

船用ディーゼルエンジンへの リスクベースメンテナンス適用の研究

石村恵以子*、森 有司*、松井 裕*

Study on Application of Risk-based Maintenance to Marine Diesel Engine

by

Eiko ISHIMURA, Yuji MORI, Hiroshi MATSUI

Abstract

Functions and safety for operation of most machines including marine diesel engines and plants are ensured through inspection and maintenance. To this end, in general, time-based inspection and maintenance are currently being adopted. However, more effective inspection and maintenance schemes are required from the economic reasons today. As one solution, a risk-based inspection/maintenance (RBI/RBM) technique has been introduced. This technique is considered to be efficient because of its reasonable cost and manpower to maintain machine and plant safety. RBI/RBM has not been applied to marine diesel engines yet and in order to do so, risk evaluation needs to be conducted first. In this paper, a risk evaluation of marine diesel engines was performed based on a report of marine engine damage.

* 海洋リスク評価系
原稿受付 平成26年1月31日
審査日 平成26年3月6日

目 次

1. はじめに	66
2. RBI/RBM の概要	67
3. 船用ディーゼルエンジンのリスク評価	69
3.1 船齢によるリスク評価	69
3.2 船用ディーゼルエンジンの信頼性解析	70
3.3 検査間隔と割合を変更した場合の 船用ディーゼルエンジンの安全性への 影響評価	70
4. まとめ	71
謝辞	71
参考文献	71

1. はじめに

船用ディーゼルエンジンを含め、多くの機械やプラントが機能を維持し、安全性を確保しながら正常な運航・運転・稼働を行うためには、適切な検査／保守を行うことが必要である。

検査／保守手法としては予め設定した間隔で行う時間基準型が一般的である。しかし、機械やプラントのトラブルが使用状況や使用時間・経過年数によらず全て同じ確率で発生し、同じ影響（被害）が発生する場合は時間基準型の検査／保守が効果的だが、現実にはそういった機械やプラントは存在しないため、過剰に検査／保守を行っている可能性もある。また、検査や保守を実施する際、作業ミス等により故障や異常が発生する事も考えられるため、検査／保守頻度の向上が機械・プラントの運用性向上につながらないことも考えられる。さらに、検査／保守を行うと、運転・稼働はその間停止し、費用も発生する。そのため、適切なタイミングで過不足無く検査／保守を行うことが安全性と経済性を同時に確保するためにも求められる。さらに、検査／保守分野でも規制緩和が進んでいることから、新たな検査／保守方式の導入の可能性が高まっていると言えよう¹⁾。このような状況を背景として、限られた経済的あるいは人的資源の中で効率的に機械やプラントの安全性を保つ手法としてリスク基準型検査／保守手法(RBI/RBM: Risk Based Inspection / Risk Base Maintenance) の導入が進んでいる¹⁾。RBI/RBM とはリスクの高低に応じて優先度をつけて検査／保守を行うものである。ここでいうリスクとは機械やプラントの故障が起こる確率と故障が起きた場合の影響度(被害の大きさを定量化した値)の積で表わされるものである。故障の発生は一般的にバスタブ曲線(図-1)といわ

れる初期故障、偶発故障、摩耗故障からなる曲線に従うとされているが、使用条件や使用頻度などにより故障の発生状況は大きなばらつきがあると考えられている。また、故障が発生した場合の影響度の算出においては、どの視点から「被害」を捉えるかによって用いられる指標が異なる。影響度算出における具体的な指標としては人的被害に関するもの(例えば死傷者数)、環境被害(例えば大気汚染物質の排出量や濃度)、経済的被害に関するもの(例えばトラブルに伴う操業停止がもたらす損失)など様々なものがある。人的被害は航空機や自動車などの交通手段の、環境被害は化学工場などの、そして経済的被害はほぼすべての機械やプラントのリスクを評価する場合の指標として用いられる。

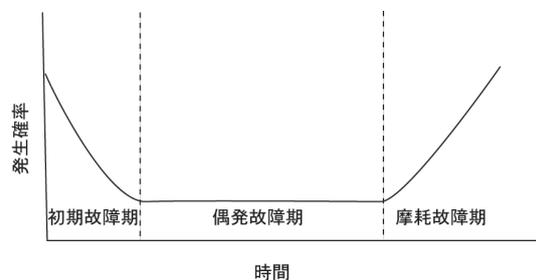


図-1 故障のバスタブ曲線

リスクを早くから活用している分野としては、保険商品(生命保険、損害保険等)がある。この場合のリスクとは保険会社の視点に立ったリスクである。保険会社は利潤を得ることのみが目的の営利企業と単純化して考えた場合、保険者から得られる保険料は利得であり、保険者が損害を被った場合に会社から支払われる保険料は会社にとっては損失である。したがって、生命保険(例えば死亡保険)ではある集団が一定期間に死亡する確率と会社にとっての保険料収入および支出を「影響度」と捉え、保険料を算出することになる。各種統計調査²⁾によると、死亡率は乳幼児期を除き、一般的に年齢の増加と共に高くなる。そのため年齢に関わらず保険料を一律とした場合、保険料は死亡率が低い集団(若者)には割高になるが死亡率が高い集団(年配者)にとっては割安になる。従って、実際には性別や年齢、既往歴なども勘案することにより、それぞれの集団にあった保険料が算出されることになる。損害保険(例えば自動車保険)などは運転実績や事故実績から等級を定め、それにより保険料を決定している。

工業分野では、発電所や化学プラントでリスク基準型検査／保守の導入が進んでいる。例えば、国内の火力発電所で全機器一律だった保守計画

を機器ごとのリスクに応じた保守計画に変更したところ、定期点検にかかる費用が50%程度削減できたという報告もされている³⁾。また、ドイツの第三者試験認証機関では、リスク評価を行う独自のソフトウェアとデータベースから化学プラントの検査・保全間隔を5年から7年に延長させることが可能となり、費用の削減と稼働率の向上が行えたという報告もある⁴⁾。

一方、現在の主な船舶(機関)の検査方法は、一定期間ごとに定期検査と中間検査を行うものである。事故が起きた場合は臨時検査を受検するが、年間稼働時間が一定時間より少ないといった一部例外を除き、状態の良い船舶(機関)であっても悪い船舶(機関)であっても同じ検査間隔で検査を受けている。検査は安全を確保する目的で行うため、より安全側に短い間隔で期間が設定されていると考えられる。このことから高い安全性は確保されるが、状態が良い船舶(機関)にとっては必要以上の検査や保守を受けている可能性がある。自動車保険で例えるならば、時間基準型の検査や保守は保険料一律、リスク基準型の検査や保守は運転実績などを考慮して保険料が定められている、といった捉え方も出来よう。

現在、船用分野においては、海洋構造物、船体構造、船用ディーゼルエンジンに対してもRBI/RBMに関する研究が進んでいる^{5),6),7)}。例えば、海洋構造物に関しては、浮体式風力発電施設と浮体式空港を検討対象としてリスクベース安全性評価を実施し、安全性に関して必要な対策を提案している⁵⁾。また、船体構造に関しては、ハル構造のタンクをその位置と経年によるリスクの評価を行っている⁶⁾。さらに船用ディーゼルエンジンに関しては、故障に関する各種データとベイズ定理を用いてリスクの経年変化を算出し、このことから保守の立案計画の提案を行うシステムの試作を行っている⁷⁾。

船用分野におけるリスク基準型検査規則としてはABS、DNVなどのオフショア設備、日本海事協会(以下NK)のディーゼルエンジンを含む主機⁸⁾に対するものなどがある。

船用ディーゼルエンジンや多くの機械の故障は、前述のバスタブ曲線に沿った初期故障、偶発故障、摩耗故障に加え、整備不良、恒常的な過負荷など使用範囲を超えての運転など様々な原因によって起こると考えられるが、一般的に時間の経過とともに故障が発生しやすくなると考えられる。

本報告では、RBI/RBMについて概要を説明した上で、船齢と運航に大きな影響を与えた故障との関係をNKが毎年公表している「機関損傷のま

とめ(以下損傷データ)」⁹⁾から調査を行った。つぎに、損傷データから船用ディーゼルエンジンの経年による故障率を算出し、検査時期・間隔・解放率の違いによる安全性への影響評価を行った。

2. RBI/RBMの概要

機械やプラントを安全に運転・稼働するためには適切な保守/検査を行う必要がある。保守手法としては導入実績が多い一定間隔ごとに行う時間基準型保全(TBM: Time Based Maintenance)、故障しそうな要素から保守を行う状態基準保全(CBM: Condition Based Maintenance)、高い信頼性が期待できる信頼性重視保全(RCM: Reliability Centered Maintenance)、そしてリスクを基準に行うリスク基準型保全などさまざまな手法がある。それぞれの手法の特徴を表-1に示す。

保守/検査手法で広く使われているTBI/TBMとは一定期間毎に対象機器の検査/保守を行うものであり、高い信頼性は得られるが、費用の高額化、稼働率の低下などの問題点もあげられる。CBMやRCMでも高い信頼性を重視しているため、過剰な保守を行っている可能性がある。そのため費用の高額化といった問題点が指摘されている¹⁾。

RBI/RBMとは対象機器のリスクをあらかじめ算出し、そのリスクに応じた形で検査/保守を行うものであり、経費の削減を含め効率的に安全性を保つ手法である。RBI/RBMの標準的な基準としては米国石油学会(API)のAPI5812がある。

RBI/RBMにおける処理の流れを図-2に示す。まず、評価対象範囲を設定し、構成要素に区分する。そして、構成要素毎に発生確率と影響度からリスクを算出し、そのリスクが受け入れられるかどうかの判断を行う。受け入れられない場合は、リスクを下げる措置を提案・実施した場合の評価を行い、評価対象のリスクを設定レベル内に抑えるような検査・保守の立案および実施を行う。

RBI/RBMでは全てのリスクを排除するわけではないため、予め各種法規、社会的要因、経済的要因からどのレベルまでリスクを受容するかの基準を設定する。リスクレベルとその対応策を表-2に示す。リスクは受け入れ可能な低リスク領域、経済的に可能な限りリスクを小さくする事が求められる中リスク(条件付きリスク許容)領域、経済性を無視してリスクを低くすることが求められる高リスク領域に区分する。リスクは故障の発生確率と影響度の積であらわされるため、図-3

に示すリスクマトリックスという発生確率と影響度を数段階にわけた半定量的な表にあてはめて、設定したリスク領域に分類する。

故障発生確率は、機器・部品の一般的故障・損傷データベースが整備されている場合その値を利用して算出する。ただ、多くの機器・部品はそのようなデータベースが整備されていないが、金属部材は使用条件（負荷応力、温度、環境）を把握することにより当該条件における損傷メカニズム（疲労、クリープ、腐食）が推定でき、従って寿命予測が可能となるので、その予測から損傷・故障発生率を決定する。影響度の指標としては、人的被害・経済的損失・損傷の度合いなどがあり、目的に応じて適切な指標を用いる。指標は1つでもよいが、複数を用いて、より大きい方を最終的な影響度とすることも可能である。影響度は実際に故障が起きた場合の事故事例や、専門家の知見等により決定する。

このようにして全ての構成要素に対してリスクの算出を行い、それがあらかじめ設定したリスクレベル内に納まっているかの評価を行う。設定リスクレベル以下の場合は検査・保守を行い、設定リスクレベル以上の場合はリスクを下げる措置を提案する。各要素のリスクは保守や検査等何らかの措置を取った場合変化するものなので、RBM/RBI では措置の実施ごとにリスクの評価を行い、リスクを設定したレベル内に収めるというものである。

リスクは固定されたものではなく、保守や検査の実施により変動するものなので、RBI/RBM を精度よく実施するにあたっては検査／保守の実施内容をフィードバックする事も重要である。

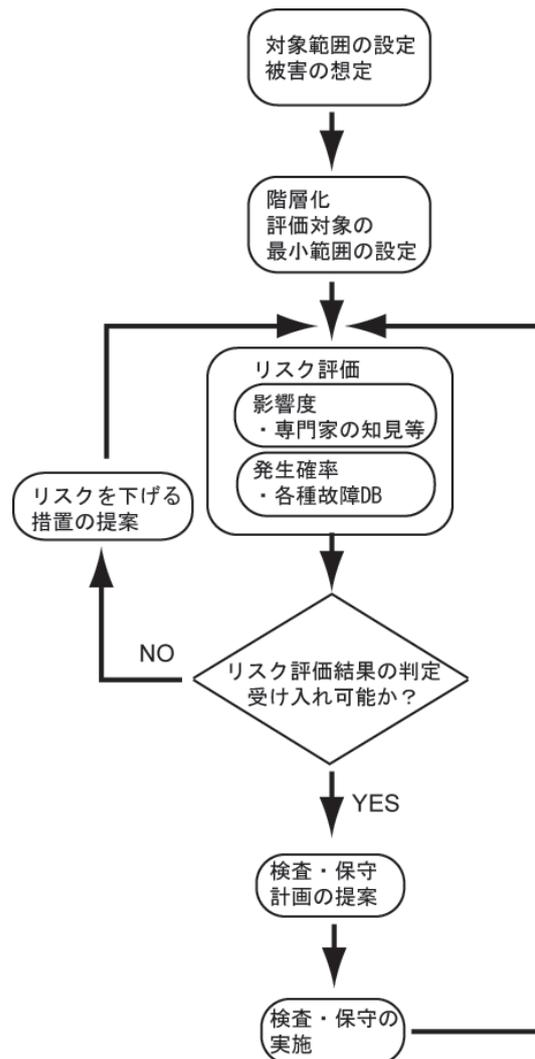


図-2 RBI/RBM 処理の流れ

表-1 保守手法と特徴

手法名	実施手法	特徴
時間基準型保全 (TBM)	あらかじめ設定した時間ごとに保守を実施	<ul style="list-style-type: none"> ・高い信頼性 ・広い分野で適用 ・保守計画の立案が容易 ・費用の高額化 ・稼働率の低下
状態基準保全 (CBM)	構成要素の状態を判断し、状態が悪いものから保守を実施	<ul style="list-style-type: none"> ・各要素の状態に応じた適切な保守の実施 ・適切な診断技術の導入が難しい ・費用の高額化
信頼性重視保全 (RCM)	要素の故障が全体の運転・稼働に大きな影響を与えるものから優先的に保全	<ul style="list-style-type: none"> ・高い信頼性 ・影響度の評価が定性的なため、保守実施の優先順位付けが難しい
リスク基準型保全 (RBM)	要素ごとのリスクを算出し、リスクに応じて保守を実施	<ul style="list-style-type: none"> ・効率的な保守 ・費用の削減 ・故障の進展予測（寿命予測）と影響度評価を行う必要があるため、ある程度故障に関するデータがないものに対しては導入が難しい

表-2 リスクレベルと対処方法

リスクレベル	リスクの受容	対処方法
高リスク領域	不可	経済性を無視してリスクを許容範囲まで削減
中リスク領域 (条件付きリスク許容領域)	条件付き可能	経済性を満足する範囲でリスクを最大限下げる
低リスク領域	可能	特に無し

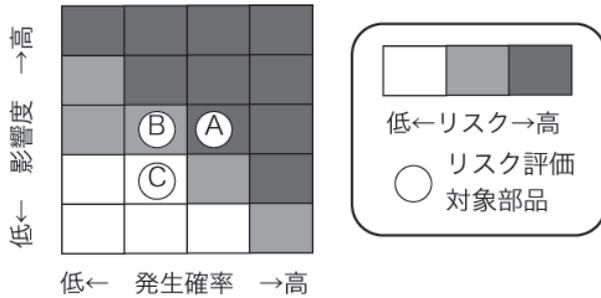


図-3 リスクマトリックス

3. 船用ディーゼルエンジンのリスク評価

船用ディーゼルエンジンに RBI/RBM を適用するにあたっては同エンジンのリスクの把握を行う必要がある。本研究ではまず、船齢による故障(損傷)発生率の違いに差があるかどうかについて調べた。

船用ディーゼルエンジンは保守や検査を受けて運転を行っているため、その関与を考慮し、船齢と故障発生との関係、すなわち信頼性解析を行った。その結果、船用ディーゼルエンジンの故障の発生は経年劣化型となった。本研究では船齢 25 年までに運航に支障を来す故障を発生する割合の総和(総故障率: 運航に支障を来す損傷数/船齢 25 年までの総隻数)をリスクと捉え、検査間隔や解放(検査)割合を変化させた場合の総故障率の変化の試算を行った。

3.1 船齢によるリスク評価

NK では年度ごとに NK 登録船の機関関係の損傷について統計データを公表している⁹⁾。損傷は運航に支障を来さない一般損傷(主に定期検査時に発見)、運航に支障を来す重大損傷(1 級損傷: 自航不能、2 級損傷: 減速運航)の 3 種類に分類されている。NK によるとここ 20 年で重大損傷は登録船に搭載されている機器の総数に対して年間 0.5~2% 程度発生し、一般損傷は 5~15% 程度の発生となっている。調査年度による増減はあるも

の、長期的には減少傾向にある。一般損傷に比べ、重大損傷は発生割合が低い。なお、重大損傷については発生時の船齢も公表されている。2003 年度~2006 年度の船齢による重大損傷発生件数と登録船隻数を図-4 に示す。登録隻数の船齢分布は NK の Register of ships から算出した¹⁰⁾。

船齢の増加とともに重大損傷の発生件数が増えていることがわかる。ただし、図-4 に示したように、登録隻数は船齢により違いがあるため、重大損傷件数を調査期間内の登録隻数で割った重大損傷発生割合を図-5 に示す。船齢 15 年程度までの重大損傷発生率はほぼ一定となっているが、それを超えると発生率の増加がみられる。

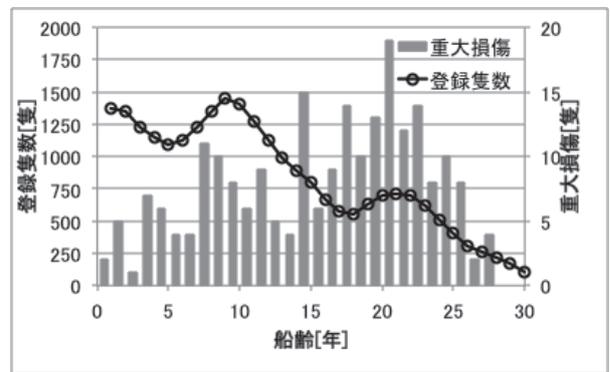


図-4 船齢による登録船隻数と重大損傷発生件数

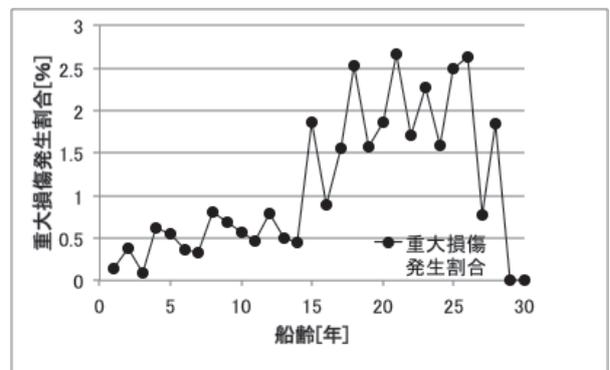


図-5 重大損傷発生割合

リスクは前述したとおり故障発生の確率と影響度の積となる。2003 年度~2006 年度に発生した一般損傷は重大損傷の約 10 倍程度だったが、船舶の運航には影響を与えていない。本研究では影響度の指標として運航への影響とすることとした。そのため、影響度算出には主に重大損傷を考えれば良いこととなる。すなわち、重大損傷発生率が高くなるということはリスクの増大を意味する。今回得られた結果に対する検査/保守計画としては、船齢 15 年を超えるリスクが高い船

用ディーゼルエンジンにはリスクを下げる保守計画、船齢 15 年未満のリスクが低いものに対しては検査間隔の延長の提案などが考えられる。

3.2 船用ディーゼルエンジンの信頼性解析

船用ディーゼルエンジンの検査は、SOLAS 条約で規定される証書の有効期限である 5 年間で全部品 (100%) が解放となるよう毎年部分的 (1 回) に部品のおよそ 20% を解放) に検査を行う継続検査や、5 年ごとに部品全て (100%) の解放を行う定期検査が主流となっている。その他に、状態監視を行い、良好な場合は解放検査を延長出来る状態監視方式の検査方式が制定されている。この検査方式では、状態監視の結果が良好であれば、5 年を超えても解放検査を行う必要は無い。

船用ディーゼルエンジンの故障発生確率は 1 章で述べたとおりバスタブ曲線に従うと考える。経年と故障発生との関係はワイブル分布で表わすことが多い¹¹⁾。故障の確率分布関数(不信頼度)を式 1 に示す。式 1 中の α は形状パラメータ、 β は尺度パラメータとよばれる。 α が 1 未満の場合は初期故障状態を表わし、1 の場合は偶発故障状態を表わし、1 より大きい場合は経年劣化故障状態を表わす。故障のバスタブ曲線をあらわす場合、 α はまず 1 未満、次に 1、最後は 1 より大きくなる。 β は劣化の時間の程度を表現し、時間軸方向の曲線を伸縮する。

$$F(t) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{t}{\beta}\right)^\alpha\right) \cdots \text{(式 1)}$$

船用ディーゼルエンジンでは初期、偶発、経年劣化の 3 種類の故障がそれぞれ発生すると考えられるが、その多くは経年劣化型と考える。偶発故障の除外は困難であるが、初期故障については船齢 2 年までに発生した故障は初期故障とみなすこととし、本研究では初期故障を除外した形で解析を試みた。パラメータはワイブル確率紙を用いて推定した¹¹⁾。データのプロット結果を図 6 に示す。

その結果、故障の種類を表わす形状パラメータ α の値は約 1.8 となった。ワイブル分布においては α が 1 より大きい場合は経年劣化状態を表わすため、この不具合データからは船用ディーゼルエンジンの不具合発生の傾向は経年劣化型と考えられる。

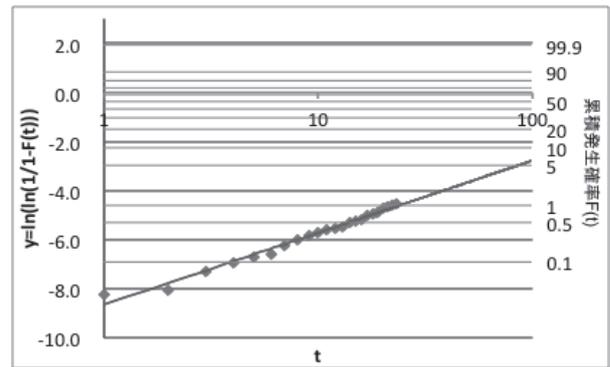


図-6 ワイブル確率紙へのプロット

3.3 検査間隔と割合を変更した場合の船用ディーゼルエンジンの安全性への影響評価

3.2 節で得られた故障発生の傾向に対し、検査の時点で発生が期待される不具合が、検査割合分減少するという前提で故障率の変化を試算した。検査毎、すなわち、5 年一巡の継続検査では 1 年毎に 20%、定期検査では 5 年毎に 100% の不具合が是正されることとなる。なお、修理が原因で発生する不具合は考慮せず、継続検査で不具合が発見された場合でも本試算では追加の解放は行わないとした。結果を図-7 に示す。

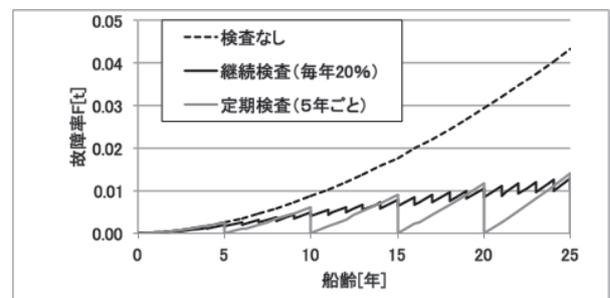


図-7 継続検査と定期検査の故障率の変化

船齢 25 年までに発生する故障率 (以下総故障率) は図-7 のグラフを積分したものとなり、継続検査の総故障率は定期検査より多くなるが、現状では許容されている。これは、実際の継続検査では不具合が発見された場合、他の部品も解放し、不具合があれば修理を行うと考えられるからである。すなわち、実際の総故障率は試算結果より低くなるものと考えられるが、本試算ではその点は考慮していない。船用ディーゼルエンジンの故障の傾向は船齢の増加と共に不具合も増加する経年劣化型であるが、現在の検査の間隔・部品の解放割合は船齢によらず一定となっている。そのため、継続検査、定期検査とも効果的な検査間隔・解放

割合となっていない可能性が考えられる。そこで、継続検査に関して、船齢に応じて検査間隔や解放割合を変更した場合の総故障率の試算をすることとした。その検査間隔と解放割合、船齢 25 年までに解放する割合（以下総解放率）と総故障率の関係を表-3 に示す。総故障率及び総解放率は毎年 20% 検査のものを 100% として比較した。

継続検査の検査間隔や解放割合を船齢に応じて変更したところ、総故障率を同一としたままで、総解放率を低くする組み合わせ（表-3 の①、②）や、総解放率を同一にしたままで総故障率を低くする組み合わせ（表-3 の③）があることがわかった。

表-3 検査間隔と解放割合を変更した場合の総故障率および総解放率の比較

	検査間隔、 解放割合、 検査回数	総解放率 (%)	総故障率 (%)
毎年 20% (現状)	1年,20%,25回	100	100
①検査間隔 変更 (総故障率 同一)	2年,20%,6回 1年,20%,8回 半年,20%,10回	96	100
②検査割合 変更1 (総故障率 同一)	1年,10%,10回 1年,20%,5回 1年,25%,10回	90	100
③検査割合 変更2 (総解放率 同一)	1年,10%,10回 1年,20%,5回 1年,30%,10回	100	92

平成 23 年当時の船舶安全法に基づく国の検査では、船用ディーゼルエンジンは、定期検査（5 年ごと）の際にはディーゼルエンジンの全部（100%）を、中間検査（定期検査の間に 1 回）の際（新造後最初の中間検査を除く）にはディーゼルエンジン的一部分（30%）を解放（分解）して部品の状態を確認し、整備を行う事になっていた。しかし、船舶のエンジンの性能向上等を鑑みれば、製造後、一定の期間は解放検査の頻度を少なくすることが可能と考えられた。そのため、本手法を用いて船用エンジンに対し、検査時の結果を基に信頼性解析を別途行った結果、製造後 11 年未満のエンジンについては、保守整備が適切に実施されている場合には、中間検査の際に解放検査を行わなくても十分な安全性が確保されるとの結果が得られた。検査方式の変更を表-4 に示す。

表-4 検査方式の変更

	検査内容
改正前	定期検査（100%解放）は5年ごと、 中間検査（30%解放）は定期検査の間に1回（新造後最初の中間検査は不要）
改正後	定期検査（100%解放）は5年ごと、 中間検査（30%解放）は定期検査の間に1回（製造11年未満で保守整備が適切に実施されている場合の中間検査は不要）

4. まとめ

RBI/RBM を船用ディーゼルエンジンに適用するにあたり、まず船齢によるリスクの調査を行った。重大損傷発生率は、船齢 15 年程度までの重大損傷発生率はほぼ一定となっているが、それを超えると発生率の増加がみられた。

つぎに、損傷データから船用ディーゼルエンジンの信頼性解析を行った。船用ディーゼルエンジンの不具合発生傾向は経年劣化型と判断された。さらに、この不具合発生傾向に対し、検査間隔や解放割合を変更した場合の総故障率の試算を行った。継続検査で検査間隔や解放割合を船齢に応じて変更することにより、総検査率を 10% 減少しても総故障率は現状とほぼ同一となる組み合わせや、総解放率は同一でも総故障率は現状の方式より約 8% 減少する組み合わせがあることがわかった。

船舶安全法に基づく国の検査を受けている船用ディーゼルエンジンの信頼性解析をこの手法を用いて行った結果等をもとに、国土交通省では、平成 24 年に製造後 11 年未満のものにあつては中間検査の際に解放検査が省略できる旨の改正を行い、解放検査が緩和されることとなった。¹²⁾

謝 辞

本研究を実施するにあたり、船用機関の検査、保守、故障に関して日本海事協会、国土交通省海事局ならびに地方運輸局をはじめ多くの方々に貴重なご意見を頂戴した。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 木原他: RBI/RBM 入門、JIPM ソリューション、(2002)
- 2) 例えば、国立社会保障・人権問題研究所: 性、年齢（5 歳階級）別死亡率：1920～2008 年、

- 人口統計資料集、(2010)
- 3) 関西電力: リスクベースメンテナンス(RBM)手法の導入による火力発電所メンテナンスコストの大幅な削減について、
<http://www.kepco.co.jp/pressre/2002/0128-1j.html>
 - 4) 泉他: 化学プラントにおける国内外のリスク基準の検査・保全、化学装置、2007年7月号、(2007)
 - 5) 日本船舶海洋工学会大規模海上浮体施設の構造信頼性および設計基準研究委員会: 大規模海上浮体施設の安全性評価指針最終報告書、(2009)
 - 6) Roger Basu, et al: A flexible approach to the application of risk-based methods to the inspection of hull structures、ABS TECHNICAL PAPERS 2006、(2006)、pp21-29
 - 7) 椎原他: 船用機関・機器の効率的、合理的な保守を目指したリスクベースメンテナンスシステムの開発、日本マリンエンジニアリング学会誌、Vol.45 No.1、(2010)、pp90-96
 - 8) 日本海事協会: 鋼船規則・同検査要領 B編(2007)
 - 9) 日本海事協会: 2007年度機関損傷のまとめ、日本海事協会誌、(2008)など
 - 10) 日本海事協会: Register of Ships(2003)など
 - 11) 佐野他: 信頼性工学、日科技連、(1983)
 - 12) 国土交通省海事局検査測度課: 船舶のエンジンの検査を緩和します、国土交通省プレスリリース平成24年3月28日付け(2012)
http://www.mlit.go.jp/report/press/kaiji08_hh_000020.html