

リスクベース設計のための基礎と展開

伊藤 誠*

1. はじめに

船舶や航空機といった機械システムの設計において、安全性は最優先で考慮されるべきものである。一方で、経済性を無視した設計は現実的ではなく、安全性を確保した上で如何に競争力の高いモノづくりを行うのが重要である。そのためには、新しい技術や様式を取り入れることが可能な、設計自由度の高い規則を確立することが求められる。特に新コンセプト船の設計では、重要と考えられる。

設計自由度の高い設計に対する安全性を担保するには、リスクベース設計の考え方が有効である。これは、信頼性設計を土台とし、リスクを指標として機能の許容値（構造設計であれば破損確率の上限値など）を設定するものである。リスクを指標とすることで、評価基準が普遍的かつ透明性が高くなる。また、新コンセプト船で起こりうる未知の事象への対策が可能となることが期待される。

本稿では、リスクベース設計の基礎として、構造信頼性理論を解説し、次に最適設計問題を題材としてリスクベース設計の特徴を説明する。その後、リスクベース設計の展開として、構造規則への適用を考え、IMOのリスクベース構造規則開発ガイドラインであるGBS-SLA (Goal Based Standards-Safety Level Approach) interim guideline²⁾を紹介した後、疲労強度クライテリアに適用する方法と構造規則開発における技術的課題について考察する。

2. 構造信頼性理論

2.1 概説

JIS規格³⁾によれば、信頼性とは「アイテムが、与えられた条件の下で、与えられた期間、故障せずに、要求どおりに遂行できる能力」と定義されている。信頼性工学では、信頼性を定量的に把握することでシステムの設計や保全に役立てることを目指している。具体的には、信頼度 (reliability) と呼ばれる「アイテムが故障しない確率」を用いて評価する。

構造信頼性とは、構造が持つ強度的機能に対する

信頼性のことである。構造の場合、強度的機能の故障は破損と考えられるため、構造信頼性は「構造が破損しない性質」と言い換えられる。一般的に、構造信頼性理論では、構造が破損する確率（破損確率：probability of failure）が用いられる。定義より、破損確率 P_f と信頼度 R の関係は、

$$P_f = 1 - R \quad (1)$$

で与えられる。ある破損モードに対する被害度 (severity) が C_D で与えられたとすると、定量的なリスクは以下の式で与えられる。

$$(\text{Risk}) = C_D \times P_f \quad (2)$$

次節以降で、荷重・強度モデルと限界状態関数で表現された場合のそれぞれに対する、破損確率の計算方法を構造信頼性に関する文献⁴⁾⁷⁾を基に説明する。

2.2 荷重・強度モデルによる破損確率の評価

構造信頼性理論では、荷重 x_s と強度 x_r はそれぞれ不確定性 (uncertainty) を有すると考える。そこで、それぞれを独立な確率変数であるとする。すると、破損確率は以下のように表現できる。

$$P_f = P[x_r \leq x_s] \quad (3)$$

次に、破損確率の計算方法を考える。荷重がある実現値 s をとる場合を考える。破損条件は、強度 x_r がこれを下回るときである。よって、破損確率は次式のようになる。

$$P_f = \int_0^s f_R(x_r) dx_r = F_R(s) \quad (4)$$

ただし、強度の確率密度関数と累積分布関数をそれぞれ $f_R(\cdot)$ 、 $F_R(\cdot)$ としている。荷重の実現値が s となる確率は、荷重の確率密度関数を $f_s(\cdot)$ とすれば、 $f_s(s)ds$ と表されるので、すべての荷重の実現値で積分することで破損確率が以下のように得られる。

* 技術研究所

$$P_f = \int_0^{\infty} F_R(x_s) f_S(x_s) dx_s \quad (5)$$

次に、典型的な例として荷重・強度が以下に示す正規分布に従う場合を考える。

$$x_s \sim N(\mu_s, \sigma_s^2) \quad (6A)$$

$$x_r \sim N(\mu_r, \sigma_r^2) \quad (6B)$$

荷重と強度の差である安全余裕 (safety margin) x_m は、正規分布の差もまた正規分布に従うことから、次のように与えられる。

$$x_m \sim N(\mu_m, \sigma_m^2) \quad (7A)$$

$$\mu_m = \mu_r - \mu_s \quad (7B)$$

$$\sigma_m^2 = \sigma_r^2 + \sigma_s^2 \quad (7C)$$

破損条件は、安全余裕が負となることであるから、破損確率は式(7)より次のように計算できる。

$$\begin{aligned} P_f &= P[x_m \leq 0] = P\left[\frac{x_m - \mu_m}{\sigma_m} \leq -\frac{\mu_m}{\sigma_m}\right] \\ &= \Phi\left(-\frac{\mu_m}{\sigma_m}\right) = \Phi(-\beta) \end{aligned} \quad (8)$$

ただし、 $\Phi(\cdot)$ は標準正規累積分布関数、 β は信頼性指標 (reliability index) と呼ばれる破損確率に対応する指標である。式(7)と式(8)を用いれば、以下のように破損確率を計算できる。また、参考として、信頼性指標の値と破損確率の関係を表1に示す。

$$P_f = \Phi\left(-\frac{\mu_r - \mu_s}{\sqrt{\sigma_r^2 + \sigma_s^2}}\right) \quad (9)$$

表1 信頼性指標と破損確率の関係

Reliability index	Probability of failure
1.0	0.159
2.0	2.27×10^{-2}
3.0	1.35×10^{-3}
4.0	3.17×10^{-5}

2.3 限界状態関数による破損確率の計算

一般的な構造物に対する破損確率を計算する際は、寸法、材料物性、使用環境といった複数のパラメータによって破損条件が表現されることが多い。このような場合、限界状態関数 (limit state function) を用いて破損条件を表現するとよい。具体的には、不確定性を有するパラメータ (確率変数) のベクトル

ルを $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_{n_r})^T$ 、確定的なパラメータのベクトル

トルを $\mathbf{z} = (z_1, \dots, z_{n_d})^T$ として以下のように表す。

$$g(\mathbf{x}, \mathbf{z}) \begin{cases} > 0 & \text{safe} \\ = 0 & \text{limit state} \\ < 0 & \text{failure} \end{cases} \quad (10)$$

このとき、破損確率は \mathbf{x} の結合確率密度関数 $f_{\mathbf{x}}(\cdot)$ を用いて次のように計算できる。

$$P_f = \int_{g(\mathbf{x}, \mathbf{z}) \leq 0} f_{\mathbf{x}}(\mathbf{x}) d\mathbf{x} \quad (11)$$

一般的に式(11)を解析的に解くことは困難であるため、様々な近似解法が研究されてきている。本稿では、数値シミュレーションであるモンテカルロ法 (Monte Carlo method: MC) と限界状態関数の近似によって評価する一次信頼性法 (First Order Reliability Method: FORM) と二次信頼性法 (Second Order Reliability Method: SORM) について説明する。なお、以下の議論において確定的なパラメータ \mathbf{z} の表記は省略する。

2.3.1 モンテカルロ法

モンテカルロ法では、確率変数が従う分布から乱数を発生させることによって、疑似的に確率現象を再現し、破損確率を近似的に計算する。一般的に構造信頼性で対象とする破損確率は非常に小さい値であるため、精度良く求めるためには非常に多くの乱数が必要である。

はじめに、限界状態関数の値に対応した指標関数 (index function) を次のように定義する。

$$I(\mathbf{x}) = \begin{cases} 1, & g(\mathbf{x}) \leq 0 \\ 0, & g(\mathbf{x}) > 0 \end{cases} \quad (12)$$

ここで、 $I(\mathbf{x})$ の期待値を定義から計算すると、

$$\begin{aligned} E[I(\mathbf{x})] &= \int I(\mathbf{x}) f_{\mathbf{x}}(\mathbf{x}) d\mathbf{x} \\ &= \int_{g(\mathbf{x}) > 0} 0 \cdot f_{\mathbf{x}}(\mathbf{x}) d\mathbf{x} + \int_{g(\mathbf{x}) \leq 0} 1 \cdot f_{\mathbf{x}}(\mathbf{x}) d\mathbf{x} \\ &= \int_{g(\mathbf{x}) \leq 0} f_{\mathbf{x}}(\mathbf{x}) d\mathbf{x} = P_f \end{aligned} \quad (13)$$

となり、破損確率と等しくなることがわかる。 $I(\mathbf{x})$ の期待値は、発生させた乱数のうち破損条件を満たすものの割合に等しい。よって、乱数全体 N 個のうち破損条件を満たしたものが N_f 個であったとすれば、破損確率の近似値 \hat{P}_f は次のように計算できる。

$$\hat{P}_f = \frac{N_f}{N} \quad (14)$$

ここで、破損確率の近似精度は N を大きくするほど向上することは明らかである。そのため、どの程度大きくすればよいかは近似精度の閾値によって決められる。一つの考え方として、破損確率の変動係数を用いる方法が知られている⁷⁾。

2.3.2 一次信頼性法 (FORM)

一次信頼性法とは、限界状態関数（一般的には非線形関数）をテイラー展開によって線形近似し、確率変数の期待値の線形性を利用して破損確率を計算する方法である。テイラー展開する点の位置によって関数形が変化するため、どの点周りで展開するのかが重要となるが、一次信頼性法では限界状態上の点でテイラー展開をすることで、信頼性指標の不変性を担保している。

以降の説明では、簡単のために確率変数 \mathbf{x} が全て独立な正規分布に従うとする。なお、この仮定が成り立たない場合には、確率変数 \mathbf{x} をRosenblatt変換すると独立な正規分布に近似することができ⁴⁾、同様の議論となる。

いま、確率変数 \mathbf{x} の平均と標準偏差を用いて標準正規化した確率変数を $\mathbf{u} = (u_1, \dots, u_{n_r})^T$ とすると、

$$u_i = \frac{x_i - \mu_i}{\sigma_i} \quad (i = 1, \dots, n_r) \quad (15)$$

である。また、これによって線形写像された限界状態関数を $G(\cdot)$ とする。

ここで、限界状態 (limit state) 面上でかつ原点からの距離が最短となるような点 \mathbf{u}^* を考える。この点をMost Probable Point (MPP) と呼ぶ。MPPを求めるためには、以下の最適化問題を解く必要がある。

$$\text{Min.: } \mathbf{u}^T \cdot \mathbf{u} \quad (16A)$$

$$\text{s.t.: } G(\mathbf{u}) = 0 \quad (16B)$$

式(16)の最適化問題に対して、ラグランジュ未定乗数法⁸⁾を用いる。ラグランジュ乗数を λ とすれば、

MPPの必要条件が以下のように導ける。

$$\begin{aligned} \nabla(\mathbf{u}^T \cdot \mathbf{u}) + \lambda \nabla G(\mathbf{u}) &= 0 \\ \therefore \mathbf{u} &= -\frac{\lambda}{2} \nabla G(\mathbf{u}) \end{aligned} \quad (17)$$

これは、MPPの位置ベクトルと勾配方向ベクトルが正反対の向きであることを示している (図1)。

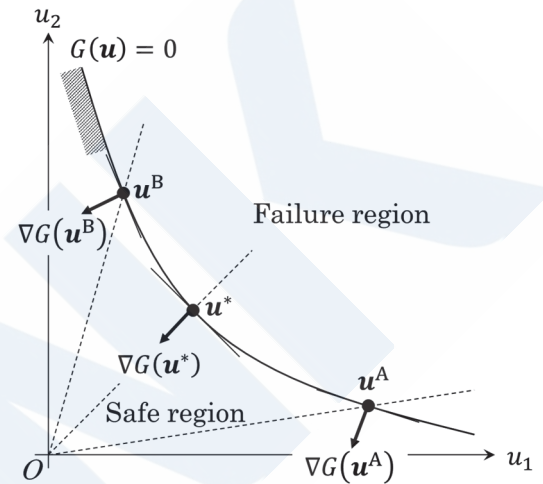


図1 位置ベクトルと勾配方向ベクトルの関係

次に、限界状態関数をMPP周りでテイラー展開して線形近似する。

$$G(\mathbf{u}) \approx G_l(\mathbf{u}) = \nabla^T G(\mathbf{u}) \cdot (\mathbf{u} - \mathbf{u}^*) \quad (18)$$

線形近似された限界状態関数 $G_l(\mathbf{u})$ は、独立した確率変数の線形和であることから、期待値と分散が次のように求められる。

$$E[G_l(\mathbf{u})] = -\nabla^T G(\mathbf{u}) \cdot \mathbf{u}^* \quad (19A)$$

$$\text{Var}[G_l(\mathbf{u})] = |\nabla G(\mathbf{u})|^2 \quad (19B)$$

式(8)を参考に破損確率を求めると、

$$\begin{aligned} P_f &\approx P[G_l(\mathbf{u}) \leq 0] = \Phi \left(-\frac{E[G_l(\mathbf{u})]}{\sqrt{\text{Var}[G_l(\mathbf{u})]}} \right) \\ &= \Phi \left(\frac{\nabla^T G(\mathbf{u}) \cdot \mathbf{u}^*}{|\nabla G(\mathbf{u})|} \right) = \Phi(-\beta) \\ \therefore \beta &= -\frac{\nabla^T G(\mathbf{u}) \cdot \mathbf{u}^*}{|\nabla G(\mathbf{u})|} \end{aligned} \quad (20)$$

ここで、式(17)で示したように、MPPの位置ベクトルと勾配方向ベクトルが正反対であることを利用すると、

$$\beta = -\frac{\nabla^T G(\mathbf{u})}{|\nabla G(\mathbf{u})|} \cdot \mathbf{u}^* = \left(-\frac{\nabla^T G(\mathbf{u})}{|\nabla G(\mathbf{u})|} \cdot \frac{\mathbf{u}^*}{|\mathbf{u}^*|} \right) \cdot |\mathbf{u}^*| = |\mathbf{u}^*| \quad (21)$$

となり、信頼性指標が原点からMPPまでの距離に等しいことが示される。つまり、一次信頼性法では、MPPを式(16)から導出し、原点からMPPまでの距離を信頼性指標とすれば破損確率が計算できる。なお、式(16)の最適化問題はラクビッツ・フィースラー法等の繰り返し計算が必要となる⁹⁾。

最後に、一次信頼性法の概略を図2に示す。この図のように、限界状態関数の勾配方向に軸を持つ一次元標準正規確率密度関数を用いて、一次信頼性法では破損確率を評価しているとみなせる。また、図に示す通り、限界状態関数の非線形性によって破損領域が変化するため、近似誤差が生じる。しかし、距離が遠いほど指数関数的に破損確率への影響が低下することを踏まえれば、近似誤差は無視できる程度と考えることができる。一方、計算精度の要求が高い場合（破損確率の近似誤差をより小さくする場合）には、次節で紹介する二次信頼性法のような限界状態関数の曲率を考慮した手法で計算することが望ましい。

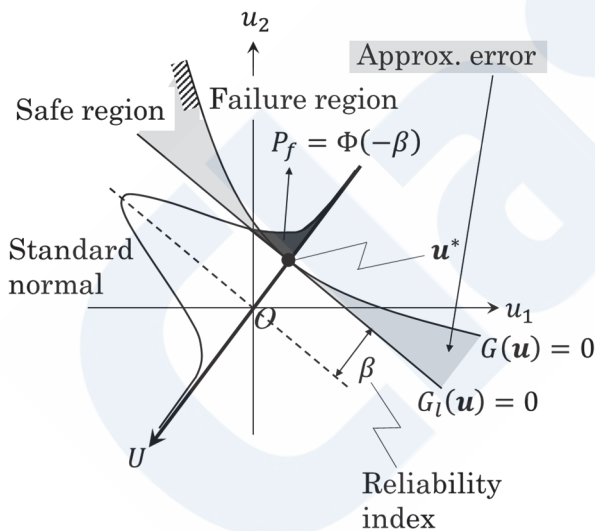


図2 一次信頼性法

2.3.3 二次信頼性法 (SORM)

二次信頼性法では、限界状態関数をテイラー展開によって二次近似する。これまでの研究でいくつかの方法が提案されているが、本稿では拙著⁹⁾の考え方を簡単に紹介する。

確率変数 \mathbf{x} が全て独立な正規分布に従うとの仮定の下、限界状態関数をMPP上でテイラー展開した

二次関数を考える。

$$g(\mathbf{x}) \approx g_s(\mathbf{x}) = \mathbf{x}^T \mathbf{A} \mathbf{x} + \mathbf{b}^T \mathbf{x} + c \quad (22)$$

式(22)に対して標準正規化によって写像された限界状態関数を以下のように得たとする。

$$G_s(\mathbf{u}) = \mathbf{u}^T \mathbf{A}' \mathbf{u} + \mathbf{b}'^T \mathbf{u} + c' \quad (23)$$

このとき、 \mathbf{A}' の固有値の符号が同符号か異符号かで場合分けし、破損確率を計算する。詳細は煩雑であるため省略するが、一次信頼性法と比較して破損確率の近似精度が高いことが示されている。

2.4 不確定性の分類

破損確率の評価に注目すると、荷重や強度等の不確定性が、それぞれ妥当な統計モデルで表現されていることが構造信頼性理論の前提となる。しかし、一概に不確定性といっても様々な種類が存在する。構造信頼性の分野では、一般的に以下の分類が考えられている¹⁰⁾。

- ✓ Aleatory uncertainty (偶然的な不確定性)：物理現象など本質的なばらつきのこと。知見や情報が収集されたとしても低減不可能なもの。例えば、波高や材料定数のばらつきが挙げられる。
- ✓ Epistemic uncertainty (認識論的な不確定性)：情報が不足することによって生じるばらつきのこと。技術の向上などで低減が可能なもの。例えば、規則算式に含まれるモデル化の不確定性が挙げられる。

ある性能が本質的に持つ不確定性がaleatory uncertaintyであるのに対し、その情報がどの程度確信を持てるのかがepistemic uncertaintyである。前者を把握することで、対象とする現象の統計的な理解を促すことができる。一方、後者を把握することで、統計モデルの妥当性や低減すべき不確定性の要因 (source) が理解できる。構造信頼性理論では、これらの不確定性を定量化することではじめて工学的な取り扱いが可能となる。基礎的な不確定性の定量化手法 (Uncertainty Quantification) については、文献¹¹⁾等に数学的な整理がされている。

3. 最適設計問題から考える信頼性設計とリスクベース設計の違い

3.1 信頼性に基づく最適設計

信頼性設計と最適設計問題に適用する場合を考える。これは、信頼性に基づく最適設計 (Reliability-based Design Optimization: RBDO) と呼ばれ、破

損確率の制約を満たす設計の中で所望の性能を最小化（または最大化）するような設計解を探索する。設計変数を $\mathbf{d} = (d_1, d_2, \dots, d_n)^T$ ，確率変数を $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_{n_r})^T$ とすると，次のように定式化される。

$$\text{Min.: } f(\mathbf{d}) \quad (24A)$$

$$\text{s.t.: } P[g_j(\mathbf{d}, \mathbf{x}) \leq 0] \leq \Phi(-\beta_j^{\text{Tar}}) \quad (24B)$$

$$(j = 1, \dots, m)$$

ただし， $f(\cdot)$ は目的関数（重量など最小化したい性能）， m は限界状態関数の数， β_j^{Tar} は j 番目の限界状態関数に対する目標の信頼性指標である。目標の信頼性指標は各破損モードに対する破損確率の上限値（目標信頼性）を与えるもので，一般的には設計者が設定する。

3.2 リスクベース最適設計

リスクベース設計を最適設計問題に適用する場合を考える。これは，リスクベース最適設計（Risk-based design optimization）と呼ばれ，リスクを目的関数や制約関数にとることで，リスクを考慮した最適解が得られる。本稿では，式(2)で示した定量的なリスクを損傷にかかるコストの期待値と読み替え，損傷以外の要因によって生じるコスト C_0 （初期コストと呼ぶ）との総和を最小化する最適設計問題を考える。つまり，以下のような定式化となる。

$$\text{Min.: } f(\mathbf{d}) = C_0(\mathbf{d}) + \sum_{j=1}^m C_{Dj}(\mathbf{d}, \mathbf{x}) \cdot P_{fj} \quad (25A)$$

$$\text{where: } P_{fj} = P[g_j(\mathbf{d}, \mathbf{x}) \leq 0] \quad j = 1, \dots, m \quad (25B)$$

いま，被害度 C_D が設計変数に依存しないと仮定する。また，簡単のため破損モードは1つであるとす。このとき，式(25A)で示した最適設計問題の目的関数は以下のように書き換えられる。

$$f'(\mathbf{d}) = \alpha \cdot C_0(\mathbf{d}) + (1 - \alpha) \cdot P_f \quad (26A)$$

$$\text{where: } \alpha = \frac{1}{C_D + 1} \quad (26B)$$

式(26A)は，重み係数 α を用いた初期コストと破損確率の線形加重和となっている。これは，初期コストと破損確率を同時に最小化する多目的最適設計問題を解いていることと同義である。つまり，式(25)は以下のように書き換えられる。

$$\text{Min.: } C_0(\mathbf{d}) \quad (27A)$$

$$\text{Min.: } P_f(\mathbf{d}, \mathbf{x}) \quad (27B)$$

式(27)の多目的最適設計問題の最適解は，Pareto解と呼ばれる，優劣が付けられない解の集合（Pareto front）として与えられる。図3に目的関数空間におけるPareto解の様子（概略図）を示す。この図より，重み係数 α の値に応じてPareto解が選択されることがわかる。式(26B)より，重み係数は被害度によって決定されることから，被害度によってPareto解が選ばれると考えられる。

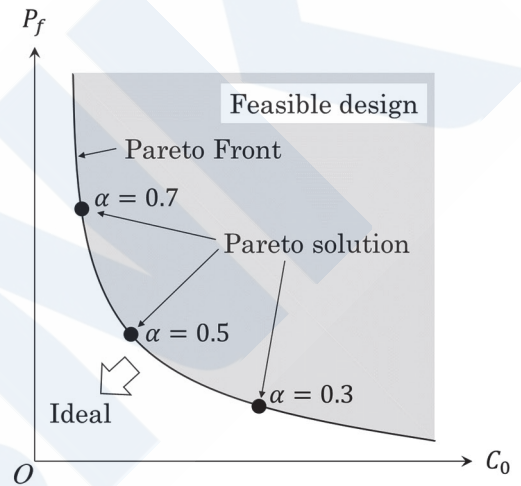


図3 リスクベース最適設計のPareto解

最後に，リスクベース設計におけるPareto解の解釈を考える。例として， $\alpha = 0.7$ におけるPareto解の破損確率を上限とした場合の実行可能領域（解が存在する部分）を図4に示す。図に示す通り，実行可能領域内で初期コスト C_0 が最小となる解は $\alpha = 0.7$ におけるPareto解となる。つまり，Pareto解は，破損確率の制約を満足する実行可能な設計群から C_0 が最小となる解を探索した結果と解釈できる。これは，前節で説明した信頼性に基づく最適設計と本質的には同義である。両者の異なる点は，信頼性に基づく最適設計では目標信頼性を設計者が決めていたのに対して，リスクベース最適設計では被害度によって目標信頼性が決められる点である。つまり，被害度という客観的かつ合理的な値で閾値を決める点がリスクベース最適設計の特徴といえる。

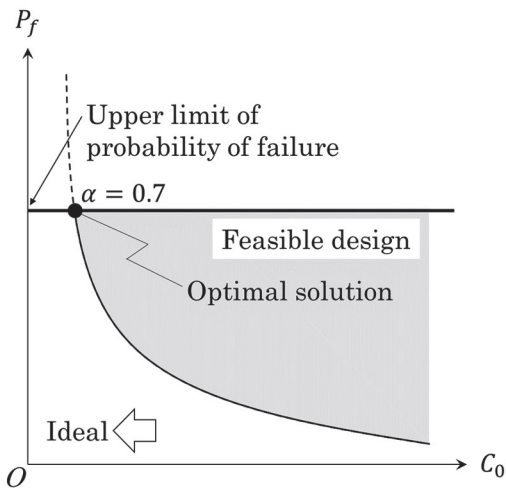


図4 Pareto解の解釈

4. リスクベース設計の展開

4.1 GBS-SLA interim guideline

従来、国際航海に従事する船舶の構造規則は実質的に船級等に委ねられていた。しかし、1980年代以降、ばら積み貨物船や油タンカーの事故が多発したことを受け、IMOが船体構造規則の策定に関与するべきとの機運が高まった。これを受け、2003年のIMO MSC77 (Maritime Safety Committee) にお

いてトップダウン型の規則体系であるGBSの制定が合意された。これに基づき、IMOで順次作業が進められるとともに、IACSでもこの動きに対応してCSR (Common Structural Rule) の開発が進められていった。GBS適合構造規則であるCSRは、一般的に極めて規範的かつ自由度が低い規則であるとされる。そのため、新コンセプト船に代表される新しい設計に対しては自由度の高い異なるアプローチが求められる。そこで、安全性を定量的に設定するSLAに基づいたGBS-SLAの策定の必要性が強調されるようになり、安全性を測る尺度としてリスクを用いることが合意された。また、GBSの審議以前に発行されたFSA (Formal Safety Assessment) guideline³⁾との親和性が注目され、結果としてGBS-SLAにおいてもFSAのアプローチが数多く参照されている。これらGBS-SLAに関連する動向を表2に示す。

GBS-SLAは、次の5つの階層 (Tier) から成る。

- I. Goals : 目標
- II. Functional requirements : 機能要件
- III. Verification of conformity : 適合検証
- IV. Rules and regulations for ships : 船級規則等
- V. Industry practices and standards : 業界標準等

表2 GBS-SLAに関する動向

Year	IMO	IACS
~1999	比較的大型のばら積み貨物船の全損事故が発生	
1999	フランスのブルターニュ沖でエリカ号 (油タンカー) が折損事故	
2001	MSC74およびMSPC47 (2002) においてIMO Rule-Making ProcessにおけるFSAガイドラインが承認される	
2002	スペインのガリシア沖でプレステージ号 (油タンカー) が折損事故	
2003	MSC77にてGBSを制定することが合意される	第47回理事会においてCSRの開発が合意される
2004	MSC78でGBSに関する本格的な審議が開始される	
2005	MSC80においてSLAによるGBS構築が提唱される	第52回理事会においてCSRが採択される
2006		CSRの適用開始
2010	MSC87においてIMO GBSが採択される	
2012	MSC90においてSLAに基づくinterim guidelineのワークプランが裏書され、そこで考慮されるべき要素の草案が作業グループで同意される	
2017	MSC98およびMPEC72 (2018) においてFSA Guidelinesの改正が承認される	
2018	<ul style="list-style-type: none"> ・ MSC99においてFSAガイドラインの対応するステップを適用することが議論される ・ Interim guidelineの草案が承認され、関連するMSC circularを準備することが合意される 	
2019	MSC100において、interim guidelineが承認される	

この5つの階層のうち、IMOの条約に含まれるものは、Tier IとTier IIであり、詳細な規則であるTier IVについては関連するIMOコードや船級規則などに含まれるとされる。以下、本稿ではTier IとTier IIについて説明する。

Goalsとは、達成すべき目標のことを指し、安全要求レベル (required safety level) を記述することが規定されている。安全要求レベルとは、リスクにさらされる程度 (measure of exposure to risk) の最大値であり、社会的に受容可能な程度とすべきとされる。ガイドラインによると、安全要求レベルは定量的またはプロセスを通じて暗黙的に指定がされる。また、GoalsはIMOの海上安全委員会(MSC)によって規定されるものとされている。

Functional requirementsは、Goalsを達成するために満足すべきクライテリアであり、IMOの各委員会において規定される。また、次に挙げる項目を遵守することとされる。

- ✓ Goalsを達成するために必要な全ての分野をカバーすること
- ✓ 関連する全てのハザードに対処すること
- ✓ Tier IVの規則群を検証するための基準を設けること
- ✓ 更なる技術開発を進めるために、特定の技術に依存しないこと
- ✓ どの機能が達成されるべきかを明確にすること

GBS-SLAでは、ハザードの特定やリスクの定量化等の手続きが必要であるが、これらはFSAに規定されたものを踏襲することになっている。

4.2 疲労強度クライテリアの事例

リスクベース設計の概念は、リスクを基準に目標信頼性を決めるという考え方にある。本節では、これを踏まえた構造規則開発の一例として、船体構造の疲労亀裂損傷を対象としたクライテリアの設定方法を紹介する。

船体構造は大規模な溶接構造物であるため、多数の溶接継手部が存在する。そのため、疲労強度上の評価個所が船体構造中に複数存在し、それぞれに対して設計S-N線図を利用した疲労強度照査が行われている。一般的に、疲労強度照査は累積疲労被害度Dを基に行われ、本会の鋼船規則C編全面改正での新構造規則では以下の式で評価される。

$$\eta \cdot D \leq 1 \quad (28)$$

ここで、 η は対象個所によって変化する修正係数であり、区画の機能性に関連するかどうかで決まる。

例として、式(28)を基にリスクベース設計の考え

方を用いた疲労強度クライテリアを考えてみよう。累積疲労被害度が設計変数 d と確率変数 x を用いて表現されるとし、ある部材に対する目標信頼性指標を β^{Tar} とすると、信頼性を用いた制約式は以下のようになる。

$$P[g(\mathbf{d}, \mathbf{x}) \leq 0] \leq \Phi(-\beta^{\text{Tar}}) \quad (29A)$$

$$\text{where: } g(\mathbf{d}, \mathbf{x}) = 1 - D(\mathbf{d}, \mathbf{x}) \quad (29B)$$

すでに説明した通り、式(29A)の左辺に当たる信頼性解析は解析的に解くことが難しい。また、対象個所ごとに信頼性解析を行うことは設計の実務上、手間のかかることである。そのため、構造規則や規格においては、設計者の使いやすさを考慮した部分安全係数 (Partial Safety Factor: PSF) を用いることが多い。例えば、非常に簡単な例として、確率変数の平均値ベクトル μ と疲労被害度に対する部分安全係数 η_{PSF} を用いて、式(29A)と等価な制約が次のように得られるとする。

$$g_{\text{PSF}}(\mathbf{d}, \mu) = 1 - \eta_{\text{PSF}} \cdot D(\mathbf{d}, \mu) \geq 0 \quad (30)$$

ここで、部分安全係数 η_{PSF} は目標信頼性指標 β^{Tar} に対応して計算されるものであり、構造規則や規格においては、部分安全係数表と呼ばれる表の形で整理される。部分安全係数を導出するには、3章で述べたMPPを用いた方法などがある。

さて、次に問題となるのが、いかにして目標信頼性指標を決定するかである。信頼性設計であれば、設計者がそれぞれの経験等を基に決定すればよい。しかし、構造規則などの合理的かつ透明性が求められるものであれば、リスクベース設計の考え方をを用いて決められることが望ましい。疲労亀裂損傷であれば、船体構造全体への直接的な影響は少ないものの、区画の機能を喪失する恐れがあるため、区画の機能維持の観点からリスクを考慮する必要がある。つまり、図5に示すように、部材ごとにリスク評価を行い、リスクレベルに対応する目標信頼性を決めておくことが必要となる。この考え方をを用いると、詳細な評価が不要となる部材を特定することなども可能となる。

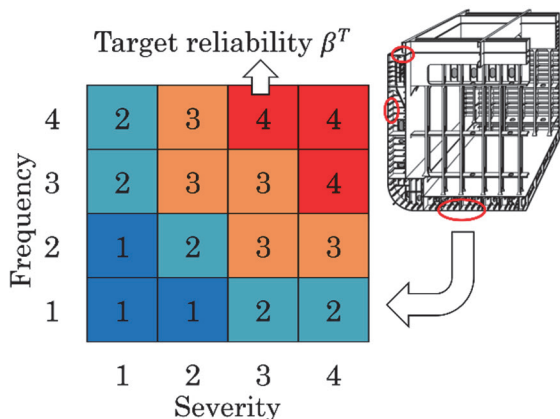


図5 部材ごとのリスク評価と目標信頼性の設定

リスクベース設計の考え方では、データベースの整備が最も重要な作業といえる。例えば、区画の水密性に注目した際、水密性を喪失するような疲労亀裂損傷がどの程度過去に発生したのかを整理し、関連するデータ（亀裂寸法など）と共に記録しておくことで一般化が可能となる。これをもとに、どの部材が水密性を喪失しやすいのか、被害度はどの程度なのかについて把握することができる。また、必要ならば、被害度の推定式も検討すべきであろう。

以上の作業を通じて、部分安全係数表の形で整理すれば、リスクベース設計の考え方をを用いた疲労強度クライテリアが示される。しかし、本稿で説明した作業を具体的に進めるには、技術的な課題は山積していると考えられる。それらについて、次節で説明するとともに、本会の取り組みも簡潔に紹介する。

4.3 技術的課題と本会の取り組み

4.3.1 リスク情報の収集

先に述べた通り、質の高いデータベースの作成はリスクベース設計の考え方を利用する上で重要である。データベースに注目すると、どのような項目で事故データを分類・記録するのが課題の一つと考えられる。これらの項目は、後に構築される被害度推定式に必要な入力変数や前提条件を決定するため、入念な計画と専門家による知見が必要となる。また、なるべく幅広いデータを集め、適宜内容のアップデートをすることが、データベースの質を担保する上で重要である。そのためには、社会全体でデータを共有する、報告しあう環境を整備することが求められるであろう。

これに対して本会は、船級検査で得られた情報をデータベース化し、様々なサービスに展開することを検討している。その一環として、リスク情報に特化したデータを抽出・整理し、リスク評価やクライテリアの設定に役立てるべく活動を行っている。また、広く情報を求める枠組みであるvulnerability

報告に関しての検討を進めており、海事クラスター全体でリスク情報を収集・活用する仕組みについて本技報で山田と梶田が報告している。

4.3.2 不確定性の定量化

構造信頼性理論をベースとする以上、不確定性の定量化は重要である。特に、船体構造の設計においては、航路や気象条件によって荷重の不確定性が大きく変化することを念頭に置かなければならない。また、データを活用することにより、epistemic uncertaintyを低減し、より現実に近い精度の高い解析が期待できる。

これに対して本会では、精度の高い解析・評価技術の確立に向けた研究として下記のテーマ等に取り組んでいる。

- ✓ AISデータを用いて実遭遇海象を精度良く把握し、操船影響を定量評価する研究
- ✓ 潮流によって生じる波高データの誤差を低減するため研究
- ✓ 物理的背景に基づいた弾性座屈後の崩壊強度を高精度に推定する算式に関する研究

これらを基にリスクベース構造規則の開発へと展開するべく、日々活動を進めている。

5. おわりに

本稿では、リスクベース設計を理解するための基礎となる構造信頼性理論について説明し、信頼性設計との違いについて最適設計問題を用いた解説を行った。そして、リスクベース設計の展開として構造規則の開発法GBS-SLAについて触れた後、リスクベース設計の考え方をを用いたクライテリア開発事例と技術的課題について説明した。本稿がリスクベース設計に取り組む上での一助となれば幸いである。

謝辞

横浜国立大学 酒井信介教授には、本稿の作成に当たり適切な助言を頂きました。また、IMOガイドラインの記述において、本会 石代宗之技師（元技術研究所、現坂出支部）が行った調査結果を参考にさせていただきました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 酒井信介, 小林英男: リスクベース設計, 日本機械学会誌, Vol. 106, No. 1020 (2003), pp. 853-856
- 2) IMO: MSC. 1/Circ. 1596 (2019), Interim

guidelines for development and application of
IMO Goal-Based Standards Safety Level
Approach

- 3) 日本工業規格：ディペンダビリティ（総合信頼性）用語，JISZ8115:2019
- 4) P. Thoft-Christensen and M. J. Baker: Structural Reliability Theory and Its Applications, Springer, 1982
- 5) S. K. Choi, R. V. Grandhi and R. A. Canfield: Reliability-based Structural Design, Springer, 2007
- 6) 市川昌弘：構造信頼性工学—強度設計と寿命予測のための信頼性手法—（第2版），海文堂，1996
- 7) 室津義定，邵暁文，米沢政昭：システム信頼性工学，共立出版，1996
- 8) （例えば，）今野浩，山下浩：非線形計画法，日科技連，1978
- 9) 権陽弥，田中博基，伊藤誠，小木曾望：信頼性に基づく最適設計のための改良型応答曲面単一ループ法の提案と評価，日本機械学会論文集，Vol. 85, No. 874 (2019), DOI: 10.1299/transjsme.19-00027
- 10) A. Der Kiureghian and O. Ditlevsen: Aleatory or epistemic? Does it matter?, Structural Safety, Vol. 31, No. 2 (2009), pp. 105-112.
- 11) C. Soize: Uncertainty Quantification, Springer, 2017
- 12) IMO: MSC-MEPC. 2/Circ. 12/Rev. 2 (2018), Revised Guidelines for Formal Safety Assessment (FSA) for Use in the IMO Rule Making Process