

PS-8 船舶推進主機関の経年劣化による性能低下について

環境・動力系 * ボンダレンコ オレクシー, 福田 哲吾

1. はじめに

近年、国際海事機関（IMO）による厳しい温室効果ガス（GHG）排出規制が導入され、海運業界には様々な対策が求められている。船舶における GHG 排出の大部分は、燃料燃焼により発生する CO₂ であるため、燃費改善のための対策に注力されている。特にエネルギー効率設計指標（EEDI）規制により段階的に燃費性能の良い船の設計が求められ、現時点で最終的に 2025 年以降の新造船は 30% 以上の削減が求められる。同時に設計だけでなく、実運航中もエネルギー効率運航指標（EEOI）の中断ない改善が、船舶エネルギー効率管理計画（SEEPM）に基づきおこななければならない。このことは、ひいては、就航中における船の性能をモニタリングして改善するメカニズムを作らなければならないことになり、就航中の船の性能変化を追跡し評価することは欠くことのできないことになる。しかし、就航中の船の性能は引き渡し時に得られた初期性能と異なり、大気条件の違い、気象・海象条件の違い、船体やプロペラの汚れ等に起因する不確かさに大きく影響されるものである。これまでも実海域における船の性能予測については、短期予測だけではなく、長期予測についても多くの研究が行われている。最終的に、これら予測法の理論的枠組みとして、できるだけ同等な基準の解析結果を提供することにある。同時に、船の推進性能は、主機の部品摩耗や劣化による性能変化の影響をある程度受けるものである。ただし、運航プロファイルの変化や運航時の気象・海象条件等の不確かさがあるため、推進性能の変化量の識別はほぼ不可能である。この問題を解決するため、本研究では船の推進プラントと同じ型の主機を採用している発電プラントを取り上げる。発電プラントと船舶との大きな違いは、発電プラントでは 1 年を通して一定の運転プロファイルであることと、発電機器に起因する不確かさが無視できることで、主機の性能劣化を特定することができる点である。このレポートでは、定置用の大型発電プラントの長期にわたる運転実績から大型 2 サイクル主機の性能変化について考察する。

2. 主機の経年劣化

一般的に劣化という用語は、システムを構成する部品が様々な要因により性能が徐々に低下するような内部プロセスを指す。主機の性能低下に及ぼす要因には、外部の環境条件によるもの（Ambient condition）と内部のエンジン部品の劣化（Deterioration）によ

るものに分けられる。さらに、エンジン部品の性能低下には、時間とともに生じる機械的な摩耗による劣化や汚れなど、部品の交換やクリーニングなどによって回復できる劣化と、経年劣化等の回復不可能な劣化の 2 種類に分けられる。図 1 にエンジン性能変化に及ぼすそれぞれの因子の寄与度を視覚的にダイアグラムで例示する。

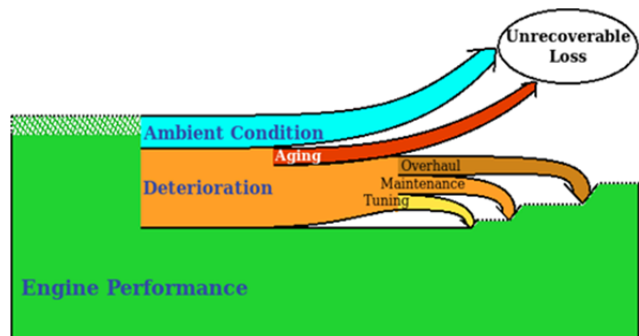


図 1 エンジンの性能変化のダイアグラム

エンジン性能劣化プロセスは、適切なメンテナンスを施すことにより軽減することができる。例えば、日常的に行われるフィルター交換や部品の洗浄による汚れの除去、定期的な間隔で行われる摩耗部品の交換、定期的なエンジン開放点検で行われる大物エンジン部品、例えばシリンダユニットや過給機等のメンテナンスによりエンジン性能の回復を図ることができる。しかし、これらを施しても性能回復ができない部分が残る、これを経年劣化（Aging）と呼ぶ。

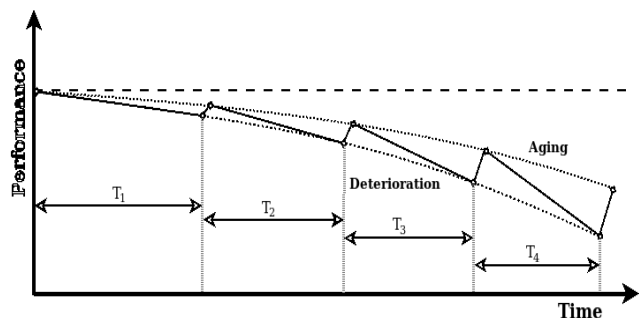


図 2 主機の寿命曲線

図 2 は主機の寿命曲線といわれるもので、エンジン性能（効率）の時間による低下とメンテナンスによる回復の関係を表すものである。この関係は図に示すとおり、二つの極端な外挿ラインを引くことができ、一

つが経年劣化 (Aging) 曲線, もう一つが性能劣化 (Deterioration) 曲線である. 主機の時間ベース効率変化は下式で表される.

$$\eta_e = (1 - \varepsilon(t))\eta_{e_0} \quad (1)$$

ここで η_e は主機の効率で, 下付き記号 '0' は初期値 (新品状態) を表す. 劣化は時間とともに徐々に進行するプロセスであるため, 劣化関数 $\varepsilon(t)$ は下式に示すように指数法則で表せる.

$$\varepsilon(t) = \kappa(1 - e^{-t/\tau}) \quad (2)$$

ここで κ, τ はそれぞれ劣化プロセスを決めるゲインと時定数である.

3. 実プラントのケーススタディ

二つの発電プラントに設置されたディーゼルエンジンの長期運転実績を用い, エンジンの効率変化を解析した. 発電プラントのエンジンはメーカーのマニュアルに従い定期的にメンテナンスされている. 利用可能なデータから年間の平均エンジン効率を計算することができる. すなわち, 年間発電量を年間燃料使用量で割ったものである. ここでは, エンジン効率は絶対値ではなく, 新造時を1とした相対値 (relative units (r. u)) で表す.

3.1 発電プラント A のケース

最初のケースは15年間契約の100MWの発電プラントで, 4基の2ストローク低速エンジン 12K50MC-C で構成されている. 各エンジンの定格出力は 26100kW, 回転数は 166.7rpm である. 年間平均 8000 時間の 100% 負荷連続運転で燃料は船用と同じ C 重油を使用している. 図 3 にこのエンジンの各年の効率劣化曲線 (寿命曲線) を示す. 15年間の経年劣化 (エイジング) のゲインは 2%以下であり, 時定数は 6年と計算される. 寿命曲線から主要なメンテナンスであるオーバーホール区間が見て取れる. 実際 14年目に空気冷却器と過給機の入替えが行われ, 効率が新品時の 98.35% まで回復している.

3.2 発電プラント B のケース

二つ目は同じく 15年契約の発電プラントで, 主機は 1基の 12K80MC-GI で定格出力 40680 kW で回転数は 103.4 rpm である. 年間運転時間は約 2000 時間で, 都市ガスを主燃料としてパイロット燃料に A 重油を使用するデュアルフェューエルエンジンである. 図 4 にこのエンジンの寿命曲線を示す. 9年以降は契約の関係から極端に運転時間が短くなり, 統計から省いた.

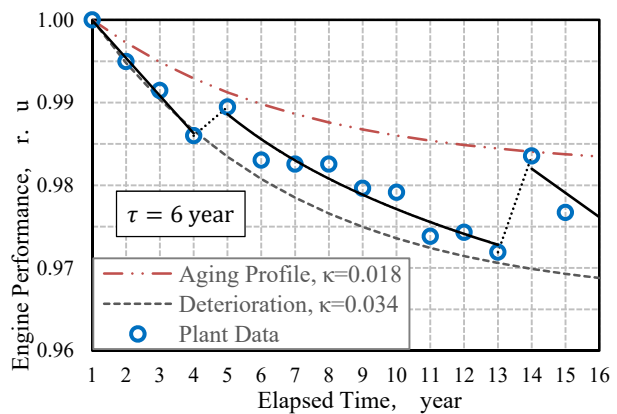


図 3 発電プラント A のエンジン寿命曲線

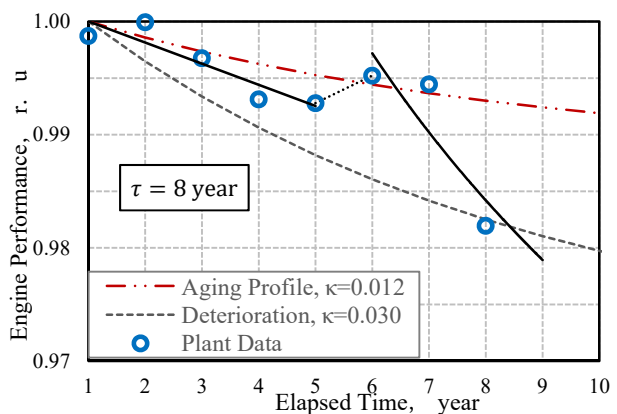


図 4 発電プラント B のエンジン寿命曲線

図 4 から分かるとおおり, 寿命曲線の形は発電プラント A と類似している. 経年劣化のゲインは 1.5%以下で時定数は 8年である. この数値の違いは主に使用燃料の違いによるものと考えられるが, 運転時間の差, 電子燃料噴射システムの採用やシリンダ潤滑などによる影響も考えられる.

4. 結論

船舶推進プラントの主機の性能低下は時間経過プロセスであり, いわゆる経年劣化曲線と性能劣化曲線の外挿線の間にある. 二つの曲線の離れ具合は運転条件とメンテナンス計画, メンテナンスの質に大きく影響されるものと考えられる. もし, 劣化プロセスのゲインと時定数が同定できれば, 戦略的な予防保全計画が適用できる. このことは同時にエンジンの性能劣化を追跡する運転状態モニタリングの重要性を示している

謝辞

本研究の実施にあたり, 発電プラントのデータを提供していただいた (株) 三井 E&S マシナリー殿に感謝申し上げます.

PS-8 PERFORMANCE DEGRADATION OF PROPULSION ENGINES DUE TO AGING

Marine Environment & Engine System * Bondarenko, O., Fukuda, T.

1. Introduction

Over recent years, fuel-saving incentives in the shipping have been spurred by the various strict regulations introduced by the International Maritime Organization (IMO). The latter has been primarily driven by the considerable concern in greenhouse gas emissions reduction. In particular, the Energy Efficiency Design Index (EEDI) forces gradual improvement of ships design towards better efficiency with the final goal of 30% reduction of the CO₂ emission per transport work for ships built after 2025. At the same time, an Energy Efficiency Operational Indicator (EEOI) in tandem with a Ship Energy Efficiency Management Plan (SEEMP) provides a mechanism to monitor and improve the performance of a ship in service in terms of the energy efficiency. Thus it has become essential to evaluate and track changes of ship performance in service. However, the in-service performance is different from that obtained during commissioning and is characterised by significant uncertainties attributed to ambient conditions, weather conditions, fouling of the hull and propeller. Many pieces of research on the prediction of ship performance in actual service conditions have been done so far, and which were focused on not only short-term analysis but also long-term analysis. Ultimately, the developed theoretical frame of the prediction methods provide for the analysis under an equivalent basis to the greatest extent possible. At the same time, it should also be stressed that the ship propulsive performance is affected, to some degree, by a change in main engine performance due to wear out and aging. Though the identification of characteristic change is hardly possible due to primarily varying operation profile and uncertainties related to operating conditions. At the same time, the engines used in some stationary power generation plants are the same as the main engines used for ship propulsion. The only the differences, providing for precise identification the rate of change, are constant operational profile and negligible uncertainties from the electrical power generation equipment. In this report, the performance change of a large-bore two-stroke low-speed engines is studied from the long-term operation records of stationary power generating plants.

2. Aged Degradation of Engine

In general, the term degradation refers to an internal process in components of a system, where gradual

performance change takes place due to various circumstances. With respect to the propulsion engine, the performance changes can be classified as changes due to the ambient conditions, which are not defined as degradation though, and the changes sourced from the degradation of the engine components. In turn, the performance degradation of engine components can be classified as deterioration due-to mechanical wear-out, fouling and aging occurring over time-based. Figure 1 illustrates the contribution of various factors to the engine performance change.

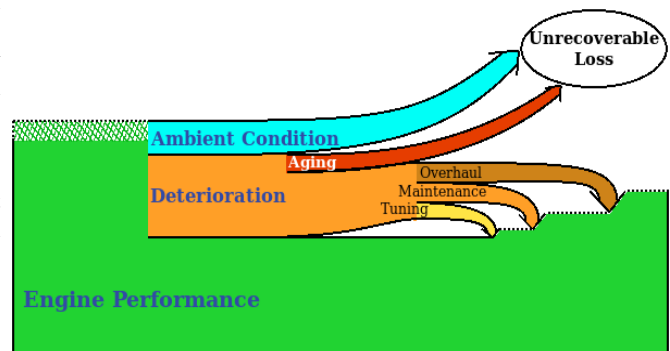


Fig.1 Propulsion Engine Performance Degradation

The deterioration process can be slowed down by the application of maintenance. Thus, filters change and components cleaning allow for a remedy of fouling; worn-out components can be replaced at regular maintenance intervals; periodic overhauls provide for performance recovery of major engine components such as cylinder unit, turbocharger, etc. However, there remains an unrecoverable fraction of performance, and it is referred to as aging.

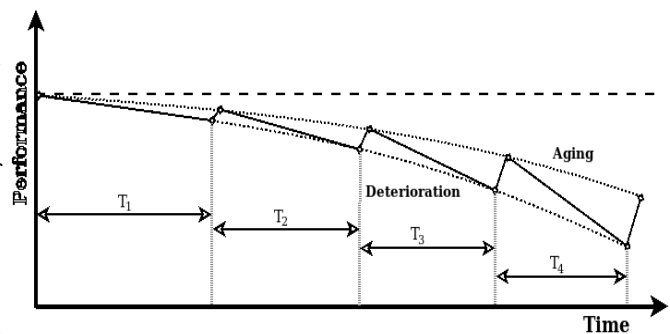


Fig.2 Propulsion Engine Life Curves

The connections between engine performance in terms of efficiency, time and maintenance are called life curves as illustrated in Fig.2. Two extreme envelopes, notably aging and

deterioration, which bound the time-based degradation of the engine performance can be expressed as follows:

$$\eta_e = (1 - \varepsilon(t))\eta_{e_0} \quad (1)$$

where η_e is the engine performance in term of efficiency, and subscript '0' denotes the initial value (new condition). Since the degradation is a non-stationary process, it is proposed to parametrize the degradation function $\varepsilon(t)$ with an exponential law in the following form:

$$\varepsilon(t) = \kappa \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \quad (2)$$

where κ, τ are the gain and time constants, characterizing the degradation process.

3. Real Case Studies

The long-term operation records from the two stationary power plants were subjected for analysis. The engines were serviced regularly, in accordance with the manufactures recommendations. The available data allows for the calculation of engine efficiency which is defined as a ratio of the total energy produced by the engine to the total energy input with the fuel through the period of one year. Due to the proprietary data restriction, the performance change in relative units (r.u) is used in figures.

3.1 Case of Power Plant A

The first case is the power plant composed of 4 sets of two-stroke diesel engines of 12K50MC-C type, each rated 26100 kW at 166.7 rpm running on heavy fuel oil and an average 8000 running hours per year. Figure 3 illustrates the generalized life curves of the power plant. The aging envelope gain coefficient is less than 2% for the considered period of operation, and the time constant of the aging degradation is 6 years. The period of the major overhaul is clearly evident from the life curves. Thus, the renovation of air coolers and turbochargers overhaul took place at the 14th year of operation and the performance up to 98.35% of new condition was only restored.

3.2 Case of Power Plant B

The second case is the power plant composed of a single two-stroke diesel engine of 12K80MC-GI type, rated 40680 kW at 103.4 rpm running on diesel oil and natural gas and an average 2000 running hours per year. Figure 4 illustrates the life curves of the engine.

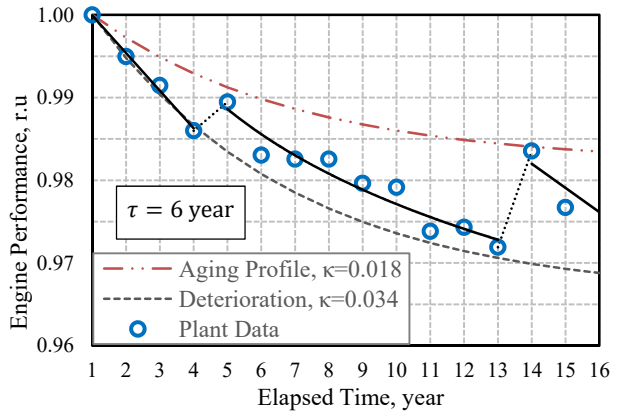


Fig. 3 Life Curves of the Power Plant A

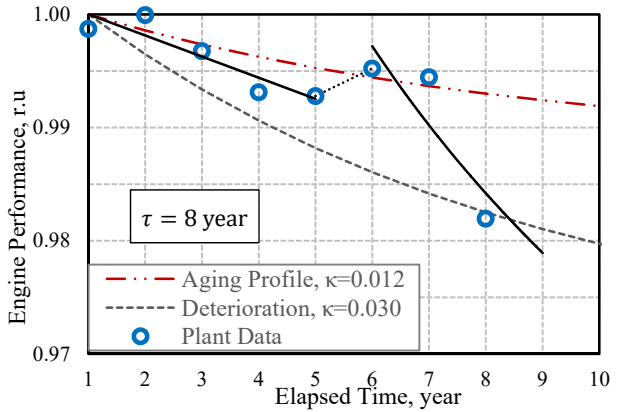


Fig. 4 Life Curves of the Power Plant B

As can be seen, the performance degradation characteristic is similar to the case of power plant A. The aging envelope demonstrates gain less than 1.5% and the time constant of degradation is 8 years. This qualitative difference, perhaps, can be explained primarily by the type of fuel used as well, at least, adopted technologies of electronic control related to fuel injection and cylinder lubrication.

4. Conclusion

The aged degradation of the propulsion engine is the time-based process limited by two extreme envelopes, notably aging and performance deterioration. The degree of divergence of these envelopes depends, to a great extent, on operation conditions and maintenance policy/quality. If the characteristics, gain and time constants, of degradation process can be identified, the predictive maintenance policy is then can be applied. This implies on importance of the condition monitoring system to track the performance degradation.

Acknowledgement

The authors wish to acknowledge Mitsui E&S Machinery for sharing the performance data of stationary power plants operation.