

37. 予知保全技術による診断と適用事例

株式会社 IMC
株式会社 IMC
株式会社 IHI

○ 大平 匡史
柴田 勝規
宮崎 信弥

1. はじめに

日本国内の景気後退を背景に、老朽化が進行している設備等の維持管理に十分なリソースを投入できていない事例が見られる。また、熟練技術者の高齢化に伴う技術ノウハウなどの伝承不足により、長年の経験や勘に裏打ちされたメンテナンス手法などが失われつつある。低コストで安全に設備の維持管理を行うためには、設備の異常を早期に発見し故障を未然に防ぐ必要がある。設備が重大な損傷を受ける前に、有効なメンテナンスを実施することができれば、設備の修理費用を削減できることのみならず、停機による生産機会が失われることの防止に繋がるため、生産性も向上する。また、設備や機器に優先度を付け、重要な機器からメンテナンスを実施することで、メンテナンスコストの適正化も可能になる。

ここでは、メンテナンスコストの適正化を目的とした RBM(リスクベースメンテナンス)と、構造物の設備や健全性を担保するための SI-F 法疲労劣化検知技術について、技術紹介と適用事例の紹介を行う。

2. 診断技術

2.1 RBM(リスクベースメンテナンス)

高齢化による熟練技術者の減少を背景に、熟練技術者に代わってメンテナンス計画を作成するための基準が必要になる。また、限られた予算内で適切なメンテナンスを実施するためには、設備や機器の状態を把握し、優先度を付けることが重要になる。

そこで、近年 RBM によるメンテナンス手法に注目が集まっている。RBM では、破損確率（破損の起こりやすさ）及び影響度（被害の大きさ）により定義されるリスクの評価結果に基づき、評価対象となる設備全体のリスクが許容範囲内に入るように、合理的な検査およびメンテナンス計画を策定する手法である。リスクの評価結果は一般的に図-1 のリスクマトリックス上にプロットされる。リスクマトリックスでは破損確率を縦軸、影響度を横軸としているため、プロットされる位置により評価の対象となる機器などのリスクの状態（高低）を表現することができる。

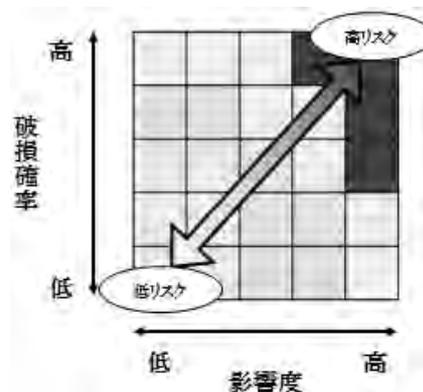


図-1 リスクマトリックス

RBM によるリスクは、直ちに対策が必要な「受容不可（高リスク）」、次回の検査では対策が必要な「要計画変更（高-中リスク）」、現状の検査が次回も適用できる「条件付受容（中リスク）」、現状の検査で問題のない「受容可能（低リスク）」の4段階に評価される。高リスクと評価された機器に対し保全費用を集中してメンテナンスを行う一方で、低リスクと評価された機器では検査の頻度を減らしたり、簡略化したりすることができる。このように全体を受容できるリスク(受容可能～条件付受容)の範囲に納め、リスクをコントロールすることでメンテナンスコストの適正化が可能になる。リスクコントロールの概念を図-2 に示す。

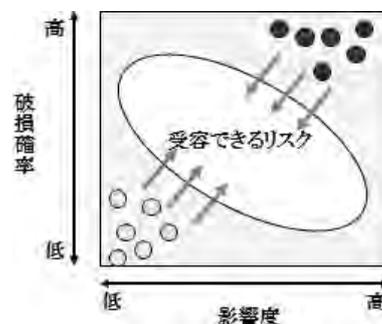


図-2 リスクのコントロール

2.2 SI-F 法疲労劣化検知技術

SI-F 法とは、東京工業大学の轟研究室により提案された、統計的手法により異常発生の有無を検知する技術である。

図-3 に示す従来の異常検知では、個々のセンサデータにしきい値を設け、個々にしきい値を越えたか否かで良否判定を行っていた。この方法では外乱（温度変化、荷重変化など）によって、特に問題が無くてもしきい値を超える場合があり、誤った診断を行うことが多かった。また、誤診断を防ぐためにしきい値を緩めに設定すると異常検知精度が下がり、真の異常発生を見逃してしまう危険性がある。

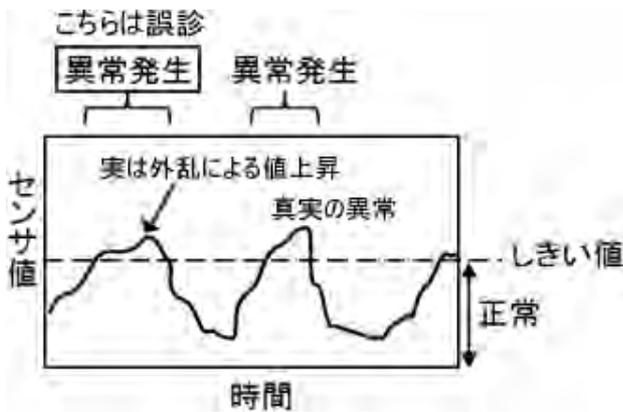


図-3 従来の異常検知技術

これを防ぐためには、図-4 に示す通り、複数のセンサデータの相関関係に着目して、その変化により異常発生を判定することが有効である。複数のセンサデータの相関関係は、温度変化や荷重変化といった外乱の影響を受けにくいいため、誤診断の回避と高精度化の両立が可能になる。

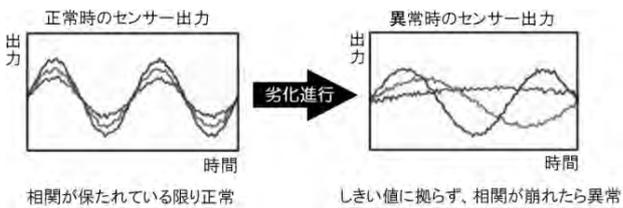


図-4 SI-F 法 異常検知技術

SI-F 法では、正常な時の相関関係に対して、診断時の相関関係が同一とみなせるか否かを判定し、同一とみなせない場合に異常発生と診断する。その判定には、データ同士の同等性を検定する統計的手法である、F 検定を用いる。算出された F 値は外乱の影響を受けにくく、値が大きいほど異常度が高いことを示す単一の数値であるため、しきい値を設けて自動診断が可能である。

3. 適用事例

3.1 練習船 広島丸における RBM 適用実験

設備を低コストで安全に維持管理することの必要性は、老朽船が増加傾向にある海運業界もその

例外ではない。RBM によるメンテナンス手法は化学プラントや石油精製プラントで普及しており、調査する限りにおいて船舶に適用された例は少ない。そこで、船舶向け RBM の構築に向け、独立行政法人国立高等専門学校機構 広島商船高等専門学校との共同研究を実施した。なお、RBM によるリスクの評価方法については、評価対象(機器や設備)により関係者が検討する必要がある。今回は予知保全の観点から、経年による劣化傾向を把握する必要があるため、故障率曲線から破損確率を求める手法を用いた。

(1) 船舶向け RBM の検討項目

① 破損確率の算出方法

RBM では、時間経過に伴う破損確率を機器毎に求める必要があるが、故障データが十分に集まらないことが多々あるため、初期の故障率曲線は主観的に決まる。この初期故障率曲線はデータ数が少ないことで、経年により実際の故障率と異なる可能性がある。ここでベイズ推論を用いることにした。ベイズ推論の説明は省略するが、事前確率に事象を与えることで事後確率を求め、求めた事後確率を新たに事前確率として扱い、さらに事象を与える。これを繰り返すことで、初期の状態と比較して客観性を向上させる手法である。ベイズ推論による故障率曲線の補正を図-5 に示す。船舶向け RBM では、メンテナンスの結果と処置を事象とし、ベイズ推論によって機器が良好な状態であれば故障率が低くなり、悪い状態であれば故障率が高くなることで、初期の故障率曲線の客観性を向上させている。

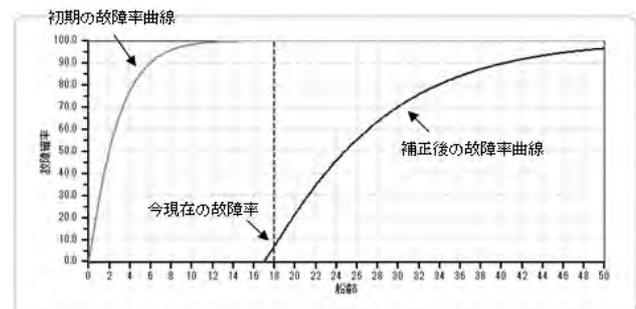


図-5 ベイズ推論による故障率曲線の補正

② 影響度の算出方法

機器の破損に伴う船舶への影響度については、安全性、環境保全、経済損失の観点から、下記 4 つの設問により求まる係数を掛け合わせることで算出することにした。各設問は、4 つの回答が準備された単一選択形式としており、1~4 の点数が与えられる。

(A)運航影響度係数

減速航行など運航に対する影響度合

(B)修復工数係数

修理時間による損傷の度合

(C)不稼働損失係数

船舶が停止している間の不稼働損失や環境汚染の度合

(D)人身災害係数

人体への影響度合

(2)検証と結果

①破損確率

熟練技術者の協力の下、まずは各機器の初期故障率曲線を作成した。次に広島丸の過去17年分のメンテナンス記録(結果と処置)を用い、初期故障率曲線をベイズ推論で補正した。補正後の故障率曲線が、熟練技術者の考える現在の機器の状態と一致するかについての検証を行い、両者が乖離している場合には故障率曲線の補正幅を調整した。これを繰り返すことで、適切な補正幅が決まり、両者が一致する故障率曲線に変化することが確認できた。

②影響度

各設問の係数をそのまま使用した場合、例えば修理に多大な時間を要する損傷であった場合の4点と、死亡事故に繋がる場合の4点を同列に扱うことになり、熟練技術者の感覚と一致しないことが判明した。各設問の重要度は異なるため、これらを表現するために、AHP法(Analytic Hierarchy Process:階層的意決定法)を用いた。AHP法とは複数要素間の優劣を、人間の主観的な評価により決定する手法である。この手法から求まる重み係数を各設問の点数に掛け合わせることで、重要度を決定することができた。

(3)まとめ

ベイズ推論による補正は、少ない情報から将来の劣化予測が行える優れた手法であり、船舶、陸上を問わずに適用可能である。しかし、情報が少ない状況下では、機械的に妥当な初期故障率曲線を求めることが困難で主観的に求める必要があるため、補正後に客観的な故障率曲線に収束するという保証がない。

これを克服するためには、業界全体や国家レベルでのより正確かつ多くの関係者が納得できる基準作りが必要である。将来に各機器や設備の一般的な初期信頼性曲線の基準がJISとして定められるようになれば、ベイズ推論に基づくRBMにより、インフラの維持管理の品質は大きく向上するものと考えている。

3.2 浚渫船 若鷺丸へのSI-F法の適用

波浪状態や運転条件によりひずみ量の変動する浚渫船を対象として、SI-F法による疲労劣化の検知システムを導入し、長期モニタリングの実証試験を開始した。システムの概要とこれまで得られた成果について紹介する。

(1)疲労劣化モニタリング対象

疲労劣化モニタリングの対象は、浚渫船「若鷺丸」とした。若鷺丸の概観写真を図6に示す。本船は浚渫作業時に船体の揺動を抑えるため、船体を支持するスパッドを3本備えている。うち台船の長手方向中央付近の2本は、上下動のみ可能で角度が変わらない「固定式」であり、船尾側の残り1本は、上下動に加えて前後に傾斜して船体を動かす機能を持つ「歩行式」である。

船体の揺動を抑える際や、スパッドが傾斜して船体を移動させる際に大きな応力が発生し、スパッドや支持部に損傷が起こる事例が報告されており、損傷確率が高いと言える。スパッドが損傷した場合、浚渫船の稼働に支障が生じるため、極めて影響度の高い部材である。このような情報から、モニタリング対象としてスパッド付近を選定した。本実証試験では、固定式スパッド1本(左舷側)と、船尾の歩行式スパッド1本をモニタリング対象とした。



出典：Marine Voice, Vol.287, No.21 (2014)

図-6 浚渫船「若鷺丸」全景写真

(2)ひずみゲージおよびモニタリング機器設置

スパッド本体は上下動するため計測は不可能であり、計測可能な支持部のひずみ計測を実施する方針とした。支持部のローラ保持機構の概観写真を図7に示す。



図-7 スパッド支持ローラ 概観写真

ローラ軸受付近や、ローラ保持機構の据え付け溶接部付近にひずみゲージを設置した。ひずみゲージの位置と方向は、浚渫作業やスパッドの前後傾斜、および波浪などの外力によるひずみが検出できるように、マグネット圧着式の簡易式ひずみゲージを用いて予備計測を行い、決定した。

ひずみデータは無線通信により、運転室付近に設置したデータ収集装置に集約した。これにより数十 m のセンサーケーブルを省略でき、低コスト化、長期耐久性向上を実現した。

データは収集装置付属の解析用 PC に取り込まれ、所定の時間間隔で SI-F 法による異常検知が実施される。

(3)SI-F 法解析結果

解析結果の一例として、船尾の歩行式スパッドの支持ローラ軸受付近のひずみデータを用いた、SI-F 法解析結果を図 8 に示す。横軸は日付で、縦軸は SI-F 法の算出結果である平均 F_0 値である。平均 F_0 値が大きいくほど異常が大きいくことを意味する。1 日に 1 回の診断を行っており（注：システムの都合によりデータ欠損がある）、この期間内で平均 F_0 値の明確な上昇は認められず、実機で疲労き裂が生じていない現象と対応した、適切な解析結果が得られることが確認できた。

異常発生を検知するための平均 F_0 値のしきい値として、正常な状態で生じるばらつき範囲を超える値を設定する方針とした。図 8 の計算結果に基づき、しきい値は 3σ より大き目の値として「35」と決定した。

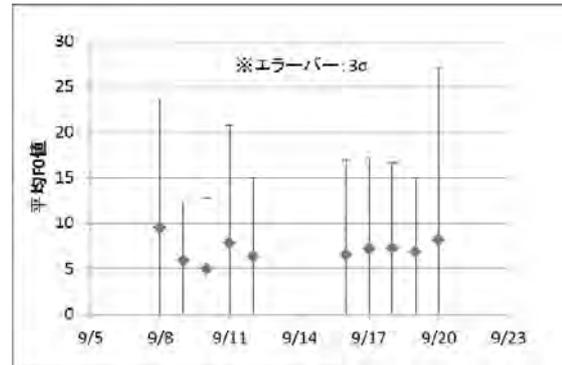


図-8 ローラ軸受付近 SI-F 法計算結果

(4)今後の取組み

浚渫船を対象として、実稼働で得られたひずみデータを SI-F 法により処理することで、損傷が生じていない実現象に対応する、安定した平均 F_0 値を算出することができた。

今後はき裂発生を検知精度についての検証に進むが、実機では数十年間にわたってき裂が発生しないと考えられ、検証は困難である。FEM 応力解析により種々の大きさのき裂を再現して、所定のき裂発生に相当する変化を与えることでき裂発生時の模擬データを作成することを検討している。この模擬データを用いることで、実機運用条件でのき裂発生を検知精度を検証することができる。

4. おわりに

今回紹介した予知保全技術は船舶に特化したものではなく、鉄鋼構造物やコンクリート構造物にも適用できる技術である。今後は老朽化が進むインフラの健全性を維持するために、普及する技術だと考えている。

最後に、独立行政法人国立高等専門学校機構 広島商船高等専門学校の先生方と、若築建設株式会社様には運用者としての貴重なご意見をいただきました。心から感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 柴田勝規・宮崎信弥・戸村雅一：作業船における予知保全技術と適用事例紹介，建設機械施工 Vol.66, No.8 August 2014
- 2) 宮崎信弥：老朽化インフラの声なき悲鳴をキャッチ, IHI 技報, Vol.54, No.2, 2014
- 3) 木原重光・富士彰夫：リスク評価によりメンテナンス RBI/RBM入門