Risk Based Maintenance 手法の紹介と

船舶海洋分野適用時の課題と効用

- 合理的な船舶保守のための提案

柴田 勝規** 小林 大祐**

Introduction of "Risk Based Maintenance" Method, and Usefulness and Problems in Case of Applying It to Ships and Offshore Facilities
- Proposal for Optimized Ship Maintenance

By Katsuki Shibata and Daisuke Kobayashi

"Risk Based maintenance (RBM)" is a method to perform reasonable maintenance. The maintenance procedures and their interval are optimized based on the "Risk" calculated by PoF (Probability of Failure) and CoF (Consequence of Failure). RBM can perform the maintenance optimized safely and economically by using the CoF factor. Also, this is suitable for the long term management of facilities because this method is based on probability theory. RBM has already been known as a general method in Oil Refinery and Chemical Industry, and has a potential to optimize a maintenance of ships or offshore facilities.

1. はじめに

"Risk Based Maintenance (RBM)"とは、設備保全の時期や内容を決めるにあたり、対象機器の「リスク」に着目し、合理的にリスクを許容範囲内にコントロールするための手法である。機器の状態に着目して保全の時期や内容を決めるという点においては"Condition Based Maintenance (CBM)"と同様であるが、CBM が単に対象機器の故障時期のみに着目するのに対して、RBM では故障の結果から生ずる影響や被害に着目する。すなわち、RBMにおける 保全優先度の評価は対象機器が壊れるかどうかではなく、何らかのメンテナンスを行うことが安全も含めた経済的合理性に照らして妥当かどうかで判断される。言いかえると、RBM とは「どこまで現状を放置しても構わないか」を評価するものである。この特徴が、維持管理のためとは言え容易には設備の運転を止めることが出来ない石油精製/化学産業や発電所、製鉄所などの要求にマッチしたため、設備保全に関する規制緩和が進んでいる欧米を中心に前述の産業に広く浸透している。我が国においても遅ればせながら設備保全の規制緩和

が進んだことで、RBM の導入機運が高まりつつある。船舶への適用は現行規則との兼ね合いもあり、具体的な実施事例は確認されていないが、RBM は船舶運用の合理性改善ツールとしての可能性が大いにあると考え、その概要を紹介するものである。

2. RBM 手法の概要

2.1 リスク評価と活用

RBM における「リスク」は次式のように定義される。

$$\text{リスク} = \text{故障確率(PoF)} \times \text{影響度(CoF)} \quad (1)$$

RBM とは簡単に説明すると式(1)で求めるリスク値を経済合理性に基づき最適解へ収斂させるための手法と言える。すなわち図1に示すように、高すぎるリスクに対しては PoF (Probability of Failure) と CoF (Consequence of Failure) を下げる対策を講じることで安全性を高め、低すぎるリスクに対しては過剰な対策をやめて PoF と CoF を上げることで経済性を高める。また、これによって故障による設備の不稼働とともに保全のための不稼働も抑えることができ、設備の生産性向上を図ることができる。

*原稿受付 令和2年2月18日。

** 株式会社IMC

図1 RBMにおけるリスク管理

2.2 リスクマトリックス

実際のリスク判定では式(1)で求めるリスク値をそのまま使うのではなく、図2に示すリスクマトリックスを用いる。図のように PoF と CoF をそれぞれ5段階にランク付けしてプロットし、該当するマス目に応じて「Low(L)」「Medium(M)」「Medium-High(M-H)」「High(H)」の4段階に分類する手法が一般的に用いられている。このリスクマトリックスは米国石油協会(API)が定めた API581 規格に則る石油精製プラント向けのものであるが、多くの実績データと知見に基づいて定められており、普遍的に利用できる。そのため、他産業や API581 規格で定義されていない設備類を対象とする場合においても一般的に利用されている。

なお、この他のリスク評価に関する公的規格としては、欧州標準化委員会 (CEN) の EN16991、国内においては日本高圧力技術協会 (HPI) が前述の API581 規格を独自拡張した HPIS Z107 がある。

図2 リスクマトリックス

リスクマトリックスからリスクランクが求まったら、予め定めておくアクションプランに従いリスクコントロールを行う。このアクションプランについては API581 にも定義はなく、設備ごとに設備事情に基づき定める。表1に例を示す。

表1 リスクランク毎のアクションプラン例

リスク	色	アクション
Low		法定検査以外は何もしない。
Medium		現状の管理体制を維持する。
M-H		検査周期を短くする、運転条件を変更するなどの対策を施す。
High		直ちに開放検査を行う。

2.3 故障確率 (PoF: Probability of Failure)

RBMにおけるPoF評価手順はこの手法を特徴づけるものである。RBMにおけるPoFはCBMのように「いつ故障するか?」を検証するためのものではなく、設備のライフサイクルにわたるメンテナンスの合理性を検証することが目的である。そのため、長期スパンでのPoFの推移を予測することが求められるため、対象機器の設計情報や過去の運用実績データに基づき、予め標準的な運転時間に対するPoFの分布を定義し、この分布に従い将来のPoFを推定する。これによって現在のみならず、ライフサイクルにわたったリスクコントロールと保全の最適化が可能となるのが特徴である。また、この手法においては、検査をすることによって機器の予測寿命を延ばすことも出来る。具体的な原理は次のとおりである。ある機器の寿命を考えた場合、品質のバラつきや運用環境の違いなどによって各機器の故障時期は MTBF (Mean Time Between Failure) を中心にした正規分布に従うと考えられる。この正規分布が与えられた上で、ある機器の予測寿命を定める場合、概ね故障しないであろうと考えられるPoFの管理ターゲットを設定し、PoF分布とターゲットの交点を予測寿命と定める。しかし、このように定めた寿命にはまだまだ余寿命があり、実際には予測寿命を超えて運用しても問題ない場合が大半である。そこで有効な検査によって当該機器の状態が良好であることが確認された場合は、ベイズ統計の理論に基づき、PoF分布の標準偏差 σ を小さく補正する。これにより、PoFと管理ターゲットの交点が後ろにずれるので、この分だけ予測寿命を延ばすことができる。

図3 有効な検査による寿命延長の原理

逆に検査結果が悪ければ σ が大きく補正され、予測寿命は短くなる。このように、RBM では上記手法を用いることによって長期間のリスクコントロールを行うだけでなく、検査結果による予測寿命の補正を行うことでライフサイクルにわたった経済合理性に優れた保全を可能としている。

2.4 影響度 (CoF : Consequence of Failure)

RBM における CoF は一般的に故障に伴い発生する経済損失を指標として定める。一般的には次式で算出する予想損失額を 5 段階にランク付けする。

$$\text{予想損失額} = \text{時間あたりの生産額} \times \text{停止時間} + \text{修理費} + \text{被害補償額} \quad (2)$$

CoF をランク付けするための予想損失額範囲基準は、表 2 のとおり各規格内において基準が示されているが、これはあくまでも一例である。従って、保全予算や損害保険額などの事情が事業者ごとに異なることから、これらは個別に定めるのが原則である。

表 2 予想損失額の CoF ランクへの換算例

CoF	API581 (US\$)	EN16991(Euro)
E	~ ∞	~ ∞
D	~ 10,000,000	~ 10,000,000
C	~ 1,000,000	~ 1,000,000
B	~ 100,000	~ 100,000
A	~10,000	~10,000

CoF は基本的に設備設計や運用計画によって定まる要素が多く PoF ほど積極的なリスクコントロールは行わないが、CoF が高い場合、特に CoF ランクが E の場合においては PoF をどれだけ下げてもリスクラ

ンクは「M-H」までしか下がらないので、対象機器や設備に対して例えば次のような対策を行い CoF の低下を試みることがある。

- ① 十分な予備品を保有する (停止時間削減)
- ② 機器の冗長化を図る (停止時間削減)
- ③ 防護壁を設置する (被害補償額削減)

2.5 RCM との関係

RBM と類似の手法に信頼性中心整備 (RCM : Reliability Centered Maintenance) がある。RCM における信頼性と RBM におけるリスクの間には、次式が成立する。式(3)から分かるように、RBM と RCM は基本的に同じ考え方に基づく手法である。

$$\text{信頼性} = 1 - \text{リスク} \quad (3)$$

ただし、リスクまたは信頼性の求め方に大きな違いがあり、RBM では初期段階でのリスク評価結果は、必ずしも正確である必要はなく、一般論や経験則による「概ね正しい」もので良く、その後の検査や整備結果に基づく補正に重きを置いている。これに対して、RCM では FTA (Fault Tree Analysis)解析や FMEA (Failure Mode and Effect Analysis)解析などを用いて、発生が予測される故障や損傷およびその影響を、初期段階において詳細かつ精密に検証して信頼性を評価する。よって RCM は RBM と比べて工学的に明確、かつ真値に近いリスクを算出することが可能であるが、そのために要する手間が多く、かつ信頼性に対する高度な知見も必要となるため、人的にもコスト的にも導入および運用のハードルが高い。このためミッションクリティカルな設備・機器のリスク評価には適しているが、それほどでもない設備・機器に対しては、費用体効果に照らして RBM を適用することが合理的である。

3. RBM の普及状況

3.1 RBM が有効な産業分野

RBM がその効力を発揮するのは、対象となる設備・機器が下記条件を満たす場合である。

- ① 各設備・機器の信頼性が基本的に高い。
[点検による寿命延長効果が高い]
- ② シンプルな機構の設備・機器が多い。
[PoF を求めやすい]
- ③ 運転を容易には停止できない。
[安全のためリスク管理せざるを得ない]

具体的には以下のような産業分野が該当する。

- ① プロセス産業
例：石油精製，化学，高炉 等
- ② エネルギー産業
例：電力供給，ガス供給 等
- ③ 社会インフラ
例：橋梁，トンネル，上下水道 等

特に上記①は RBM 導入の歴史も古く，その発展，改良の大きく貢献してきた産業分野である，

3.2 石油精製/化学産業での普及

現在最も RBM が普及・活用されているのは，石油精製及び化学産業である．これら産業においては保全のために設備を停止することで生じる生産損失が莫大であるため，最小メンテナンスで安全を担保することが求められる．これに加えて設備を構成する機器類が総じて高い信頼性を有しており，基本的に故障しにくい（初期 PoF が低い）ため，RBM 導入による経済効果が得やすいことから，古くより RBM が活用されている．また，RBM の実施に際しては PoF の初期分布を与える必要があるが，これら産業においては RBM の有用性を早くから認識していたため，API に代表されるように，ビッグデータという概念が現れる以前から，業界全体で基礎データの収集・共有・分析に取り組んでいる．このことも，これらの産業で普及した重要な要素である．

3.3 RBM 導入効果例

RBM 実施によって具体的に効果が現れた事例を紹介する．図 4 は米国のプラントにおける熱源ボイラー及び発電機での導入効果事例である．

図 4 RBM 導入効果事例

この例では従前の保全に問題があり，計画外停止が多発していたものを，RBM の導入により改善している．本例では 1988 年に RBM を導入し，機器ごとの

リスク評価結果に基づくリソースの最適配分を行ったところ，導入前の 1987 年には 70.4%であった稼働率が，導入後の 1989 年には 84.5%に改善している．

4. 船舶・海洋分野への適用と課題

4.1 船舶分野へ適用する際の課題

前述のとおり，RBM は既に広く使われている石油精製/化学産業を始め，プロセス産業，エネルギー産業，社会インフラと言った分野との親和性が高い．ただし，その手法自体は必ずしも特定の分野のみでしか適用できないものではなく，本来，他の分野でも活用可能な普遍的な手法であり，船舶への適用も可能である．しかし現時点では船舶への普及は進んでおらず，かつて日本海事協会において船用機器への RBM 適用ガイドラインを作成したことがあるものの，今日に至るまで正式化されていないのが現状である．その理由としては，RBM を船舶に適用する場合に下記課題が存在することが挙げられる．

- ① 規則による保全周期の縛りが強く，経済面での効果を発揮しにくい．
- ② 入港中や定検ドックなど，保全のために設備・機器を停止させられる機会が多い．
- ③ 総じて機器類の信頼性が低く，RBM による寿命延長効果を得にくい．

さらには船舶においては業界を挙げたデータの収集・共有化の試みが，ようやく始まったばかりであり，RBM に必要な PoF 初期分布などの基礎データが整備されていないことも大きい．

4.2 海洋分野への適用

前述のとおり，船舶への RBM 適用には多くの課題があるが，長期間洋上で運用される海洋構造物においては，以下に示すとおり石油精製/化学プラントと類似点が多く，RBM が効果を発揮できる可能性が高いと考えられる．

- ① 設備・機器を停止できる機会が少なく，運転を継続しながら保全をする必要がある．
- ② 総じて機器類の信頼性が高い．

この海洋分野のなかでも，今後，特に期待できると考えているのが，洋上風力発電である．洋上風力発電の場合，発電設備という性質上，計画外での停止や長期にわたる運転停止は可能な限り避けたい．さらに，

洋上における保全作業は陸上設置の風車と比べて負担が大きい。経済性を考慮すると、可能な限り抑える必要がある。一方、当初より数十年単位での運用を考慮して設計された設備の信頼性は非常に高く、本質的には何もしなくても長期運用が可能ではある。この運用前提は、正に石油精製/化学プラントと同様であり、数多くの風車を効率良く管理する上で RBM は有効に機能すると考えられる。

4.3 船体構造に対する RBM

未だ普及が進まない船舶に対する RBM であるが、船体構造のリスク評価については既に米国 Ship Structure Committee (SSC) より下記ガイドラインが公開されている。

- ・ SSC-416 Risk-Based Life Cycle Management of Ship Structures (2001)
- ・ SSC-421 Risk-Informed Inspection of Marine Vessels (2002)

船体構造に対するリスク評価は、劣化を進行させる要因（特に応力）が、石油精製や化学プラントでは概ね変化しないのに対して船舶・海洋分野では変動が大きいという違いはある。しかし、評価すべきリスクを部材の減肉と割れに絞ることができてシンプルなおうえ、その劣化メカニズムは石油精製や化学プラントと基本的に同一である。そのため、長年にわたり石油・化学分野で蓄積してきた知見を参考にすることができ、設備・機器のリスク評価と比べて基準を作りやすい。よって、船舶・海洋分野における RBM は、まず船体構造への適用から進むものと思われる。

4.4 動機器（船用機器）に対する RBM

動機器とは石油化学プラントにおいては一般的な用語で、文字通り「動く機器」のことで、ポンプ、圧縮機、電動機などのことを指す。回転機器が中心であるが、直動機器や広義には計装機器も含まれる。これに対してタンクや配管という「動かない機器（設備）」のことは静機器と呼ぶ。前述の船体構造もこの分類に従えば静機器の一種である。リスク評価という観点からみた場合、前節のとおり静機器は一般的に劣化のメカニズムが単純であるため管理及び予測が比較的容易である。これに対して動機器は一般的に構造が複雑かつ可動部があるために劣化のメカニズムが多様であり、製造品質のバラツキも静機器と比べれば大きいために評価が難しい。前章において RBM を適用しやすい条件に「シンプルな機構の設備・機器が多い」を挙げたが、静機器は概ねシンプルな機器に属するが、動機器の大

半は RBM にはあまり向かない「シンプルではない機器」である。そのため RBM の普及が進んでいる石油精製産業や化学産業においても、動機器への RBM 適用は限定的であり、その手法及び判断基準は導入各社のノウハウに依存している。よって、動機器に対する公的な RBM 実施基準は、先行する石油化学業界においても存在していない。一方で、船舶を構成する重要機器は、主に、主機関や発電機に代表される動機器である。よって、船舶に対して RBM を適用する際には、動機器に対するリスク評価手法を、他産業における先事例に拠らず、独自に構築しなければならない。これまでに、主機関を中心に、船用機器（動機器）に対する RBM 手法開発が試みられているので、以下にその事例を紹介する。

4.4.1 船用機関・機器の RBM ガイドライン

2007～2009 年度の 3 か年をかけて、日本海事協会（NK）が主導してまとめた船用機関・機器全般に対するガイドラインで、動機器に対して RBM を適用する際の技術指針が示されている。本ガイドラインにおいては、各機器の製造から T 年経過したときの故障率 λ (T) を式 (4) で定義している。

$$\lambda(T) = a \exp(bT) \quad (4)$$

これを用いると T 年経過時までに対象機器が故障する確率を表す累積故障率 $F(T)$ は式 (5) で表され、T 年経過時まで故障しない確率は $1-F(T)$ で表される。

$$F(T) = 1 - \exp[-a/b\{\exp(bT) - 1\}] \quad (5)$$

ここから、M 年経過時に有効な点検・検査を行い、対象機器の健全性が確認された上で、N 年経過時に故障する確率（尤度）L が式 (6) で求められるので、これを PoF としてランキングして評価している。

$$L = \{F(N) - F(M)\} / \{1 - F(0)\} \quad (6)$$

また、 $\lambda(t)$ を構成する係数 a の機器ごとのバラツキを表す標準偏差に対してベイズ統計学に基づく補正を行い、 $F(T)$ をより正しく適宜補正をかけている。

この評価手法は動機器全般に比較的広く適用可能であり、船用機器を対象とした RBM としては世界で初めての成果である。このガイドラインに作成のプロジェクトにおいては式 (4) を構成する係数 a 及び b は NK が記録している多くの検査および故障データを回帰分析して求める。

4.4.2 練習船広島丸を使った検証

2013～2016 年度の 3 か年にわたり、広島商船高等専門学校の練習船「広島丸」の検査データを元にした RBM を行い、リスク（特に PoF）評価の妥当性を検証したものである。基本的な PoF 評価手法は NK の RBM ガイドラインに準じているが、 $\lambda(t)$ を構成する係数 a と b を決められるだけのデータを得られないため、累積故障率 $F(T)$ を表す関数をワイブル分布関数に置き換え、メーカーが示す MTBF や推奨開放点検周期などから $F(T)$ の曲線形状を定めている。

本件は、船用機器に対する RBM 適用の実証評価を行うとともに、NK RBM ガイドラインにおける下記課題の解決を試みたものである。

- ・ NK RBM ガイドラインの手法は、機器の検査や故障に関するビッグデータの存在を前提としているが、現実的にそれを収集するのは困難

検査や故障に関するビッグデータを、現実的に収集できるのは、船級や一部大手船主に限られる。また、現時点において、RBM で利用可能なビッグデータは公開されていない。本件は、このような状況下においても、RBM を広く普及させるために、ビッグデータを必要としない RBM 手法の開発を目指したものである。この手法によって評価した PoF の推移予測曲線と補正については、乗組員知見と照らし合わせて概ね妥当であるとの評価を得ている。

5. おわりに

船舶・海洋分野においては未だあまり知られていない RBM であるが、安全・品質と経済性のバランスを図るにおいて最も有効な手法のひとつであり、特に船舶への適用は多くの課題があるものの、適用した場合のメリットは大きいと考える。少なくとも初期 PoF 分布などの基礎データ整備については、ようやく Ship Data Center などの活動によって必要なデータを収集するためのインフラが整いつつあり、今後に期待が持てる。今後業界での RBM の認知が広がり、RBM を活用した「より良いメンテナンス」が船舶・海洋分野に広がっていくことを期待する。

参考文献

- 1) 木原重光, 富士彰夫, RBI/RBM 入門, (2002)
- 2) 日本海事協会, 船用機関・機器の RBM ガイドライン, (2010)
- 3) 日本高圧力技術協会, HPIS Z107 -1TR (2010)

- 4) 小林英夫, リスクベース工学の基礎, (2011)
- 5) 酒井信介, リスクベースメンテナンスによる保全計画の合理化, (2012)
- 6) L.G.Smith, Reliability and Risk in Pressure Vessel and Piping, (1993)
- 7) Ship Structure Committee, SSC-416 Risk-Based Life Cycle Management of Ship Structures, (2001)
- 8) Ship Structure Committee, SSC-421 Risk-Informed Inspection of Marine Vessels, (2002)
- 9) Damon J. Gonzales, High Cost of Unreliability, (2016)
- 10) American Petroleum Institute, API Recommended Practice 581 Third Edition, (2016)
- 11) European Committee for Standardization, EN16991, Risk-based inspection framework, (2018)

著者紹介

柴田 勝規

- ・ 1969 年生.
- ・ 株式会社 IMC IT システム部長
- ・ 立教大学 理学部 物理学科
- ・ 情報システム

小林 大祐

- ・ 1987 年生.
- ・ 株式会社 IMC IT システム部
- ・ 千葉大学 工学部 共生応用化学科
- ・ リスク評価