検査間隔を短くすることや検査対象部位の追加を行うなどの検査内容を拡充することでしか達成できず、コスト面での問題が大きい。限られた時間や資源を用いて、本当に必用のある箇所に検査を集中させたい場合、検査の都度に検査計画の見直しを行い、柔軟に計画を変更する必要がある。そこで安全性の客観性を向上させ、合理化された検査計画の作成を行う手法としてリスクベース検査が注目されている。

1.1.2 リスクベース検査（RBI）

リスクベース検査(Risk Based Inspection)とは、『リスク』を基準として検査計画をたてる手法である。ここで言う『リスク』とは、「故障、破損の起こりやすさ」と「起きた場合の被害の大きさ」の積として表現されるものである²⁾。

リスクマトリクスはこれをわかりやすい図にしたものである。リスクにより検査の優先順位が容易に得られ、検査が効率的に行えるだけでなく、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、経済的でもあるという利点がある。

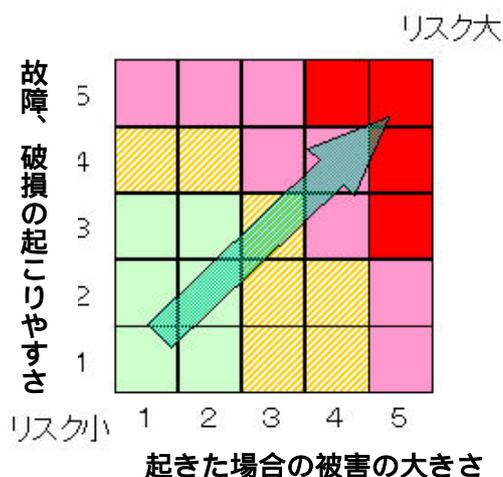


図 1 リスクマトリクス

リスクベース検査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リスクベース検査の規格・基準の整備が行われている状況である。

1.1.3 破損確率評価

リスク評価は前節で述べたとおり、各部位の破損確率と影響度の両者を加味して行われる。影響度については同じ工学分野であっても、対象とする機器や、安全に対する考え方によってさまざまな定義が存在し得る。一方、破損確率については評価するパラメータとしてはさまざまなものが考えられるものの、その評価法については共通して利用することができる。破損確率の評価手法は、主に信頼性工学分野において取り扱われてきたが、本研究ではその中でも、リスク評価において重要になると考えられる限界状態関数を用いた近似評価手法を利用する。

限界状態関数を用いた破損確率評価の説明は 2.2 節で行う、ここでは主にこの考え方が採用されてきた構造分野において、設計の中でどのように利用されてきたかを述べる³⁾。経験的な安全率を用いて行う設計法と対比して、破損確率や信頼性指標に対して目標値を設定した上で設計を行う方法を信頼性設計という。信頼性設計は土木・建築分野で積極的に活用されており、特に欧米においては 30 年以上も前から設計法に導入されている。わが国では、構造信頼性に基づく設計法の代表的なものとして、日本建築学会より刊行された設計指針が挙げられるが、いまだ建築基準法の中に取り入れられるには至っていない。また、機械設計では、信頼性設計法は必ずしも十分に導入されていないのが現状である。

強度に対して安全率を設定した上で設計を行う、いわゆる許容応力度設計法と比較して、信頼性設計はどのような点で優れているかを文献を参考にしながら以下のように列挙してみる。

- ・ 技術的根拠が明快であること。
- ・ 最新の研究、技術開発成果を容易に取り込める柔軟性をもつこと。
- ・ 設計で目標とする性能が明快であること。
- ・ 安全率に基づく設計で陥りがちな、システム全体として過度の裕度の設計を避けることができること。

については、設計者が積極的に安全を意図した設計を行うとする動機付けを与えるためにも重要である。安全率に基づく設計が、どちらかという決まりごと、という色彩が濃いのに対して、信頼性設計は、 に示すとおり明確に設定した性能に対して、技術的根拠をもって行う設計法である。性能は後述する限界状態関数によって表現される。また、

安全率は、設計規格などの中にひとたび記載されてしまうと、この数値の根拠が明確ではないにもかかわらず、値を変更することは容易ではない。その結果として、にあるように、設計法が硬直化し、最新の技術を柔軟に設計法に取り入れることが困難となってしまう。

については、例えば多くの強度パラメータが破壊評価式に存在する場合に、強度パラメータすべてについて公称値に対する安全率を考慮して設計すると、過度に裕度の高い設計となってしまう合理的でない。これは安全率に基づく設計が、どのような機能を意図して設計するのかという目標が明確でないことに起因する欠点であるものと考えられる。つまり安全率に基づく設計では、目標としている性能が崩壊防止であるのか、疲労破壊防止であるのか、脆性破壊防止であるのか、明確になっていないことが問題なのである。

1.1.4 問題点

API の発行するガイドライン API581 には破損頻度の算出が記述されているが、米国の石油化学系プラントに限定したものであり、根拠も詳しく述べられていないため、環境の違う日本の石油化学系プラントや、他のプラント・機器にはそのまま適用できない。

日本の機械設計分野においては「故障、破損の起こりやすさ」を定量的に求める破壊確率評価は、これまであまり行われておらず、行われていたとしても、前節で述べた強度に対して安全率を設計する許容応力度設計法により評価されてきた。この設計法は、経年構造物の運用期間をなるべく長くしたい近年の状況においては、安全性を過大に評価するため好ましいものではない。しかし、信頼性工学を用いた破損確率評価手法はシステム化されておらず、誰もが簡便に破損確率の評価ができないのが現状である。また、これまでは検査の効果を定量的に評価するシステムも存在しなかった。

機器の破損確率を簡便に求めることができ、検査の効果も評価できるシステムが作成されれば、破損確率を指標として、合理的な検査計画の作成が可能となると考えられる。

1.2 研究の目的

本研究では、以下の特徴をもつ破損確率評価システムを作成し、従来の定期検査よりも合理化された検査計画を作成することを目的とする。

- ・従来の許容応力度設計法による評価ではなく、信頼性工学における信頼性設計法を用いることで、安全性が過大にならない破損確率評価を行う。
- ・検査の効果が定量的に評価できることにより、合理化された検査計画の作成が可能となる。
- ・破壊力学や信頼性工学などに精通していない者でも簡便に破損確率評価が行える。

1.3 論文の構成

第1章 序論では、本研究の背景と目的を示した。

第2章 理論では、システム作成に利用した理論について説明する。

第3章 破損確率評価システムの意義・特徴では、システムを作成する意義や、システムに設けた特徴を示す。

第4章 破損確率評価システムの作成では、システムを作成するにあたり、取り決めた制約条件と、算出した確率の検証を行う。

第5章 破損確率評価システムによる検査合理化では、作成したシステムにより算出した破損確率を基に、合理化した検査計画の作成を行う。

第6章 結論では、本研究のまとめを行う

第2章 理論

2.1 緒言

本章では破損確率評価システムを作成する上で必要となる以下の理論について述べる。

- ・ 限界状態設計法
- ・ FORM
- ・ 破壊評価線図法
- ・ 疲労き裂進展

2.2 限界状態設計法

信頼性設計法³⁾の代表的なものは土木・建築分野の荷重・耐力係数設計法(load and resistance factor design: LRFD)で、米国では、この名称で呼ばれる。一方、欧州では部分安全係数方式(partial safety factor design)と呼ばれている。この方法は、限界状態を設定した上で設計が行われることから、限界状態設計法と呼ばれることも多い。

信頼性設計では、システム全体の目標信頼性を設定し、この目標を達成するための各設計変数の安全率(部分安全係数)を決定する。このためには、各設計変数がばらつきをもつ場合のシステムの破損確率 P を評価することが必要になる。 P は一般に次式からもとまる。

$$P_f = \int \int \cdots \int_{g(X) < 0} f_X(X) dx \quad \text{数式 1}$$

$f_X(X)$ は設計変数の同時確率密度関数である。また、 $g(X)$ は破損状態を定義する関数で、負領域が破損領域を示す。 $g(X)$ は限界状態関数とも呼ばれ、通常、システムの安全性に関する状態を表現する関数であるが、有害な変形や人間の快適性などの使用性を表現する関数であってもよい。限界状態関数に基づいて信頼性設計を行う手法を限界状態設計と呼ぶ。(数式1)の評価は、設計変数の数が多い場合や、 $f_X(X)$ や $g(X)$ の関数が単純ではない場合には、容易に評価することはできない。そこで、(数式1)を近似評価する手法の開発が信頼性理論の主要なテーマの1つとなってきた。その代表は限界状態曲面を単純な関数で置き換えることにより近似的に評価する方法であり、FORM(first-order reliability method)やSORM(second-order reliability method)が典型的なものである。

2.3 FORM

単純な例題を用いて FORM について説明する。

正規変数かつ限界状態関数が線形の場合

機械設計で典型的なケースとして、荷重 S と強度 R が設計変数である場合に、限界状態関数 g は次式で与えられる。

$$g = R - S \quad \text{数式 2}$$

S と R が正規分布し、各々の平均値が μ_S, μ_R 、標準偏差が σ_S, σ_R であるとする。下式によって標準正規変数に変換する。標準正規変数に変換しない場合、後述する β の値に統一性がなくなってしまうためである。

$$S' = \frac{S - \mu_S}{\sigma_S}, R' = \frac{R - \mu_R}{\sigma_R} \quad \text{数式 3}$$

標準正規変数を用いると g は次式に変換される。

$$g = \sigma_R R' - \sigma_S S' + \mu_R - \mu_S \quad \text{数式 4}$$

$g = 0$ の線は、標準正規空間内で図 2 のように表示される。原点 O は平均値に対応し、安全領域に入っている。 $g = 0$ の上であって、原点からの距離が最短となる点を d とするとき、 d のことを設計点 (design point) と呼ぶ。設計点と原点との距離を β とすると、 β が小さくなるほど破損領域が拡大し、破損確率が増大することは明らかである。したがって距離が一般化した信頼性の指標になることを Hasofer and Lind が示した。 β は信頼性指標 (reliability index) と呼ばれる。図の幾何的な関係より、

$$\beta = \frac{\mu_R - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} \quad \text{数式 5}$$

限界状態関数が 1 次関数であり、変数がすべて正規分布である場合には、破損確率は次式から厳密に評価される。

$$P_f = \Phi(-\beta) \quad \text{数式 6}$$

ここに $\Phi(\cdot)$ は標準正規分布関数である。設計点の座標 (R^*, S^*) をもとの座標空間に戻し

た座標を (R^*, S^*) とするとき、2つの変数に対する部分安全係数は次式となる。

$$\gamma_R = \frac{R^*}{\mu_R}, \gamma_S = \frac{S^*}{\mu_S} \quad \text{数式 7}$$

このように、システム全体の信頼性指標 β と、個々の設計変数の部分安全係数を結びつけることができる。逆に、 β 値を目標信頼性として先に与え、これを満足するように各変数の部分安全係数を決定することもできる。この場合には、各変数の平均値をシフトしながら繰返し計算を行い、 β 値が目標信頼性に到達した時点で計算を打ち切る。種々の目標信頼性のレベルごとにこのような部分安全係数の一覧表を求めておけば、この表に基づいて行われた設計は自動的に目標信頼性を満足することになり、信頼性設計の実施が容易となる。なお、設計変数が複数存在する場合であっても、限界状態関数がこれらの線形結合で表現される場合には、上記の手順はそのまま適用することができる。

正規変数かつ限界状態関数が非線形の場合

限界状態関数が非線形で、設計変数がすべて正規分布する場合も、類似の手順で部分安全係数の評価ができる。簡単な例として、断面 A の棒に単軸荷重 f を受けるシステムを考える。破壊基準が降伏であるときには、限界状態関数は

$$g = \sigma_y A - f \quad \text{数式 8}$$

ただし、 σ_y は材料の降伏応力である。いま、 f が確定値、 σ_y と A が正規分布するとすると、 $g = 0$ の限界状態曲線は標準正規空間内で明らかに非線形となる。したがって、原点から最短となる設計点 d を決定した上でその距離 β を求めることは、 g が線形である場合に比べ、多少複雑な手続きが必要である。設計点を求めるためにさまざまな方法が提案されているが、 g の関数形状がなめらかで連続である場合には、Rackwitz and Fiessler のニュートン型で繰返し型のアルゴリズムが便利である。このアルゴリズムでは、標準正規空間内において次式により設計点の更新を行う。

$$x'_{k+1} = \frac{[\nabla G(x'_k)^T x'_k - G(x'_k)] \nabla G(x'_k)}{\nabla G(x'_k)^T \nabla G(x'_k)} \quad \text{数式 9}$$

x'_k は k 回目の繰返しにおける設計点の座標であり、 T はベクトルの転置を示す。設計変数が多いと $g = 0$ の限界は曲面となるが、この場合であっても、(数式 9) は汎用的に利用することができる。例えば、初期値として平均値からスタートし、座標点の更新量の大きさに

対して制限値を設定しておき、この値が小さいときに収束したものとして計算を打ち切ればよい。設計点 x^* から部分安全係数を求める手順は、 g が線形である場合と同様である。ただし、 g が非線形であるとき、求まった β を (数式 6) に代入して評価される P_f は、近似値に過ぎない。なぜなら、この評価は図に示すように設計点で、 g を線形近似した場合の評価であるからである。より精度の高い P_f を求めたければ高次の近似関数を用いればよい。例えば、2次関数による近似を用いる方法であるSORMがある。目標信頼性は P_f に対して設定することが望ましいが、第1次近似としては β に対して目標を設定する場合もある。

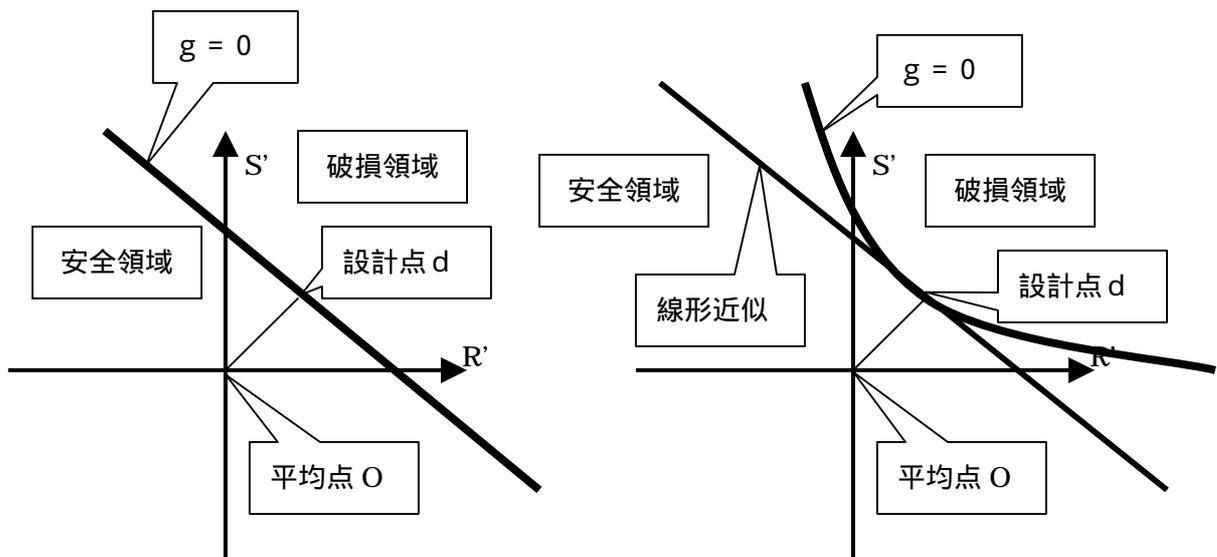


図 2 (左) 標準正規空間における設計点と信頼性座標

図 3 (右) 非線形限界状態関数と設計点

分布関数が非正規分布の場合

設計変数の分布関数が対数正規分布やワイブル分布など非正規分布の場合には、非正規確率変数を標準正規確率変数に変換する必要がある。しかし、この変換を直接行うことはできないので、設計点を求めるための繰返し計算の途中で以下のように等価な正規分布へと変換する。代表的な方法として Rackwitz and Fiessler の 2 パラメータ法を紹介する。いま、対象とする非正規分布の変数 X_i の分布関数が $F_i(X_i)$ 、密度関数が $f_i(X_i)$ で与えられ、繰返し計算の途中の、設計点の座標が X_i^* で与えられるとき、等価な正規分布関数の標準偏差および平均値を (数式 10) から算出する。

$$\sigma_{Xi}^N = \frac{\phi\{\Phi^{-1}[Fi(Xi^*)]\}}{fi(Xi^*)}$$

$$\mu_{Xi}^N = Xi^* - \Phi^{-1}[Fi(Xi^*)]\sigma_{Xi}^N$$

数式 10

ここで $\phi(\cdot)$ は標準正規密度関数である。計算において関心があるのは破損領域の評価であるので、(数式 10) においては、設計点より外側の裾野領域の累積分布が等しくなる等価な正規分布に変換するという操作を行っている。この母数を用いて標準正規空間に変換すれば、設計点の更新に (数式 9) の利用が可能である。ただし、設計点が更新されるごとに (数式 10) によって、等価な標準正規分布を評価しなおす必要がある、繰返しによって設計点が収束するまで計算を実施する。収束した設計点の値をオリジナル空間に戻した後に、(数式 7) と同様にして部分安全係数を計算することができる。

2.4 破壊評価線図法

破壊力学評価手法は、き裂またはき裂状の欠陥をもつ機器が、欠陥を起点として破壊に至る寿命を定量的に解析し、欠陥を許容したまま運転継続が可能か否かを判断することができる手法である⁴⁾。しかし、き裂のある部材が破壊する場合、小規模降伏で破壊に至る延性破壊と脆性破壊、き裂を含む断面全体が降伏、塑性変形した結果として生ずる塑性崩壊とそれらの中間状態の大規模降伏で生じる延性破壊のいずれかの形態をとる。破壊形態は応力、材料の降伏応力、破壊靱性及びき裂の形状・寸法により異なり、破壊形態により破壊条件も異なってくる。破壊形態にかかわらず破壊を一つの方法で判定できるように考案されたのが破壊評価線図法であり、2つのパラメータを使用することから2パラメータ法ともいう。この手法では、き裂がある部材の形状・寸法、作用する荷重、材料の破壊靱性及び降伏荷重から2つのパラメータ Kr 、 Lr を計算し、(Kr 、 Lr) を座標軸とする平面 (破壊評価線図) にプロットし、破壊限界を示す曲線 (破壊評価曲線) の外側にあれば破壊、内側にあれば破壊しないと判定する。この手法は元英国中央電力庁 (CEGB) で開発され、R6法ともいう。以下に概要を示す。

応力値に対する欠陥部材の応力拡大係数 Kr の計算。一次応力 P と二次応力 S についてそれぞれ算出する。 Kr^P 、 Kr^S

塑性崩壊パラメータ Lr の計算。

Lr は対象部位に作用する一次荷重と、き裂断面の限界荷重の比として定義される。限界荷重は対象の降伏応力 σ_y を降伏強度とする弾完全塑性体と仮定して計算する。

Kr 、 Lr は部材、き裂の形状や、負荷形態により表式が異なる。

線形弾性破壊パラメータ Kr の計算。

Kr は応力拡大係数 K_I と破壊靱性値 K_c との比として定義される。

$$Kr = \frac{K_I^P + K_I^S}{K_c} + \rho \quad \text{数式 11}$$

ここで、 ρ は一次応力と二次応力の相互干渉による塑性効果を表すパラメータであり、 Lr の関数として与えられているが、現在正確には求められていない。

破壊の危険度を評価するために、上記で計算した破壊評価点 (Kr, Lr) を、図4に示した破壊評価曲線上にプロットする。その点が安全な領域に位置するならば、評価対象となるき裂を有する構造物は延性破壊を生じないと判定される。

安全領域は、以下に示した一般式で表される破壊評価曲線の内側となる。

$$Kr \leq (1 - 0.14Lr^2) [0.3 + 0.7 \exp(-0.65Lr^6)] \quad \text{数式 12}$$

上式は下記塑性崩壊条件で打ち切られる。

$$\begin{aligned} Lr &\leq Lr^{\max} \\ Lr^{\max} &= \sigma_f / \sigma_y \\ \sigma_f &= (\sigma_u + \sigma_y) / 2 \end{aligned} \quad \text{数式 13}$$

ここで σ_f は有効降伏強度(流動応力)、 σ_y は降伏強度、 σ_u は引張り強さである。

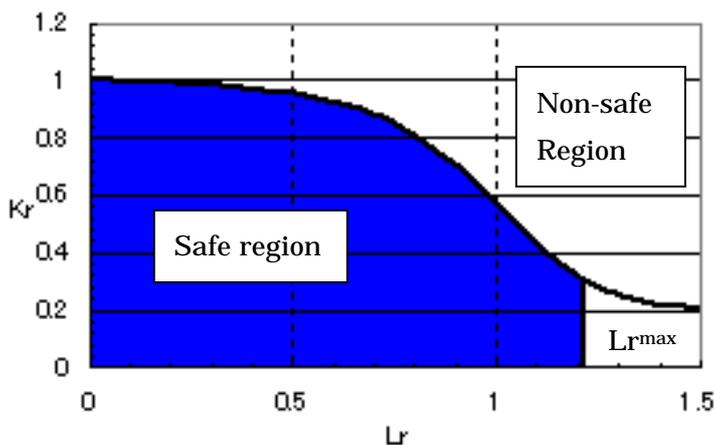


図4 破壊評価線図

2.5 疲労き裂進展

欠陥のある材料が一定荷重を規則的に繰返し受けた場合、欠陥を起点としてき裂が進展を開始し、破壊に至ることがある。疲労によりき裂が進展することを疲労き裂進展といい、破壊が起きることを疲労破壊という⁵⁾。それは主として負荷時間と環境に依存している。疲労き裂進展は繰返し数 N 依存型であり、疲労き裂進展速度は da/dN で表示される。

疲労き裂進展速度 da/dN は、応力繰返しの間、応力拡大係数 K_I の変動範囲 K_I と応力比 R の関数となる。

$$\Delta K_I = K_{MAX} - K_{MIN} \quad \text{数式 14}$$

$$R = K_{MIN} / K_{MAX} \quad \text{数式 15}$$

次式のような簡単な関数形が実験的に得られている。次式を Paris 則という。

$$da/dN = C \times (\Delta K_I)^n \quad \text{数式 16}$$

ここで、 C, n は材料により決まる数である。

炭素鋼の場合、 $C = 3.88 \times 10^{-9} \cdot 25.72(2.88 - R)^{-3.07}$ 、 $n = 3.07$ ということが実験で分かっている。

第3章 破損確率評価システムの意義・特徴

3.1 緒言

この章では、本研究において作成する破損確率評価システムの意義・特徴を述べる。そのため、始めに本システムの位置付けを図5に示す。下線部が従来の検査の流れと異なる点であり、以降の節において説明をする。

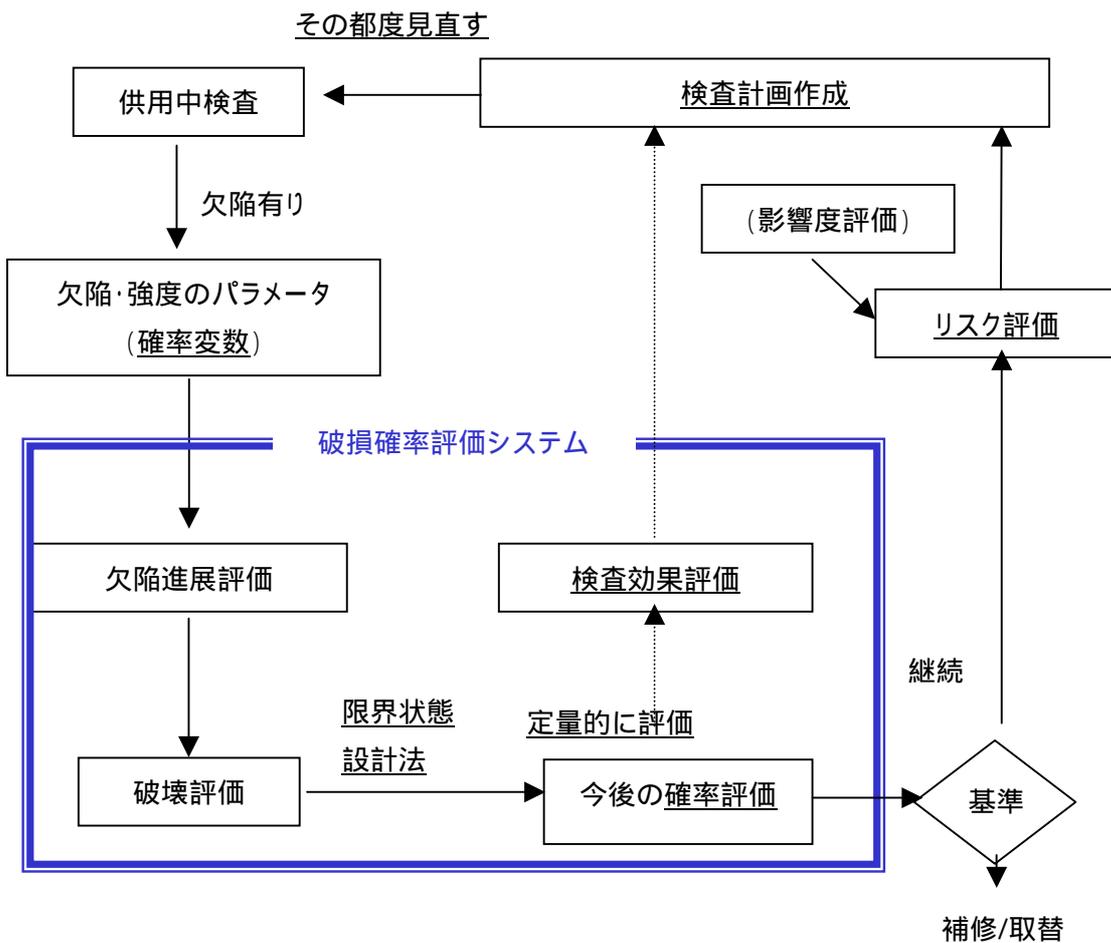


図5 破損確率評価システムの位置付け

3.2 限界状態設計法

「背景」で述べたように安全性の許容基準として、従来の安全率を用いた場合、個々のパラメータに対して余裕を持つように設計を行うため、全体としては余裕を持ちすぎてしまう。このことは安全性だけを考慮する場合はよいが、近年の状況のように、低いコストで多くの経年構造物をなるべく長期にわたり継続させたい場合は、あまり好ましいことではない。

よって本システムでは、全体としての安全性の評価を行う限界状態関数を用いた信頼性評価を行う。これにより、従来の安全率による設計で陥りがちな、過度に裕度を持ちすぎの評価が防げる。具体的には、破壊評価線図法で用いた破壊評価曲線を限界状態関数と定義することにより、破損確率評価を行う。

3.3 確率評価

確率を評価できることにより、欠陥や強度のパラメータにばらつきを持たせ統計的・定量的に破壊の評価が行えるようになる。従来は上記パラメータは一定値として評価を行ってきたが、実際はばらつきがあるのが当然である。

また、「起きた場合の被害の大きさ」をあらわす影響度の評価を行うことができれば、リスクを評価することができるようになる。破損の確率、またはリスクを指標とすることで、より必要な箇所に検査を集中するように、以後の検査計画を見直すことができるようになる。

本システムにおいては確率評価の手法は FORM を使用する（2.3 節参照）。FORM は限界状態関数を単純な関数に置き換えることで容易に評価でき、またモンテカルロ法に比べて瞬時に計算されるという利点がある。モンテカルロ法は、各確率変数に対して所定の確率分布に基づく乱数を発生し、破損領域に落ちる割合を求めることにより、破損確率を算出する方法である。そのため近似性は良いが、試行回数が多いと計算時間が長くなり、試行回数が少ないと低確率現象の場合に精度が低くなってしまうという特徴がある。

3.4 検査効果評価

本システムは、合理的な検査計画を立案することに使用されるため、検査の効果は重要な評価因子となり、検査を行うことによって破損確率は変化する。非破壊検査では構造物にある全ての欠陥を検出できるわけではなく、次の検査や補修まで機器に欠陥が残る可能性は必ず存在する。この確率は様々なパラメータに依存する。例えば、製造方法や非破壊検

査の手法・信頼度、検査技術者などである。しかし、当然欠陥の検出確率は欠陥寸法が大きくなるほど上昇し、1に近づくと考えられる。

本システムにおいては、スウェーデンハンドブック⁶⁾に記載されている図7の検出確率データを使用するとした。スウェーデンハンドブックは、欧州の中でも最も熱心にRBIに基づく検査計画を進めているスウェーデンのRBI研究調査報告である。検査は配管に対して非破壊検査のうち、き裂の探傷に用いられる超音波探傷 (Ultrasonic Test) を行っている。(ただし、記載データは横軸が相対き裂深さであるため、資料⁷⁾を基に、き裂長さに対するUTの検出確率に適するよう横軸の変更を行った。) Poor, Good, Advancedは検査のレベルを表し、Poorは全チームを通して下限の性能に相当するUT、Goodは全チームの平均的な性能に相当するUT、Advancedは改良された手法を用いて達成することができるUTを表している。Poor, Good, Advancedの順番に検出確率が高くなるが、コストも高くなると考えられる。

また、スウェーデンハンドブックでは、計算を単純化するため、検出事象の計算結果は、欠陥が検出された場合に有効な補修が行われるか、または欠陥が次回の検査まで監視しながら放置されるかといった機器の補修計画にリンクするとし、破損確率に寄与しないと仮定される。そのため破損確率は(数式17)のように計算される。

$$\lambda(t) = P(g(t) \leq 0) \cdot [1 - P(D(t) \leq 0)] \quad \text{数式 17}$$

ここで、 $\lambda(t)$ は破損確率、 $g(t)$ は限界状態事象で $g(t)$ が0以下の場合時間 t において破損を表し、 $D(t)$ は検出事象で $D(t)$ が0以下の場合時間 t において欠陥が検出されることを意味する。

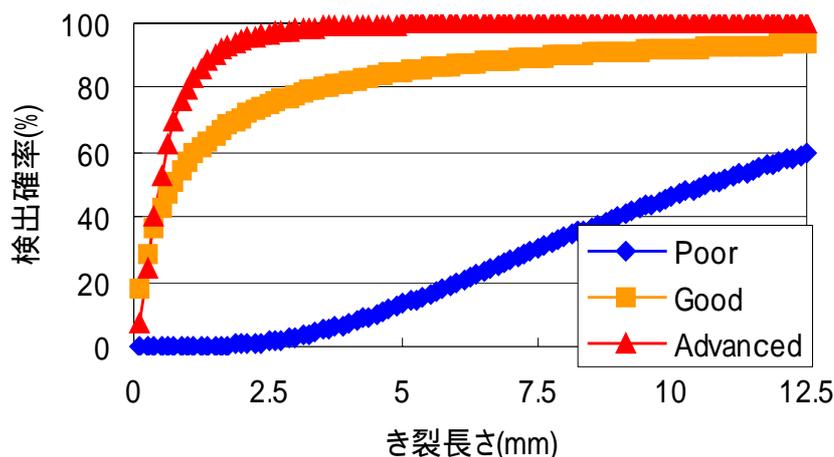


図 6 検出確率

3.5 簡便評価

実際に破損確率評価を行いたい設計者・検査員などが、破壊力学や信頼性工学に必ずしも精通しているとは限らない。また、精通していたとしても、破壊評価線図法や、FORMなどは複雑であり、パラメータの異なるたびに、いちいち手計算を行ってはい面倒であり、ミスをする可能性もある。以上のことから、破壊力学や、信頼性工学に精通していない者でも、簡便に破損確率の評価が行えることがシステムに要求される。よって、本システムではパラメータの入力のみで破損確率評価が可能となるようにする。

3.6 検査合理化

リスクベース検査においてリスクを基準に検査計画を立てると、従来のように検査を行う時期が決められている場合と比べ、合理化されることが考えられている。ここで、リスクは「故障・破損の起こりやすさ」と「起きた場合の被害の大きさ」の積として表されるため、破損確率を基準に検査計画を立てれば、従来よりも合理化された検査計画を作成できると考えられる。よって、本システムでは破損確率を基準に検査を行う時期を決定できる機能も作成する。

第4章 破損確率評価システムの作 成

4.1 緒言

この章では、破損確率評価システムの作成にあたり、取り決めたことについて述べる。また、算出された破損確率の検証を行う。

4.2 解析モデル

システムを作成するにあたり、以下の制約条件を設け、モデルを作成した。

- ・実際のプラントでは、破損確率評価が求められる機器は、ほとんどが配管であるため、部材は円筒形とした。き裂の形状は応力拡大係数の式が連続である周方向貫通き裂とした。モデルを下図に示す。
- ・材料は炭素鋼とし、大気中で月繰返し数一定の、繰返し引張荷重を受けるとした。そのため下図モデルには疲労き裂進展が発生するものとした。
- ・初期き裂長さ、破壊靱性値、降伏応力、引張り強さの4つのパラメータは、確率変数であり、正規分布に従うとした。

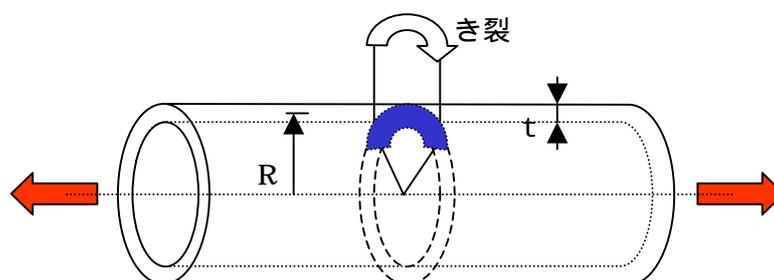


図 7 解析モデル

4.3 データ入力

以下の部材パラメータは、使用者の入力により変更が可能とした。

- ・4つの確率変数（初期き裂長さ、破壊靱性値、降伏応力、引張り強さ）の平均値、標準偏差
- ・部材の板厚 t 、径 R
- ・部材にかかる最大膜応力値、最小膜応力値
- ・月繰返し数

検査の有無は、使用者が検査の時期と種類を入力するとした。破損確率により検査の時期を決める場合は、上限の破損確率を入力するとした。（付録参照）

4.4 出力データ

本システムでは、FORMにより求まる破損確率を、単位月当たりの故障率 λ とし、開始時点からの累計破損確率 $P_f^{(t)}$ を月ごとに求め、グラフで出力するとした。 P_f は以下の式により算出される。

$$\lambda = P(g(t) \leq 0) \quad \text{数式 18}$$

ここで、 $g(t)$ は限界状態事象で $g(t)$ が 0 以下の場合時間 t において破損を表す。

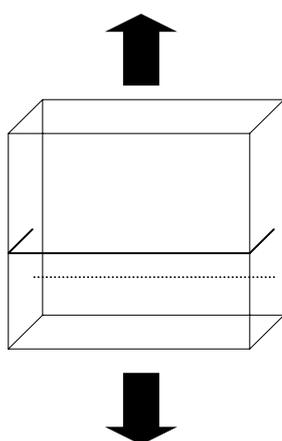
$$P_f = 1 - \exp \left(- \int_0^t \lambda dt \right) \quad \text{数式 19}$$

他に、き裂の進展解析で求めた、き裂の平均長さや、検査を行った時期と種類、どの確率変数が破損確率にどのくらい影響を与えているかを示す確率変数の相関係数を出力する。相関係数の値は 0~1 で 1 に近づくほど破損確率への影響が大きい。

4.5 検証

4.5.1 確率評価の検証

まず始めに、本システムの手法とプログラムを、スウェーデンハンドブックに記載されている Det Norske Veritas 社の決定論的解析コード ProSACC と、モンテカルロ法による破損確率データと比較した。ProSACC は破壊評価線図法を用いており、スウェーデンの原子炉圧力容器の、RBI 研究で取り上げられている問題の入力データを用いた検証の結果においても、良好な結果が得られている。ProSACC による破損確率データが算出されているモデルを図 8 に示す。



「引張下の平板中のエッジ状欠陥」(板厚 103mm)

下記確率変数は正規分布に従う

破壊靱性：平均値= $200\text{MPa}\sqrt{m}$ 、標準偏差 $10\text{MPa}\sqrt{m}$

降伏応力：平均値=350MPa、標準偏差=30MPa

引張強さ：平均値=500MPa、標準偏差=30MPa

欠陥寸法：平均値=26.0mm、標準偏差=6.5mm

図 8 検証モデル

なお、このモデルでは、き裂の進展、検査の効果は考えられていない。本研究ではモンテカルル口法を 10^5 回試行した。そのためモンテカルル口法の確率は、 10^{-4} 以下の精度が低くなる。

検証は以下の4つケースについて行った。

- 異なる一次膜応力と破損確率の関係
- 欠陥の異なる標準偏差と破損確率の関係
- 欠陥パラメータが指数分布の場合
- 二次応力がある場合

異なる一次膜応力と破損確率の関係

モデルにかかる一次膜応力の関数として、破損確率の算出を行った。

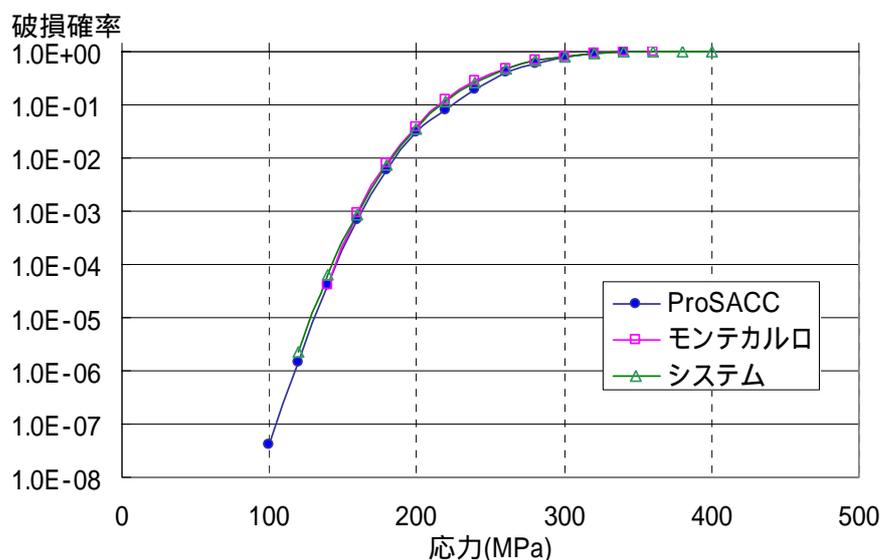


図 9 一次膜応力と破損確率の関係

このケースの場合よくあっていると考えられる。

欠陥の異なる標準偏差と破損確率の関係

主な入力データは上述のケースと同様である。ここで異なるのは、2つの異なる一次膜応力 (150MPa と 200MPa) を用いた場合について、欠陥の標準偏差の関数として破損確率を算出した。

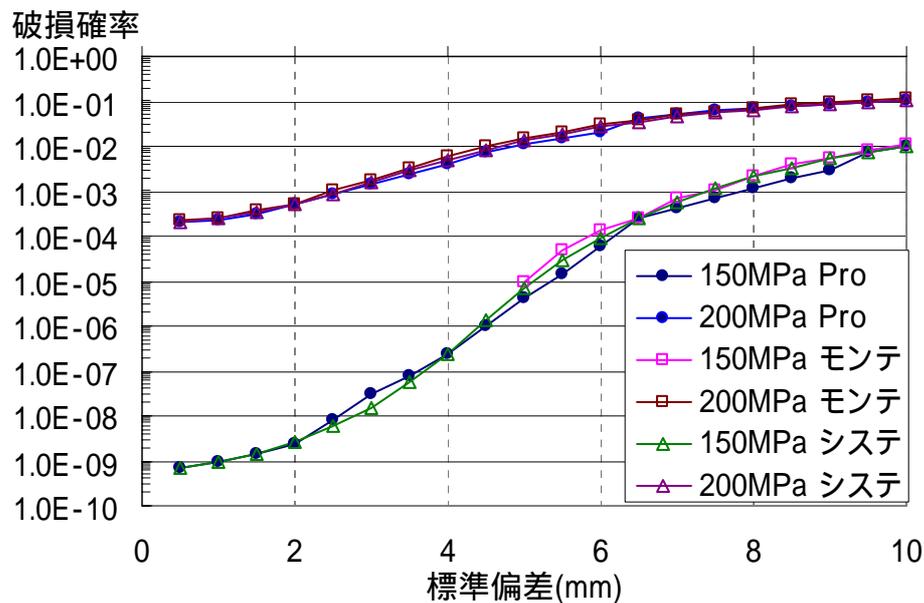


図 10 標準偏差と破損確率の関係

このケースの場合もよくあっていると考えられる。

欠陥パラメータが指数分布の場合

主な入力データは上述のケースと同様である。ここで異なるのは、欠陥分布を2つの異なる指数分布で表されるパラメータを用いた場合について、一次膜応力の関数として破損確率を算出した。指数分布は中央値が26mmと5mmの場合で行った。

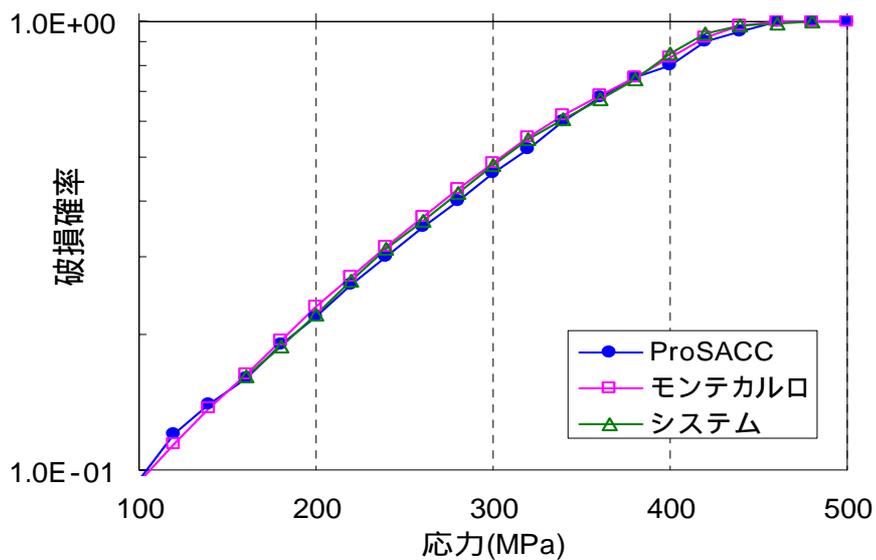


図 11 指数分布の場合・中央値 26mm

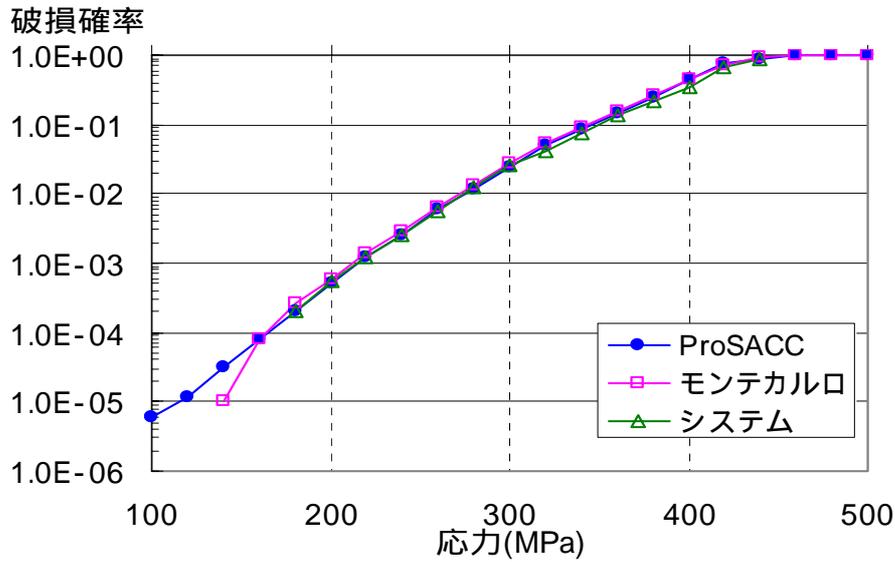


図 12 指数分布の場合・中央値 5mm

このケースの場合もよくあっていると考えられる。

二次応力がある場合

主な入力データは上述のケースと同様である。ここで異なるのは、負荷された二次膜応力の関数として破損確率を算出する。一次膜応力は 100MPa で一定とする。

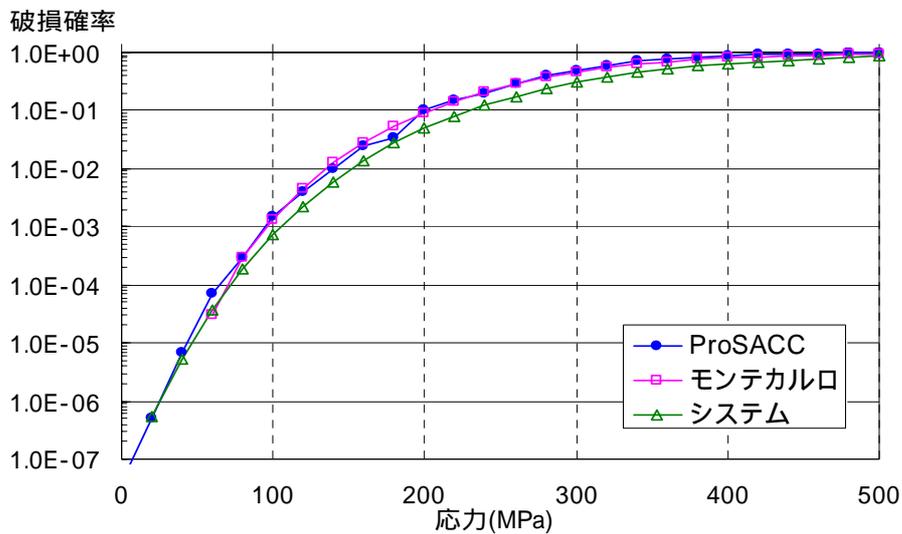


図 13 二次膜応力と破損確率の関係

システムの破損確率が小さくなった。これは破壊評価線図法のパラメータ Kr を求める際、一次応力と二次応力の相互作用による塑性効果を表すパラメータ による差と考えられる。

4.5.2 検査効果評価の検証

前節でシステムの手法とプログラムにより算出される破損確率の正当性が示せたため、この節では、き裂進展・検査効果を含めた破損確率の検証を行った。この検証では3.3節のモデルを使用した。この場合既存データが無いので、モンテカルロ法により算出した破損確率との比較を行った。

まず始めに検査なしの場合の累積破損確率を比較し、き裂進展を考慮した際の破損確率の検証を行った。モンテカルロ法は 10^5 回試行した。

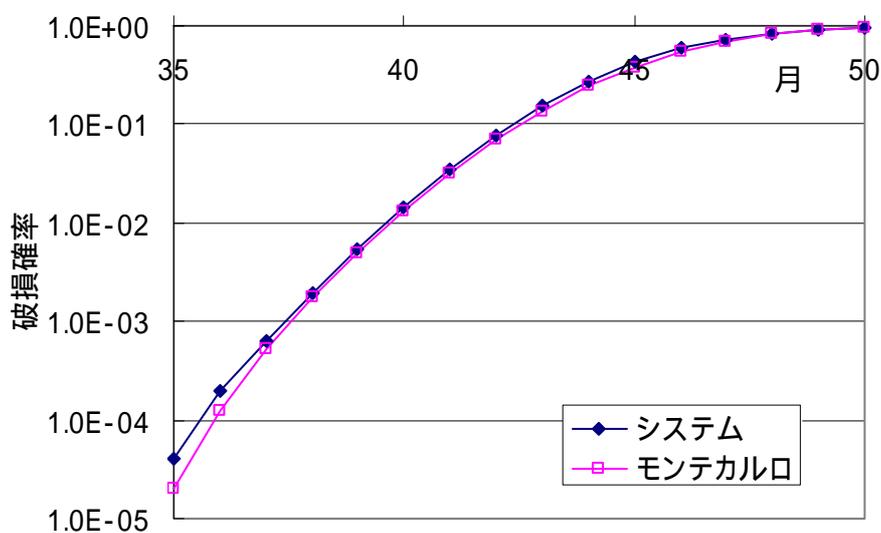


図 14 検査なし累積破損確率の比較

累積破損確率が高い場合はよく一致したが、低い場合にズレが生じた。しかし、モンテカルロ法の試行回数が 10^5 回のため 10^{-4} 以下の確率は確実性が乏しいとみなせる。従って検査なしの場合、システムとモンテカルロ法による破損確率はよく一致していると考えられる。

次に検査を行った場合の故障率を比較し、検査効果を考慮した際の破損確率の検証を行った。検査は月 40,45,50 の時に、種類Poorで行った。また、モンテカルロ法は 10^5 回試行した。

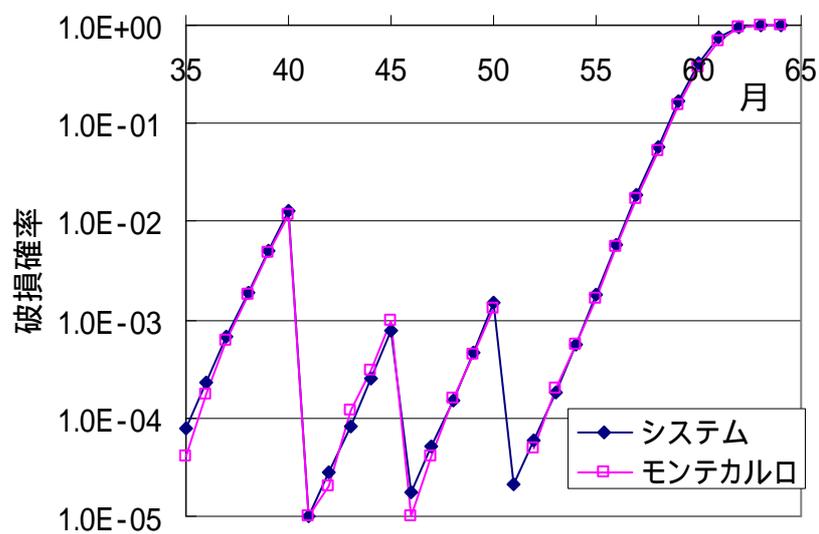


図 15 検査あり故障率の比較

検査なしの場合と同様、モンテカルロ法の 10^{-4} 以下の確率を確実性が乏しいとみなせば、検査を行った場合も、システムとモンテカルロ法による破損確率はよく一致していると考えられる。

第5章 破損確率評価システムによる検査合理化

5.1 緒言

この章では、本システムにより算出した破損確率により、合理的な検査計画を作成する。そのために、まずは従来の定期検査による破損確率を算出し、その結果を考察する。

5.2 従来の定期検査

まず始めに、3.4 節に挙げた検出確率をもつ3種類の検査を、様々な間隔で定期的に行った場合の、20年(240ヶ月)後における累積破損確率を本システムにより算出し、比較した。部材のパラメータは(付録・例)の値を使用した。表1に結果を示す。

表1 240ヶ月目の累積破損確率

	検査間隔	半年ごと	1年ごと	2年ごと	4年ごと	5年ごと	10年ごと
検査精度	検査回数	40回	20回	10回	5回	4回	2回
Poor		0.31389	1	1	1	1	1
Good		1.12E-10	1.14E-10	1.21E-10	4.03E-06	0.994738	1
Advanced		1.13E-10	1.15E-10	1.17E-10	1.21E-10	1.23E-10	7.31E-04

同じ検出確率の検査でも、検査間隔が短いほど破損確率が低くなることが確認できた。また、同じ検査間隔でも、検出確率の高い検査を行うほど、破損確率は低くなることも確認できた。ただし、検査間隔が短いと、き裂の進展量が小さく、き裂が短いため Good 検査の方が Advanced 検査よりも検出確率が高くなる場合がある。3.4 節参照。

Good 検査は 24 ヶ月、Advanced 検査は 60 ヶ月間隔まで、検査間隔を長くしても、破損確率はあまり変わらないことが確認できた。

Poor 検査を半年ごとで行うよりも、Advanced 検査を 10 年ごとで行う方が、破損確率が低くなるのが分かる。また、Advanced 検査を 10 年ごとで行うよりも、Good 検査を 4 年ごとで行う方が、破損確率が低くなることも分かる。また、間隔が 2 年以内で検査を行う場合、Good 検査と Advanced 検査は差があまり生じないことが確認できた。

これらのことは検査にかかるコストなどと照らし合わせることで、より合理的な検査方法を選択できるようになると考えられる。

5.3 考察

前節より定期検査における検査間隔には、検出確率ごとに最適な間隔があると考えられる。ここでいう最適な間隔とは、その間隔よりも長いと破損確率が大きく上昇してしまい、短いと破損確率はほとんど変化しないにも関わらず、検査の回数が多くなってしまいう間隔と定義する。検査の検出確率ごとに最適な検査間隔の算出を行えば、効果的・経済的に検査が行えるようになる。

ここで、破損確率を求めた際に、故障率を一定値以下に抑えるように検査を行う間隔を決定すれば、最適な間隔が算出できると考えられる。

そこで、本システムの「故障率」メニュー（付録・故障率）を使用し、定期検査における最適な間隔を算出する。部材のパラメータは（付録・例）の値を使用した。3.4節にある検出確率の検査を故障率が 0.001 以上の月に検査を行うとした。以下に結果を示す。検査を行った月から、適切な検査間隔を算出する。

まず始めに Poor 検査を行った場合の月ごと故障率の推移を示す。

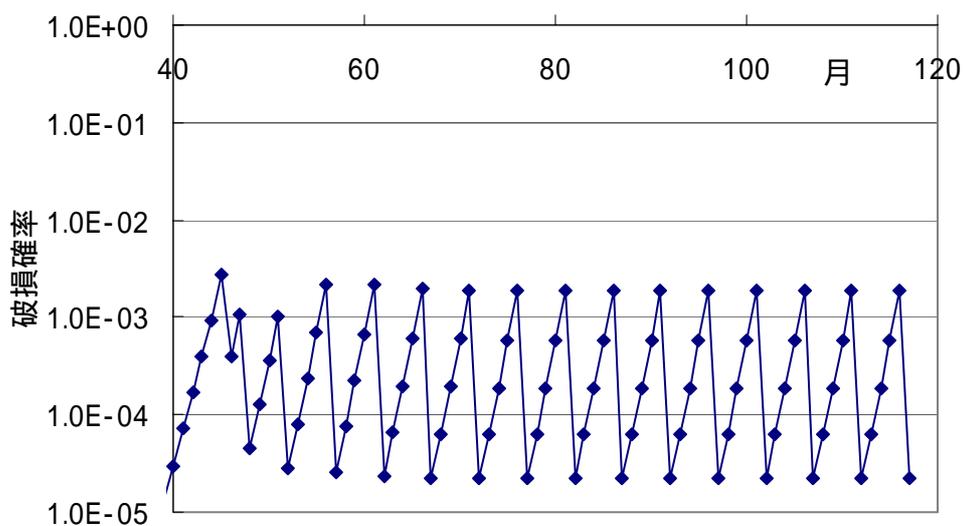


図 16 故障率の推移、Poor 検査

検査月は

38,45,47,51,56,61,66,71,76,81,86,91,96・・・

であった。Poor 検査の場合、5ヶ月が定期検査の最適な間隔であると考えられる。

次に Good 検査を行った場合の月ごと故障率の推移を示す。

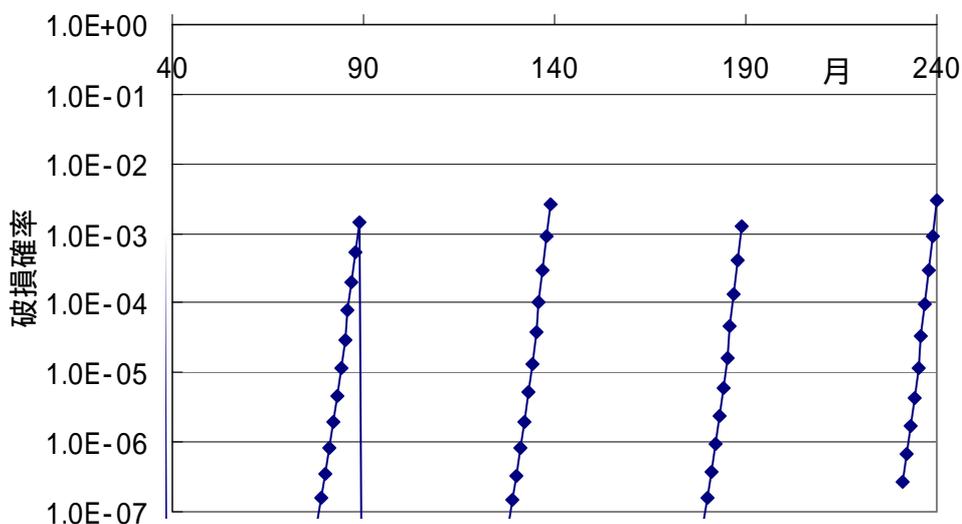


図 17 故障率の推移、Good 検査

検査月は

38,89,139,189,240・・・

であった。Good 検査の場合、50 ヶ月が定期検査の最適な間隔であると考えられる。

5.4 結言

この章では、本システムにより以下のような合理的な検査計画の作成が可能となった。

- ・ 定期検査において、検出確率の異なる検査を、様々な検査間隔で行った場合の効果を、破損確率の差で定量的に比較を行うことができた。
- ・ 故障率により検査を行うシミュレーションから、検出確率の異なる検査ごとに、欠陥が大きく成長することも無く、無駄に検査回数が増えることも無いような定期検査の最適な検査間隔を算出できた。

第6章 結論

本研究で得られた結論は以下の通りである。

まず第3、4章において、以下の特徴をもつ破損確率評価システムを作成した。

- ・ 従来の許容応力度設計法による評価ではなく、信頼性工学における限界状態設計法を用いることで、過度に裕度である評価を行わない。
- ・ 検査による効果も計算することができ、検査計画の作成に役立つ。
- ・ パラメータの入力だけで評価が行うことができる。

また、ProSACC やモンテカルロ法による破損確率との比較により、システムの算出した破損確率の正当性が確かめられた。

次に、第5章においては、本システムを使用することにより、従来の定期検査による破損確率を評価した。その結果から異なる種類、間隔の検査効果を定量的に比較できた。また、破損確率により検査間隔を決定することで、より合理的な検査計画を作成することができた。

付録

緒言

ここでは、作成した破損確率評価システムを実行し、その結果を示す。

本システムは Excel のアドイン機能を使用し、まず下図のメニューバーを出して使用する。それぞれのメニューバーについて順に説明を行っていく。

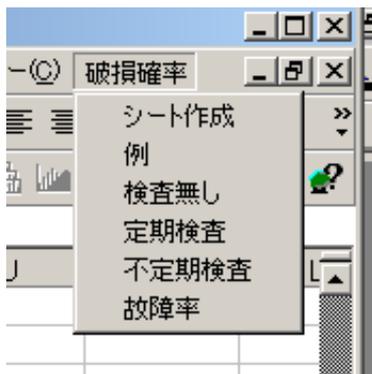


図 18 メニューバー

破損確率評価システムの実行手順

本システムの実行手順をフローチャートで示した。

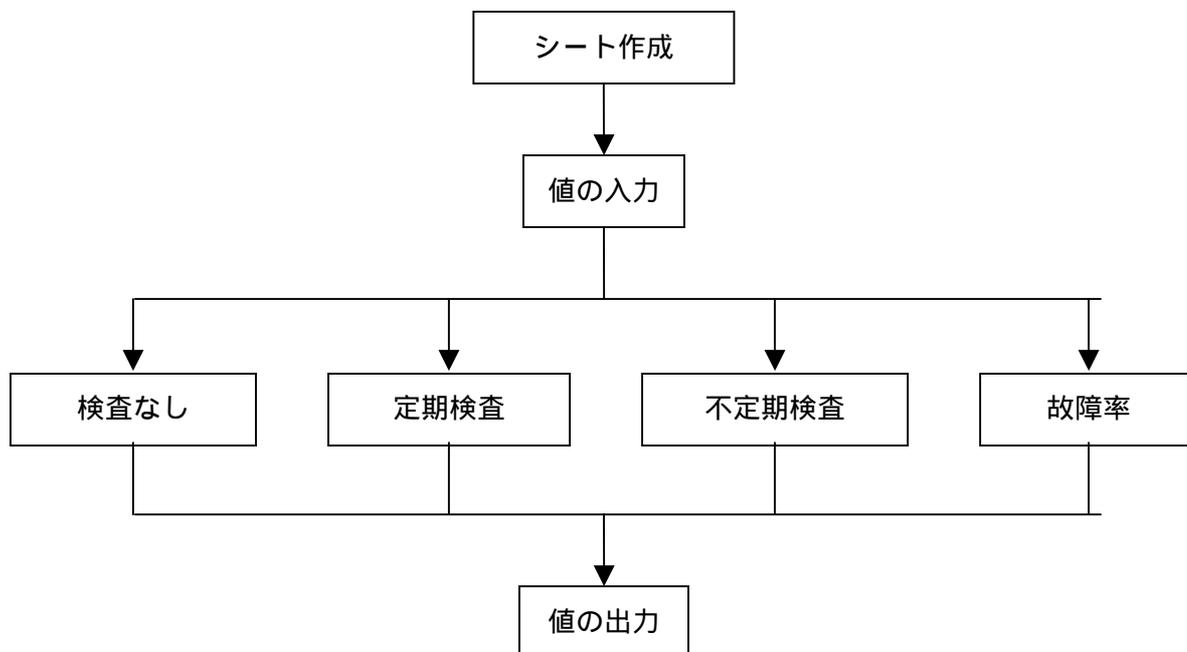


図 19 破損確率評価システムの実行手順フローチャート

シート作成

「シート作成」メニューバーを押すと、初期条件の入力や、解析結果を出力するワークシートを Excel 上に作成する。初期条件入力シートとして下図が出現する。

	A	B	C	D
1		平均	標準偏差	
2	初期欠陥			mm
3	破壊靱性			MPa \sqrt{m}
4	降伏応力			MPa
5	引張り強さ			MPa
6				
7	板厚t		mm	
8	径R		mm	
9	適用範囲	5<=R/t<=20		
10				
11	最大応力		MPa	
12	最小応力		MPa	
13				
14	月繰返数		回	

図 20 初期条件シート

例

「例」メニューバーを、押すと下図のパラメータが入力される。

	A	B	C	D
1		平均	標準偏差	
2	初期欠陥	1	0.1	mm
3	破壊靱性	67	6.7	MPa \sqrt{m}
4	降伏応力	1070	107	MPa
5	引張り強さ	610	61	MPa
6				
7	板厚t	5	mm	
8	径R	50	mm	
9	適用範囲	5<=R/t<=20		
10				
11	最大応力	400	MPa	
12	最小応力	40	MPa	
13				
14	月繰返数	1000	回	

図 21 例パラメータ

検査なし

検査を行わない場合の結果が出力される。下図は出力される月ごと累積破損確率のグラフである。部材パラメータは例の値を使用している。月を経るほど破損確率が上昇する様子が分かる。検査を行わない場合、約 50 ヶ月で破損確率が 1 になる。

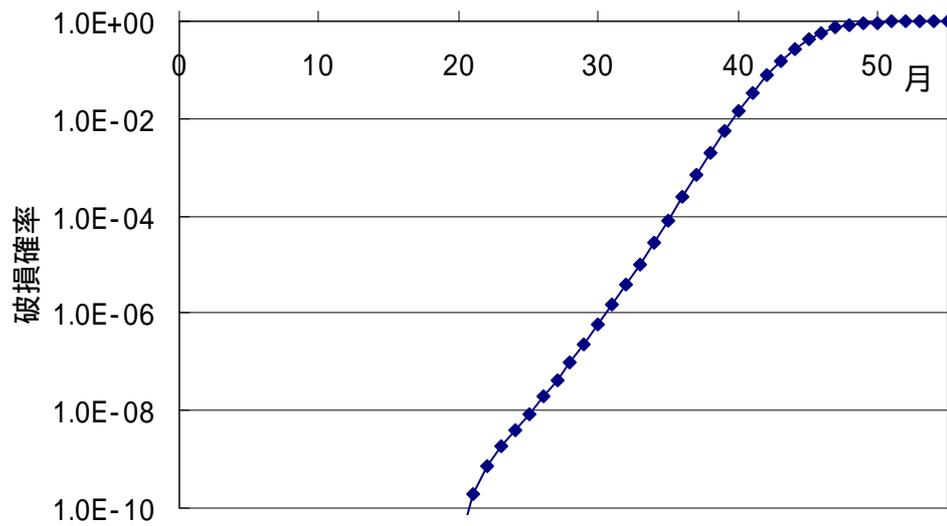


図 22 検査なしの累積破損確率

定期検査

定期的な間隔で検査を行った場合の結果が出力される。「定期検査」メニューバーを押すと下図のウィンドウが出現する。左上の欄に検査を行う間隔を入力し、右の欄で Poor, Good, Advanced の 3 種類から検査の種類を決める。「決定」ボタンを押すと結果が出力される。



図 23 定期検査ウィンドウ

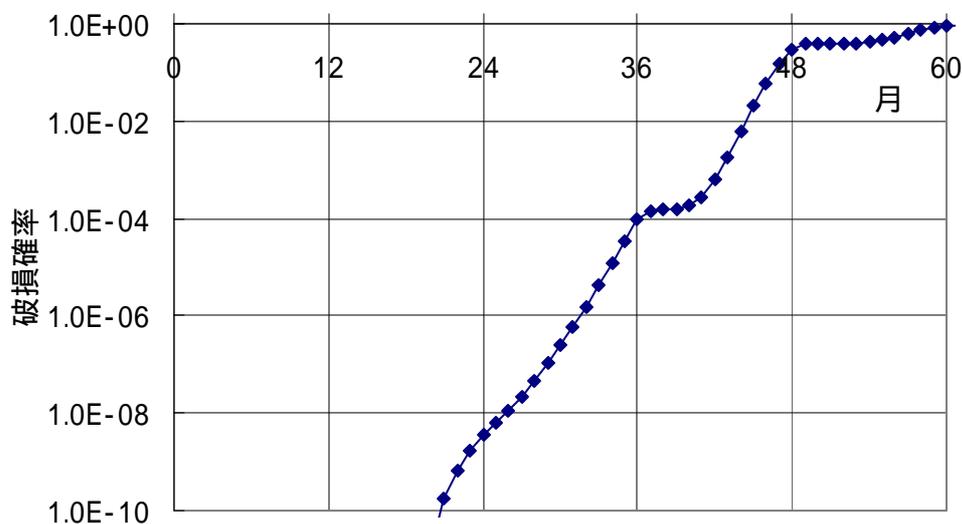


図 24 定期検査の累積破損確率

上図は Poor 検査を 12 ヶ月ごとに行った場合の累積破損確率を表したグラフである。検査を行った月 (0,12,24,36,48) に破損確率の上昇が低減していることが分かる。また、検査なしの場合と比較し、約 10 ヶ月も破損確率が 1 になる時期が遅くなっている。

不定期検査

任意の時期に、任意の検査を行った場合の結果が出力される。「不定期検査」メニューバーを押すと下図のウィンドウが出現する。左上の欄に検査を行う時期を入力し、右の欄で Poor, Good, Advanced の3種類から検査の種類を決める。入力した月以降にも検査を行いたい場合は「次」ボタンを押して、再度、時期と種類を決定する。「リセット」ボタンを押すと始めから入力し直せる。「決定」ボタンを押すと結果が出力される。

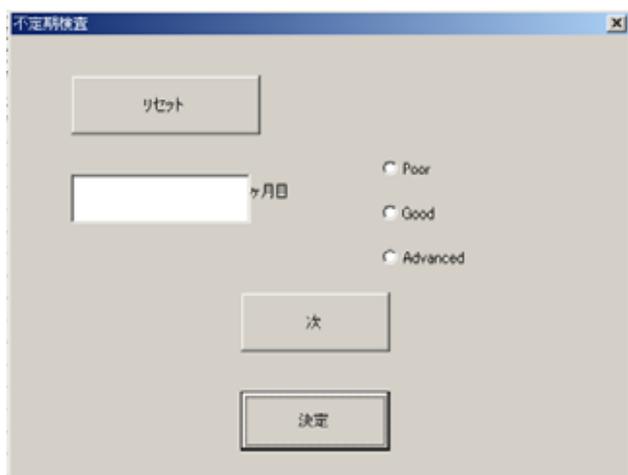


図 25 不定期検査ウィンドウ

故障率

故障率が一定値以上になった場合に検査を行うとした。「故障率」メニューバーを押すと下図のウィンドウが出現する。左上の欄に自身で設定する故障率の上限値を入力し、右の欄で Poor, Good, Advanced の3種類から検査の種類を決める。「決定」ボタンを押すと結果が出力される。



図 26 故障率ウィンドウ

参考文献

- 1) 財団法人 エンジニアリング振興協会 『産業基盤・社会基盤の維持管理高度化に関する調査研究報告書』 平成 16 年 3 月
- 2) 財団法人 機械システム振興協会 『機械システムのメンテナンス最適化のための RBM 手法の開発に関するフィージビリティスタディ報告書』 平成 16 年 3 月
- 3) 構造工学ハンドブック編集委員会 『構造工学ハンドブック』第 9 章 丸善 2004
- 4) 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
- 5) 小林英男 『破壊力学』 共立出版
- 6) RSE R&D PREL.REPORT NO.2004/01 DET NORSKE VERITAS
- 7) Risk Based Inspection Development of guidelines,vol.3 ASME CRTD 20-3 1994
- 8) 岡村弘之・板垣浩 『強度の統計的取り扱い』培風館 1979
- 9) Lina Tidstrom U.U.D.M.Project Report 2004:2
- 10) 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

以上

1 ~ 4 3 ページ 完

卒業論文

平成 17 年 2 月 4 日 提出

30233 山崎康平