

1. 緒 言

一般に、船舶の推進性能に於いては経年劣化が発生することがある程度定量的に認識されているが、船用ディーゼル機関本体の劣化については、どの様に経年劣化を起こし、性能や信頼性にどの程度の影響を与えるかについての系統的な研究実績はほとんど見当たらない。そのため、機関管理現場に於いては、かなりの部分が機関管理者の経験や勘に頼っているのが実態である。

長期間稼働する船用ディーゼル機関は、点検、保守を中心とした機関管理により、その性能や信頼性が維持される。そこで、効果的且つ体系だった管理を行うためには、まず主要な機関要素の経年劣化により発生する性能低下、信頼性低下に関する定量的データの収集及び解析が必要である。これにより体系的な機関管理指針の構築が可能となり、船用ディーゼル機関のより高い性能及び信頼性維持が期待でき、ひいては、船舶の安全運航、効率運航への寄与が期待できる。

このような観点から、当研究部会では、主要な機関要素の経年劣化による燃費率、排気ガス温度等の機関性能の変化を数値データとして取得し、その得られたデータを系統的に整理・解析し、機関管理の基礎技術の向上を図ることを目的として、平成9年度より2カ年間で本研究を実施した。

研究では、劣化要素として特定した燃料噴射系、掃排気系・動弁系、燃焼系の各主要部品に対し模擬的な劣化状態を作り、シミュレーション計算、単体試験、実験機関による試験により、機関性能変化に関する定量的データを取得することを目標とした。

研究の進め方としては、まず、主要部品単体の劣化による機関性能の変化について調べ、その後、これら劣化要素を組み合わせた場合の機関性能の変化を把握した。また、過給機については、経年劣化に関する実船調査を行ってデータを収集し、実船に於ける経年劣化の定量的データを取得した。

なお、研究結果は出来るだけ分かりやすく、且つ、利用しやすくするため、数式化・グラフ化して表現するよう心がけた。また、機関の形式が異なる場合には、対象機関の個性を考慮することが当然必要であるが、経年劣化要素の機関性能に与える影響を分析・評価するための手法として、本研究はその道筋を示すものである。

最後に、研究成果の活用方法については、直接的な利用方法のみならず、今後拡大が期待される将来ヴィジョンについても各方面の意見・意向を取纏め、今後の機関管理技術の進歩に役立てていくための指針とした。

2. 研究の実施内容

2.1 実験機関、過給機仕様

大型船用ディーゼル機関の性能劣化を生じる主要な部品は燃料系（燃料噴射系）、掃排気系及び燃焼系に包含されている。これらに対して模擬劣化部品を準備し表 2.1 に示す実験機関を使用し試験を実施した。また、過給機単体試験及び実船調査に使用した過給機仕様を表 2.2 に示す。

表 2.1 実験機関仕様

所有者		三菱重工業	三井造船	日立造船
名称		NC33	MTE40S	X40
ボア径	mm	330	400	400
ストローク	mm	1400	800	1350
出力	PS (kW)	678 (499)	1175 (864)	1340 (985)
回転数	rpm	157.5	300	178
正味平均有効圧力 (Pme)	kg/cm ² (MPa)	16.2 (1.59)	17.5 (1.72)	20.0 (1.96)
ピストン速度 (Cm)	m/s	7.35	8.00	8.01
出力率	Pme × Cm	119.1	140.0	160.2
シリンダ内最高圧力	kg/cm ² (MPa)	150 (14.7)	161 (15.8)	185 (18.1)
燃料弁数		2	2	2
使用燃料油		A重油、C重油	A重油	A重油

表 2.2 過給機仕様

名称		川崎—MAN B&W NA48/S0
最高許容圧力比		4.5
最高許容回転数	rpm	17800
タービン前最高許容温度	℃	620
タービンプレードチップ外径	mm	560
コンプレッサホイール外径	mm	576
ロータ軸全長	mm	999

2.2 単体要素での機関性能変化

船用ディーゼル機関に使用される過給機では、排気タービンに付着するスケール或いは摩耗による翼クリアランスの増加等により過給機の効率低下が発生する。一方、燃料弁はキャビテーションにより、針弁にくわれが発生したり噴孔が摩耗により拡大する等の劣化が発生する。このように船用ディーゼル機関の主たる構成部品の内、経年劣化する部品を図1の機関断面図上に示す。図中の1～9が経年劣化部品であり、その番号の下に主な劣化状況を示す。

これら単体部品の経年劣化と機関性能との関連を検証するための実験を実施したが、その検証内容、検証方法、実施内容及び試験結果を概略取り纏めたものを表2.3に示す。また、図2.1は劣化部品の中から過給機、エアクーラ、燃料ポンプ及び燃料弁を選定し、これらの劣化量に対する燃費率、 P_{max} 及び排気温度の変化を示した。この結果、次の事項が明らかになった。

- 1) 単体要素が各々の整備基準時間に達した場合、機関性能に与える影響が最も大きいのは過給機で、次いでエアクーラである。従って、掃排気系の劣化が機関性能に大きな影響を与える。
- 2) 燃料ポンプ、燃料弁の劣化が排気温度に与える影響は比較的小さいが、 P_{max} への影響は大きい。

2.3 劣化要素組合せ試験

単体要素劣化試験は、対象とする部品劣化が性能変化に及ぼす影響を純粋な形で明らかに出来る方法である。しかし、実船は、これらの劣化要素が複合して現れるため組合せ試験を実施する事が必要である。そこで複合時の状態をクリアにするため、機関性能シミュレーションで過給機がバランスする点を求め試験条件を決定し、組合せ試験を実施した。また、試験では実船を想定して燃料をA重油からC重油に変更し、実験機関はNC33を使用した。

試験概要を表2.4、要素劣化を組み合わせた場合の各組合せの相対的な差を図2.2に示す。この結果、以下の事項が明らかとなった。

- 1) 燃料系の劣化組合せは NO_x 、 P_{max} が低下する特徴がみられる。
- 2) 掃排気系の劣化組合せは、単体要素劣化の場合と同様に排気温度が高くなる。また、燃費率にも影響があることが予測される。
- 3) 各系統組み合わせ時を標準状態と比較した場合、燃料系・燃焼系組合せに比較して燃料系・掃排気系組合せが NO_x を除く性能値に対して影響が強い。
- 4) 総合劣化組合せ時の燃費率は各系統変化率の合計より大幅に悪化している。これは図2.3に示すライナ温度から予測すると、熱損失や機械損失が増加しているためと考えられる。

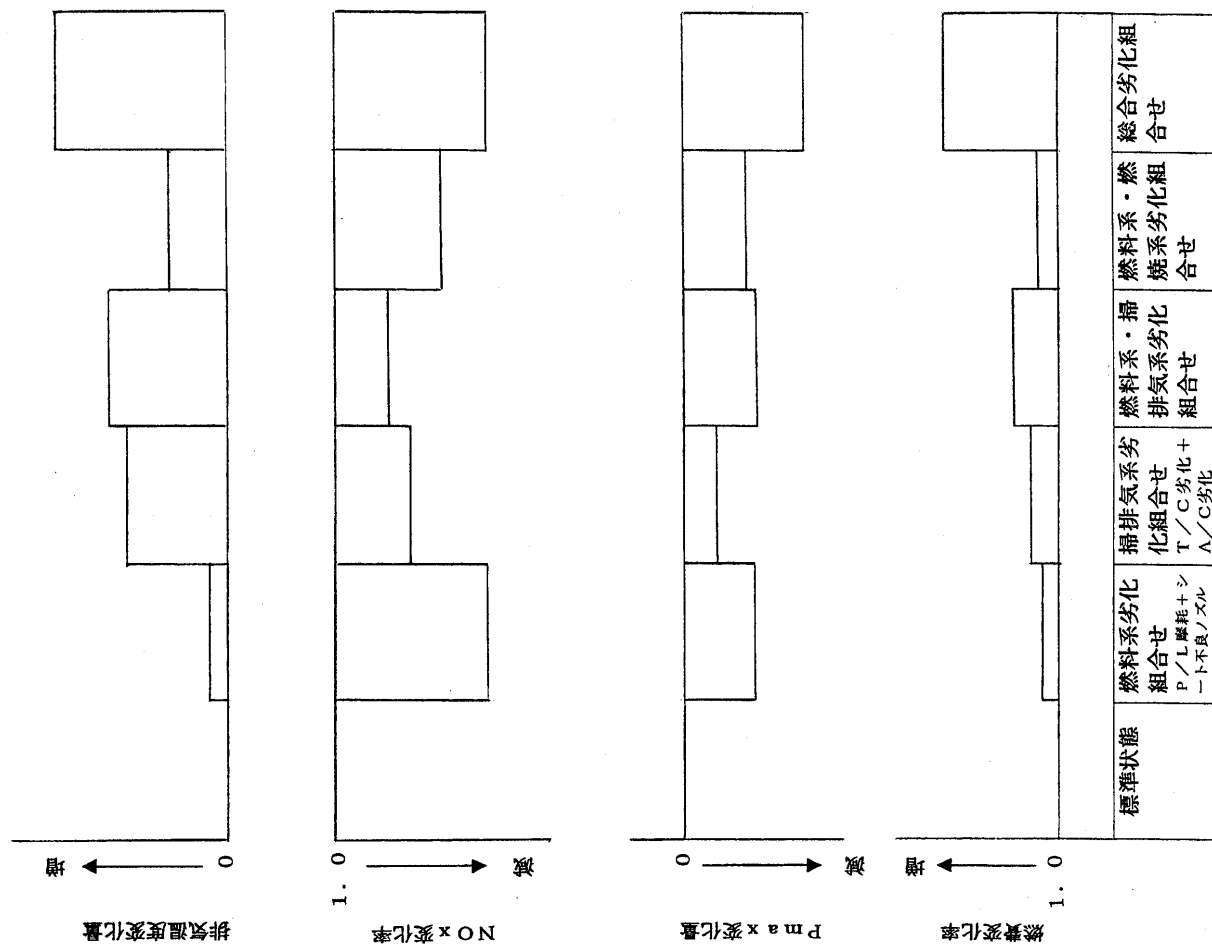


図2.1 部品の劣化量と性能値

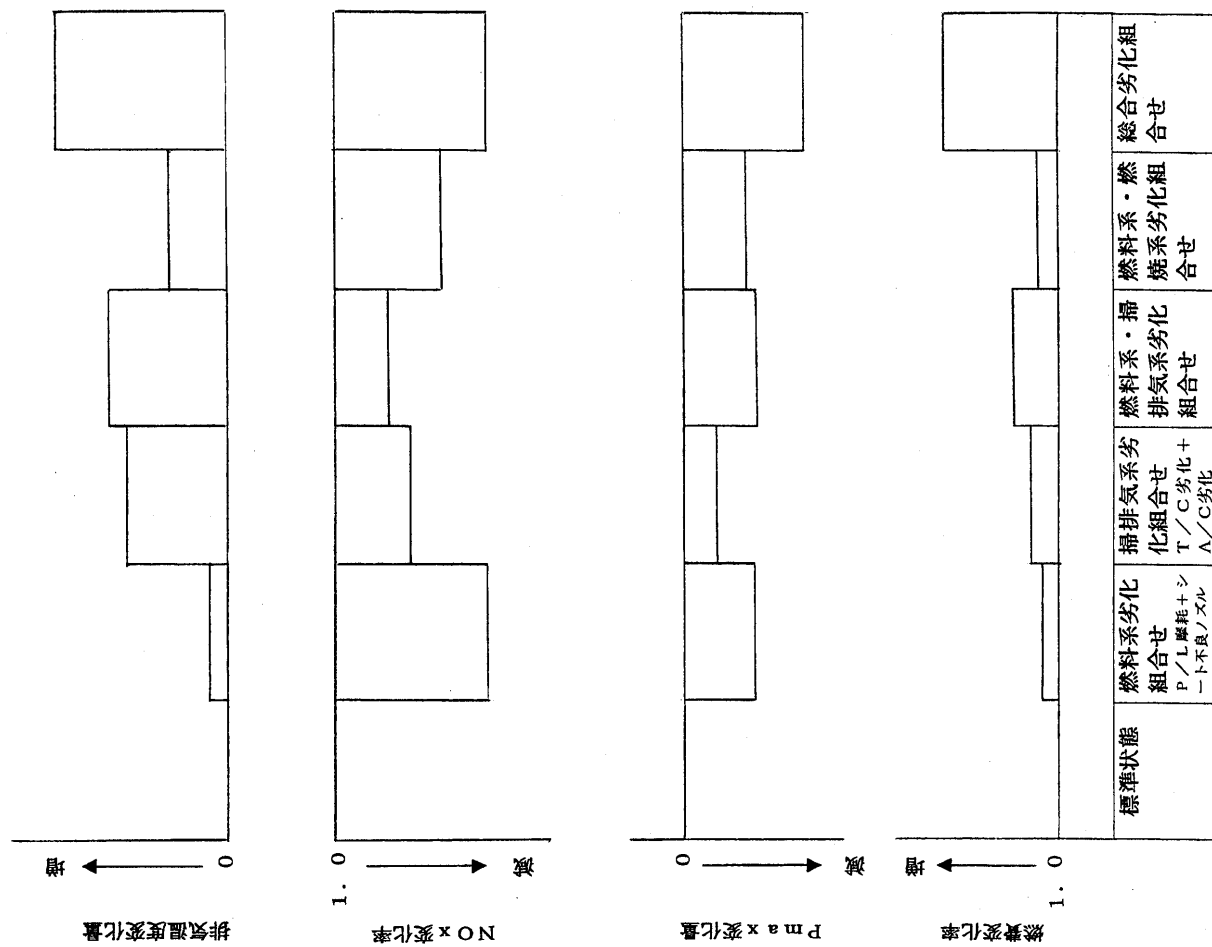


図2.2 劣化要素組合せ試験

表 2. 3 単体要素試験

No	経年劣化部品	検証内容	検証方法	実施内容	試験結果	参考図表
1	過給機	過給機総合効率の低下	シミュレーション 単体試験 実験機	・機関性能計算（効率低下時の機関性能変化） ・ノズルリング等の経年劣化を模擬した試験 ・効率低下を模擬した掃気条件での機関性能試験	1. タービンノズルスケール厚さとカムベリングチップクリアランスがそれぞれ増加すると過給機効率も直線的に低下する。 2. 過給機効率が低下すると性能値（燃費率、排気温度）が大きく悪化する。	図 2.1 参照 写真 3 参照
2	ピストン	スラッジ付着によるピストン温度上昇	シミュレーション 実験機	・スラッジ付着を模擬した熱伝達計算 ・冷却能力の変化	1. スラッジ厚さとピストン表面温度上昇との相関を把握した。 2. スラッジ堆積はNOxを増加させる。	
3	ピストンリング	リング・ライナ 摩耗によるブロー バイの発生	実験機	・リング・ライナ最大摩耗をリング合い口拡大で模擬し、更に2番リング折損を付加	1. 折損リングはライナ温度を大幅に上昇させる。	
4	ライナ					
5	燃料ポンプ	プランジヤ摩耗による噴霧圧力低下	シミュレーション 単体試験 実験機	・噴射特性（噴射圧力、噴射期間） ・噴射圧力低下状態確認	1. クリアランスが正常値の2倍になると、噴射圧力は6～7%低下する。（A重油） 2. クリアランスに比例して性能値が直線的に悪化する。	図 2.1 参照
6	燃料弁	燃料噴霧不良	単体試験 実験機	・使用済み燃料弁の噴霧観察 ・使用済み燃料弁と標準燃料弁比較	1. 使用済み燃料弁は摩耗等により噴孔面積が拡大している。 2. 同燃料弁では性能値が悪化する。	図 2.1 参照 写真 2 参照
7	排気弁	気密性低下	実験機	・シート不良排気弁による性能試験	1. 無次元吹き抜け面積0.005%の排気弁では若干の性能値の悪化が確認されるが、排ガス組成には変化しない。	
8	排気動弁系	駆動油圧低下及び弁タイミング	シミュレーション 実験機	・排気弁駆動特性計算（オリフィス閉塞、供給圧低下） ・作動油圧、弁開閉タイミング	1. オリフィス閉塞と作動油圧の排気弁開閉タイミングに及ぼす影響は比較的小さい。 2. 作動油圧が低くなり過ぎると着座時の衝撃が大きくなる。	
9	エアクーラ	熱交換効率の低下	シミュレーション 単体試験 実験機	・交換熱量特性計算 ・チューブ内汚れを模擬した熱交換試験 ・熱交換効率の低下を模擬した機関性能試験	1. 掃気温度上昇には冷却水閉塞の影響が最も大きい。	図 2.1 参照

表 2. 4 要素劣化組合せ試験

N.º	経年劣化部品	検証内容	検証方法	実施内容	試験結果	参考図表
1	燃料ポンプ 燃料弁 燃料弁	燃料系部品複合劣化組合せ時の性能変化	実験機 (過給機バランスポイント)	・劣化プラランジヤにシート不良ノズル組合せられた掃気条件下での性能試験	1. Pmaxが悪化し、NOxが大きく低下する。 2. ライナの温度分布が不均一。	図 2.3 参照
2	過給機 エアクーラ	掃排気系部品複合劣化組合せ時の性能変化	同上	・過給機とエアクーラが共に劣化した場合を模擬した掃気条件下での性能試験	1. 排気温度が上昇する。	図 2.3 参照
3	燃料ポンプ 燃料弁 過給機 エアクーラ	燃料系、掃排気系複合劣化組合せ時の性能変化	同上	・劣化プラランジヤにシート不良ノズル及び過給機とエアクーラの劣化が附加された掃気条件下での性能試験	1. NOx以外の性能値 (排気温度、Pmax、燃費率) が悪化する。 2. ライナ温度分布が不均一。	図 2.3 参照
4	燃料ポンプ 燃料弁 ピストンリング ライナ	燃料系、燃焼系の複合劣化時の性能変化	同上	・劣化プラランジヤにシート不良ノズル及びリングライナの劣化が附加された時の掃気条件下での性能試験	1. Pmaxが悪化し、NOxが低下する。 2. ライナ温度分布が不均一。 (特定ポイントで異常に上昇する)	図 2.3 参照
5	燃料ポンプ 燃料弁 過給機 エアクーラ ピストンリング ライナ	総合劣化組合せ時の性能変化	同上	・総合劣化組合せ時の掃気条件下での性能試験	1. NOx以外の性能値が悪化する。 2. ライナ表面温度が全周で上昇し、摺動上危険な状態になる。 3. 対象の全部品を整備許容限界まで放置しておくとき大きなエンジントラブルを招く可能性がある。 (定期点検の重要性を認識)	図 2.3 参照 図 2.4 参照

2.4 過給機の経年劣化に関する実船調査

本研究は、機関の各主要部品の劣化状態を模擬し、計算及び実験機関によりその影響を求める方法を主として行っているが、過給機については、経年劣化に関する実船調査を行ってデータを収集し、実船に於ける経年劣化の定量的データを取得した。その内容を以下に示す。また、対象船の主な仕様を表2.5に示す。

- 1) 対象船に適宜訪船し、過給機部品の経年変化状況の調査と経年量の計測を実施した。
- 2) 対象船の主機及び過給機性能データを約半年間に渡り継続的に採取し、過給機の性能劣化のトレンドを調査した。
- 3) タービン側の経年劣化部品（タービンノズル、カバーリング）の新替えを実施し、新替え前後での性能変化と旧部品の経年量の関係を調査した。

表2.5 対象船仕様

対象船	A丸 鉾石運搬船 (170,000DWT、就航 '96年7月)
主機関	川崎-MAN B&W 7S70MC
過給機	川崎-MAN B&W NA48/S0 2台

前述の1)～3)の調査を実施した結果、図2.3に示すように経年劣化量、過給機効率変化、主機性能変化の定量的な関係A～Cが得られた。

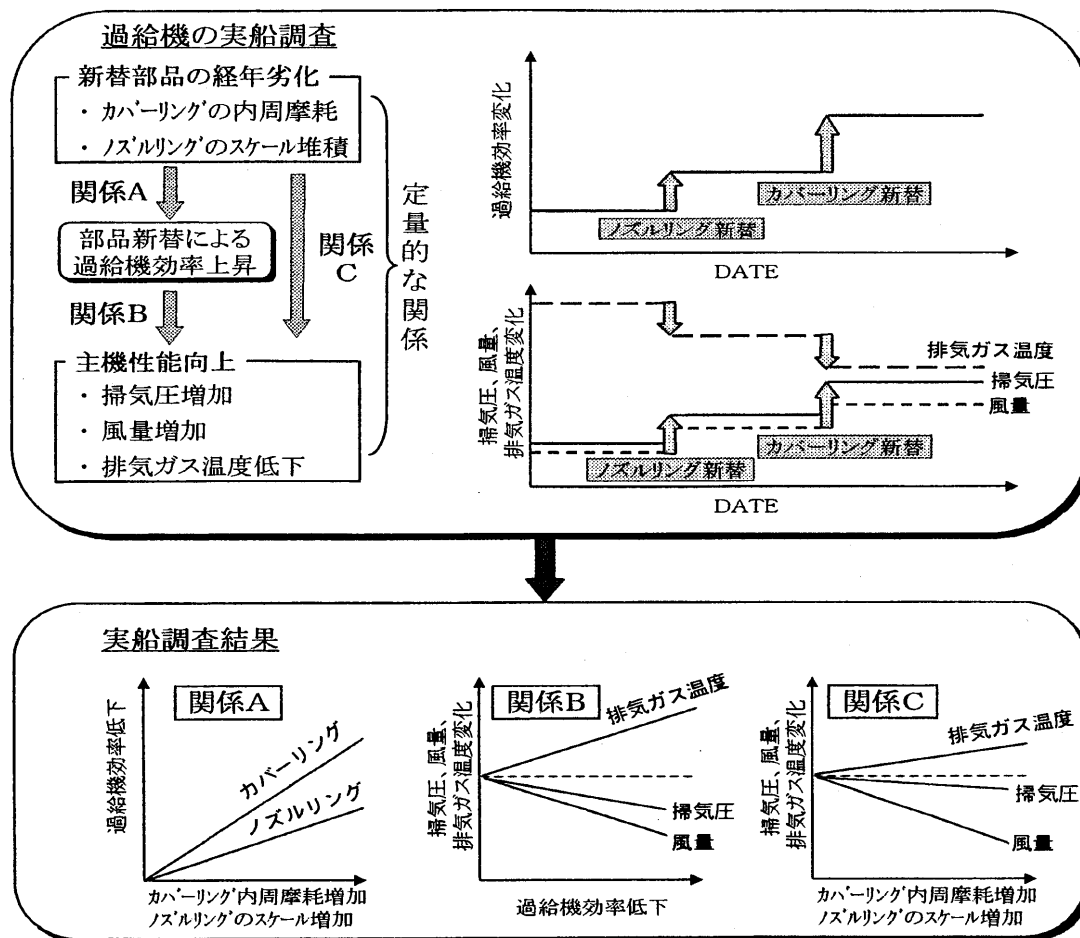


図2.3 過給機の実船調査

3. 得られた成果

本研究では機関性能変化と部品劣化との相関関係を把握しようと様々な試験を行った。この試験結果を検証し、以下の成果を得た。

3.1 単体要素での性能変化

- 1) 単体要素が劣化した場合の機関性能に与える影響を定量化することが出来た。
例として、性能値 (NO_x, P_{max}, 排気温度、燃費率) 変化と経年量の関係を数式化したものを表 3.1 に示す。
- 2) 燃料ポンプを例にすると、整備基準値までの劣化量に到達すると燃費：1.6%悪化、排気温度：7℃上昇、P_{max}：5 kg/cm²低下が予測できる。

3.2 劣化組合せ試験による機関性能変化

- 1) 劣化要素を組み合わせた場合の機関性能への影響は、単体要素劣化の単純和ではないこと解った。また、この影響度を各系統の重み係数として定量化できた。
- 2) 劣化要素を組み合わせた場合でも、単体要素での場合と同様、掃排気系の劣化が機関性能に対し影響が大きいことが解った。

表 3.1 単体要素劣化時の性能変化式

性能変化式 劣化部品	Y _n : NO _x 変化率 X: 経年量	Y _p : P _{max} 変化量 (kg/cm ²) X: 経年量	Y _t : 排気温度変化量 (℃) X: 経年量	Y _b : 燃費変化率 (g/PSH) X: 経年量
燃料ポンプ	$Y_n = 1.0 - 0.04X$	$Y_p = -5.2X$	$Y_t = 6.6X$	$Y_b = 1.0 + 0.016X$
燃料弁	$Y_n = 1.0 - 0.10X$	$Y_p = -1.7X$	$Y_t = 3.5X$	$Y_b = 1.0 - 0.011X$
エアクーラ	$Y_n = 1.0 - 0.01X$	$Y_p = -1.4X$	$Y_t = 22.2X$	$Y_b = 1.0 + 0.017X$
ピストン	$Y_n = 1.0 + 0.01X$	$Y_p = 2.2X$	$Y_t = -5.0X$	$Y_b = 1.0 - 0.01X$
排気弁	$Y_n = 1.0$	$Y_p = 1.0 + 0.021X$	$Y_t = 6.9X$	
過給機	$Y_n = 1.0 - 0.15X$	$Y_p = -8.9X$	$Y_t = 60.3X$	$Y_b = 1.0 + 0.025X$
リングライナ	$Y_n = 1.0 - 0.03X$	$Y_p = -1.6X$	$Y_t = 16.2X$	$Y_b = 1.0 + 0.011X$

但し、X=1は各部品の劣化量が整備基準値に等しい時を指す。

4. 成果の活用

本研究は、船用主機関の経年劣化という、これまで定性的にしか解らなかったテーマに対し定量的な解析を試みた、過去に例のない有意義な研究であり、第2章及び第3章で述べたような知見が多数得られた。その知見の利用方法につき各担当会社の意見を聴取したが、それらは以下のように要約される（図4.1参照）。

4.1 本研究以降のステップ

実際に就航する機関の形式は、本研究で利用した実験機とは出力・回転数、絶対的なディメンション等が異なるため、性能変化の傾向は大差ないと考えられるものの、その変化の絶対値は同一とは限らない。従って、実船機関に於いて間接的計測から機関部品状況を診断するには、対象となる実機関と今回使用した実験機との相関を求めるステップが必要である。具体的なステップとして以下の項目が挙げられる。

- 1) 幾つもの実機関データを同時に、正確に取得するためのデータ収集手段の開発
- 2) 実機関データの収集及び実験機データとの相関解析

これにより、対象となる実機関の経年劣化を把握出来るようになる。また、多くの実機関データが蓄積され、トレンドを把握出来るようになれば、実機関経年劣化の定量解析をより広範囲に展開出来ると考えられる。

4.2 機関の故障予知・診断技術の向上

本研究からは、機関部品の経年劣化は、概してNO_x発生を減少させる傾向があるとの知見が得られた。また、機関部品の劣化とこれに対する機関性能との関係を数式化し、劣化要因を組み合わせた場合の機関性能への各々の影響度を数値化することが出来た。これは、間接的計測（状態監視）によって個々の部品要素の劣化状態を推定することが可能となることを意味する。例として、機関部品個々の経年劣化基準時間を与えた場合、図4.2に示すような機関性能変化予測カーブを作成することが出来る。このように、実機関での経年劣化を把握出来るようになれば、以下項目のような機関の故障予知・診断・応用技術が向上すると考えられる。

- 1) IMO NO_x 規制対応への応用（NO_x実船計測の簡素化）
- 2) 劣化部品の推定、その劣化度合いの推測 ・ 部品交換時期予測、故障予知
- 3) 部品交換による機関性能改善量の推定

4.3 機関保守管理の適正化

機関の診断技術が向上すれば、個船毎に最適な整備計画を立てることが可能になると考えられる。但し、体系だった機関保守管理を行うには、個船毎での保守管理ではなく、フリート単位、更には船舶管理会社間・船主間での管理手法の共通化が望まれる。これには膨大なデータを迅速に処理する必要があると予想されるため、以下の機能を持った「機関データ管理運用システム」の開発・普及が必要である。

- 1) 機関データの自動計測・自動記録機能

2) 個船とデータベースとの双方向アクセス機能

3) 適正な機関整備計画立案機能

このような手法により、情報を共有することで体系だった機関の保守管理を行えるようになり、以下項目のような機関保守管理の適正化がなされるであろう。

1) 適正な整備計画、オーバーメインテナンスの回避

2) 故障診断システムの構築

3) 初期投資と整備費用との最適バランス計画

4.4 機関の開発・設計へのフィードバック

機関性能或いは信頼性の低下に対する各部品劣化の寄与度が明確になることにより、機関の開発・設計にとって重要な指針が得られる。即ち、改善・改良すべき部品系統の優先度を判断する場合の重要な材料となることには間違いない。

突発的な事故を防止するアプローチは別途必要であるが、経年劣化によって引き起こされる事故のリスクを可能な限り低減せしめ、且つ、機関の製造、運転、保守をも含むトータルライフコストをミニマイズするアプローチの第一歩が示されたことも、本研究の重要な成果のひとつである。

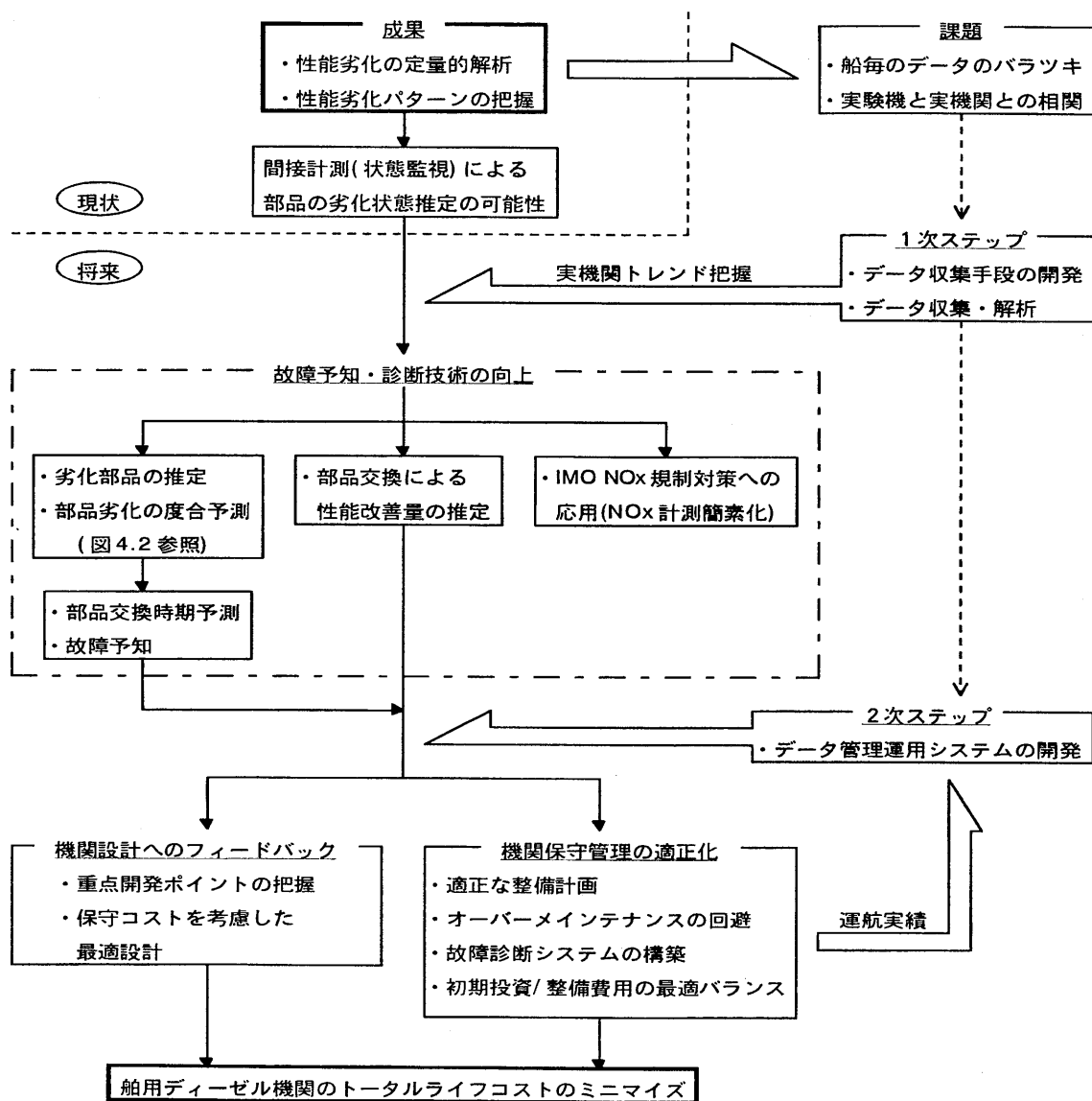


図4.1 本研究の成果の活用

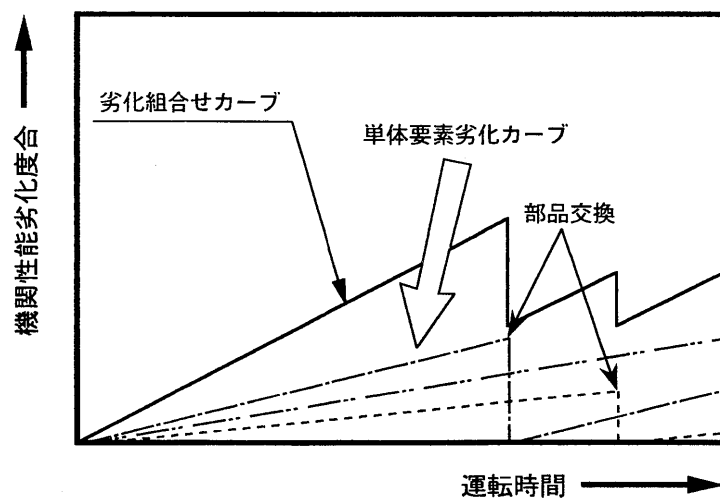


図4.2 機関性能変化予測カーブ

5. 結 言

平成9年4月から2ヶ年に亘り行った経年劣化に伴う機関性能ライフサイクルの研究が終了した。本研究の目的は、ディーゼル機関を構成する主要な機関要素の経年劣化に伴って生じる性能低下を定量的に把握し、体系的な機関管理指針を構築することである。その結果、ディーゼル機関の高い性能及び信頼性維持が可能となる。

平成9年度に行ったシミュレーション、単体・要素試験等から得られた機関要素の劣化状態における機関性能を踏まえ、平成10年度はより実際の状態に近づけるためにC重油を使用した劣化要素の組合せ試験、過給機の経年劣化についての実船調査等を行った。研究の成果は上述した通りであり、単体あるいは複合した形で機関要素が経年劣化した場合の機関性能への影響を定量的に示したことは、実機関において機関要素の劣化を開放の都度把握すれば、機関性能に与える影響及び機関要素の交換時期決定の予測を可能とし、本研究の目的であるディーゼル機関の性能及び信頼性維持の一助になり得ると考える。

実機関の運転諸元から機関要素の劣化を把握するためには、実験機と実機関との差異を補完する要素を加味する必要があるが、本研究がその為の基礎を築いたことは高く評価出来ると考える。