

調達要求番号:04-1-2621-6120-8408

件名:艦艇の推進システムに関する調査研究

御要求元:海上幕僚監部 装備計画部 艦船・武器課殿

文書番号:OM-RS-22-10001

艦艇の推進システムに関する調査研究 成果報告書

令和5年 3月

株式会社 日立製作所
ディフェンスシステム事業部
装備システム本部
指揮管制システム設計部

(表紙共 本紙 22 枚、別紙 92 枚、計 114 枚)

目次

1. 緒言	2
2. 引用文書.....	2
2.1. 仕様書	2
2.2. 法令等	2
2.3. 関連文書.....	2
3. 保全すべき情報の管理について	2
4. 役務に関する要求および分析実施方針	3
4.1. 調査研究に関する御要求.....	3
4.2. 艦艇の推進システムの定義.....	3
4.3. 本調査研究における分析方針	4
5. 調査研究内容.....	6
5.1. 調査研究の細部要領.....	6
5.1.1. 調査研究役務にて分析するデータ	6
5.1.2. 役務分析実施要領.....	8
5.2. 調査研究の分析結果.....	10
5.2.1. 乗員負荷軽減に向けたガスタービン圧縮機洗浄の効果分析(詳細:別紙2)	10
5.2.2. 適切な入渠時期を意思決定する為の船体データ利活用方式(詳細:別紙3)	13
5.2.3. 故障原因特定・整備意思決定支援に向けた異常予兆分析(詳細:別紙4)	17
5.3. 将来データ利活用に関する検討(詳細:別紙5).....	19
6. 結言	20

別紙1 成果審議会 説明資料

別紙2 ガスタービン主機圧縮機分析

別紙3 船体性能分析

別紙4 データ利活用例に係る検討

別紙5 予兆解析結果 分析資料

1. 緒言

本成果報告書は、「艦艇の推進システムに関する調査研究」(海上自衛隊仕様書 MWS-S-28000)に基づく役務(以下、本役務という)による細部項目の検討結果に関して報告するものである。

2. 引用文書

引用文書は以下の通り。

2.1. 仕様書

(1) M3S-J-00001 武器修理一般共通仕様書

2.2. 法令等

(1) 海上自衛隊契約規則の実施に関する細部(海幕経第183号。27. 3. 18)

(2) 装備品等及び役務の調達における情報セキュリティの確保について(通達)(防経装第9246号。21. 7. 31)

2.3. 関連文書

(1) 海上自衛隊契約規則(平成27年海上自衛隊達第4号)

(2) 著作権法(昭和54年法律第48号)

3. 保全すべき情報の管理について

海上自衛隊仕様書 MWS-S-28000 別紙「情報セキュリティ指定書」において指定された保護対象情報に関しては、社内規則及び管理体制に基づき管理を実施した。なお、保護を要しない公知情報等の一部情報に関する保護情報指定解除については別途「保護すべき情報の解除申請書」にて解除させて頂いた。

4. 役務に関する要求および分析実施方針

4.1. 調査研究に関する御要求

調査研究役務に関する御要求(企画提案競争方式)は以下の通りである。

(1)海上自衛隊艦艇の推進システムの可動率向上に資するデータの活用方法について調査研究すること。

(2)海上自衛隊艦艇の推進システムのライフサイクルコスト低減に資するデータの活用方法について調査研究すること。

4.2. 艦艇の推進システムの定義

本調査研究で分析を実施するにあたり、艦艇に対するデータの活用方法として各装備品の状態変化の度合い及びその説明変数¹を把握し、経年劣化などの状態を検出、その結果に対する意思決定の支援を実施することが必要であると考えた。その経過を測るためには推進システムへのインプット及びアウトプットまで包含したシステムを対象に推進システムを定義する必要があり、図 4.2-1 に示すシステムを本調査研究における「推進システム」として定義したうえで進めることとした。

海上自衛隊特有の運用による推進システムにおいては、民(工場、プラント等)の定常的な運用環境とは異なり、目的(作戦・訓練など)に応じた非定常的な運用環境下で船体・機械・電機¹の各装備品の可動率を確保し、ライフサイクルコストの最適化を考慮した運用を計画していくことが重要である。よって、本調査研究の成果として、従来の維持整備方法より効果的・効率的な維持整備を図り、艦艇装備品の高い可動率を確保するための手法を見出すことが重要と考える。



図 4.2-1 本調査研究における推進システムの定義

¹ 説明変数とは、因果関係について検討する際に、ある要因によって結果に影響を及ぼすか、あるいは少なくとも結果と関連すると考えられる要因となる変数のことを示す。

4.3. 本調査研究における分析方針

4.1項のご要求に対し検討する為、官民の意見交換会を実施させて頂いた。艦艇のライフサイクルコストのうち、運用開始から実運用の期間においてコントロール可能なコストとしては表 4.3-1 に示すように「イニシャルコスト」及び「ランニングコスト」に大別される。このうちイニシャルコストについては艦艇の状態に応じてコントロールできるもの性質ではない為、本調査研究における状態監視指標を用いたデータ利活用例の検討対象としては、表 4.3-1 に示すもののうちランニングコストを対象とした。このランニングコストは、燃料コストと、維持整備コストに分類できる。

本役務の実施に当たっては、具体的な官民共同のPDCAサイクルの実現を図り、かつ有用なデータ利活用例を見出すため、表 4.3-2 の内容について分析するものとし、2週間に1度の官民勉強会を含め、随時分析内容のブラッシュアップを図るものとした。

表 4.3-1 ライフサイクルコストの分類

#	コスト大分類	コスト小分類	備考
1	イニシャルコスト	調達(／廃棄)	本検討では対象外
2	ランニングコスト	燃料コスト	主に消耗品(燃料)のコスト
3		維持整備コスト	・検査コスト ・交換備品コスト ・修理コスト ・清掃コスト ・人員コスト(工数のみならず、乗員の負担もコストの一部ととらえる) ・etc…

表 4.3-2 推進システムの抱える課題の解決に向けた調査研究内容

#	課題	問題	本調査研究における分析及び検討の目的
1	乗員整備が多い (乗員の負担が大きい)	不要な整備を敷いている可能性がある	データ分析に基づきガスタービン圧縮機洗浄の実施を意思決定する為の分析可能性を探る
2	消費コストが多い (燃料費・整備費が高額)	適性な入渠時期を捉えていない	データ分析に基づき年次検査における入渠の実施を意思決定する為のデータ利活用方式を探る
3	故障によるインパクト大 (故障＝非可動)	故障時の原因特定が困難	データに基づきトラブルシュートを行い修理要領の意思決定する為の異常予兆の可能性を探る

5. 調査研究内容

本調査研究においては4.3項「調査研究に関する御要求」にて示す「推進システムの抱える課題」に向けたデータの利活用方法²について調査研究を実施した。

当該検討にあたっては、艦の推進システムの状態把握及び維持整備データの分析が必須であり、分析対象艦として「技術管理支援装置³」を搭載した COGLAG 艦(26DD「しらぬい」及び 28DDG「はぐろ」)を対象とした。

5.1. 調査研究の細部要領

5.1.1. 調査研究役務にて分析するデータ

本調査研究における可動率向上及びライフサイクルコスト最適化の為、表 5.1-1 に示す維持整備データおよび技術管理支援装置により収集した運転データを使用する。³技術管理支援装置のデータは航行時の動作(推進モード、速力区分など)及び艦艇の状態(各種センサデータなど)など、艦艇に直接関連する各種データを指し、表 5.1-2 に示すように装備品状態を表すセンサデータ及び操作・稼働状況を表すデータの 2 カテゴリーから構成されている。

表 5.1-1 分析用参考資料⁴

#	閲覧データ・文書	抽出情報(例)
1	定期検査実施要領	整備項目・整備間隔
2	年次検査実施要領	(製造業者によらない一般事項)
3	取扱説明書	整備項目(乗員整備及び定年検整備項目)・ 整備間隔(製造業者の固有事項を含む)
4	標準整備カード	官整備実施作業
5	艦艇造修記録簿	実艦の故障実績、就役から実施した定年検時の検査及び 修理実績、艦ごとの入渠実績
6	燃料補給実績	実コスト(工数)
7	乗員整備実績	乗員整備による部品交換リスト 乗員整備実施項目/日時
8	機関日誌	燃料積載量、洋上/陸上補給量、補給場所、補給日時

² 艦の推進システム関連データを蓄積する機能を有する艦上装置

³ 技術管理支援装置の運転データは、本艦に搭載されている外付け HDD に出力される日々出力データを使用することを想定する。

⁴ 表 5.1-1 に示す資料は、企画提案段階において想定している一部である。追加データの有無や使用可否については、官民調整の上で推進していくことを想定している。

表 5.1-2 技術管理支援装置のデータ(一例)

大分類	中分類	データ項目	備考
装備品状態を表すセンサーデータ	共通	時刻	秒単位
		主軸回転速度・出力	左舷・右舷
		速力	左舷・右舷
	主機/主発	時刻	秒単位
		燃料流量	L/min
		振動	
		温度・圧力	冷却空気温度、潤滑油温度など
		電圧・電流・周波数	発電機のみ
		有効電力	発電機のみ
		気圧	
操作・稼働状況を表すデータ	共通	時刻	秒単位
		計測点名称	速力区分、操縦モード等
		測定値	1/0
		状態	ON/OFF
		推進モード	機械推進／電機推進／COGLAG
		操縦モード	遠隔手動／自動

5.1.2. 役務分析実施要領

本調査研究では限られた時間的リソースの中で最大限の成果創出に向け、表 5.1-3 及び図 5.1-1 に示すフローにてデータ利活用方式の立案を行い、その評価をいただいた。データ利活用方式の検討プロセスにおいては、当該調査研究従事者が立案を行い、官側有識者(機関長、造修補給所、補給本部など)からフィードバックを得るまでの PDCA サイクルを短い期間で反復することを試行し、その精度及び本調査研究の成果を高めるものとした。

表 5.1-3 本調査研究における作業内容一覧

#	作業名	環境	備考
①	課題の設定	日立	調査研究における課題の仮説を立て、仮設定
②	訪艦・聴き取り (乗員・有識者ヒアリング)	官民共同	ヒアリング等による業務課題に向けた情報を収集し、問題点を抽出
③	問題の抽出		
④	分析要領の決定	官民共同	抽出した問題点に対し、その分析要領を官民ディスカッションにより認識を合わせ、決定する。
⑤	訪艦・データ取得	本艦/ 各造修補給所/ 補給本部 他	技術管理支援装置データ収集(外付け HDD もしくは USB によるデータ収集)及びその利活用
⑥	データ分析	日立分析環境 (注 1)	Microsoft Office ⁵ 、Python ⁶ などを利用 (GPU(注 2)なども活用)
⑦	問題解決策の提案	官民共同	本艦、各造修補給所、補給本部含め 分析結果及びその活用法を提示、その 所見をフィードバックする。
⑧	訪艦・所見聴き取り	官民共同	

注 1: 保護すべき情報、注意情報以上でないデータ分析については、日立社内分析環境を原則として使用する。

注 2: GPU(Graphics Processing Unit)は AI 分析における並列演算性能を向上させるために使用する、リアルタイム処理に特化した演算装置あるいはプロセッサを表す。

⁵ Microsoft Office は、米国 Microsoft Corporation の米国およびその他の国における登録商標または商標です。

⁶ Python は Python Software Foundation が管理するプログラミング言語であり、Python Software Foundation の登録商標です。

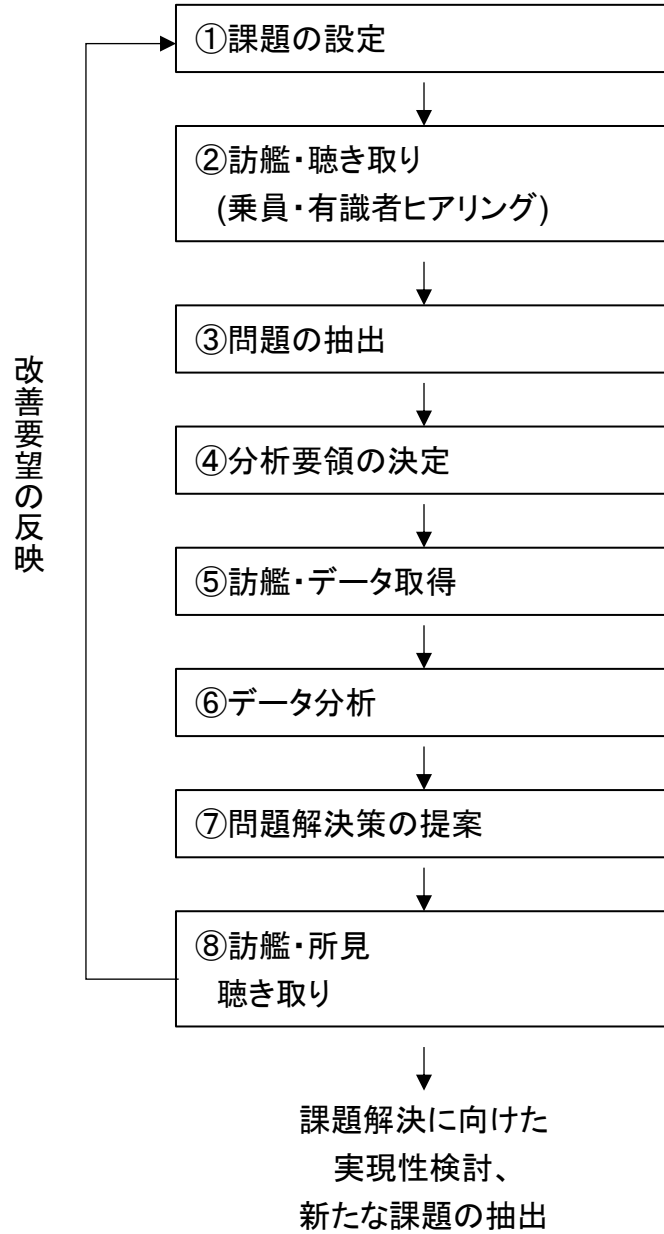


図 5.1-1 本調査研究における作業フロー

5.2. 調査研究の分析結果

5.2.1. 乗員負荷軽減に向けたガスタービン圧縮機洗浄の効果分析(詳細:別紙2)

ガスタービン圧縮機洗浄の効果分析について、**別紙2**に検討結果を示すとともに、下記に分析の概略を示す。

(1) 乗員へのヒアリング結果

下記のヒアリング結果に基づき、センサデータを活用して圧縮機の洗浄タイミングを判断できる可能性の見出す分析を実施した。

- ・航海中にガスタービンを使えない時間をつくりたくない
- ・非常時のためにタンクを空けておきたい
- ・洗浄は1日ばかりで実施するため、乗員の負担になっている 等

(2) データ分析方針

一般に装備品(ガスタービン装置)の定期的な検査としては、稼働時間毎に行う分解検査(Time Based Maintenance:TBM)や定期的実施する乗員整備及び民側定期整備(専門業者)が主流である。しかしながら、乗員整備の負担等については機器の定量的な状態監視を含め、海自艦艇の推進システムにおいては難易度が高いものである。

その中で、当該システムにおける複数のセンサデータを総合的にとらえ、軽微な状態変化を可視化することが重要であることを官民の共通認識とし、機器の状態に合わせて真に必要な整備時期及び項目を選定する為の付加情報を算出するためのデータ利活用の可能性を探るものとした。

本調査研究においては官有識者とのディスカッションを通じ、GT 主機の圧縮機洗浄が GT 主機 圧縮機性能に影響すると仮定し、技術管理支援装置の取得データより、1号 GT 主機「ガスゼネレータ圧縮機吐出(B)圧力」(MPa)・1号 GT 主機「ガスゼネレータ回転速度(B) (監視用)」(rpm)および補正に使用するデータを抽出。当該データを用いて散布図で可視化、圧縮機の洗浄前後での比較を実施した。

なお、完成図「LM2500IEC 型 ガスタービン主機 取扱説明書」に従い、表 5.2-1 及び表 5.2-2 に示す項目、計算式を用いて補正値を算出のうえ、分析に使用した。

表 5.2-1 記号(略称)及びその名称・計算式(GT 主機 LM2500 IEC)

#	記号	名称/計算式
1	NGG	ガスゼネレータ回転速度
2	NPT	出力タービン回転速度
3	P3	ガスゼネレータ圧縮機吐出圧力
4	P54	出力タービン入口ガス圧力
5	PFM	燃料マニホールド圧力
6	T54	出力タービン入口ガス温度
7	T2	ガスゼネレータ吸気温度
8	P0	大気圧
9	P2	ガスゼネレータ圧縮機入口圧力
10	TL0	ガスタービン潤滑油入口温度
11	Θ30	██████████
12	Θ15	██████████
13	δ	████████████████████
14	ζ	████████████████████
		████████████████████
		██████████

表 5.2-2 記号(略称)及びその名称・計算式(GT 主機 LM2500 IEC)(補正項)

#	記号	名称	計算式
1	NGGK	修正ガスゼネレータ回転速度(30℃)	██████████
2	NGGR	修正ガスゼネレータ回転速度(15℃)	██████████
3	NPTK	修正出力タービン回転速度	██████████
4	P3K	修正ガスゼネレータ圧縮機吐出圧力	██████
5	P54K	修正出力タービン入口ガス圧力	██████
6	PFMK	修正燃料マニホールド圧力	████████████████████
7	T54K	修正出力タービン入口ガス温度	████████████████████
8	TSK	修正潤滑油排油温度	██████

(3) 分析結果

圧縮機出口圧力×GG 回転速度を確認し、「圧縮機出口圧力×GG 回転数(補正なし)」を洗浄前後の値を可視化のうえ比較したところ、洗浄前後で明確な違いが見られた。

「圧縮機出口圧力×GG 回転数(補正なし)」を活用した回帰直線や数式などで閾値を設定できる可能性あり。圧縮機を洗浄すべきかどうか判断できる可能性がある。

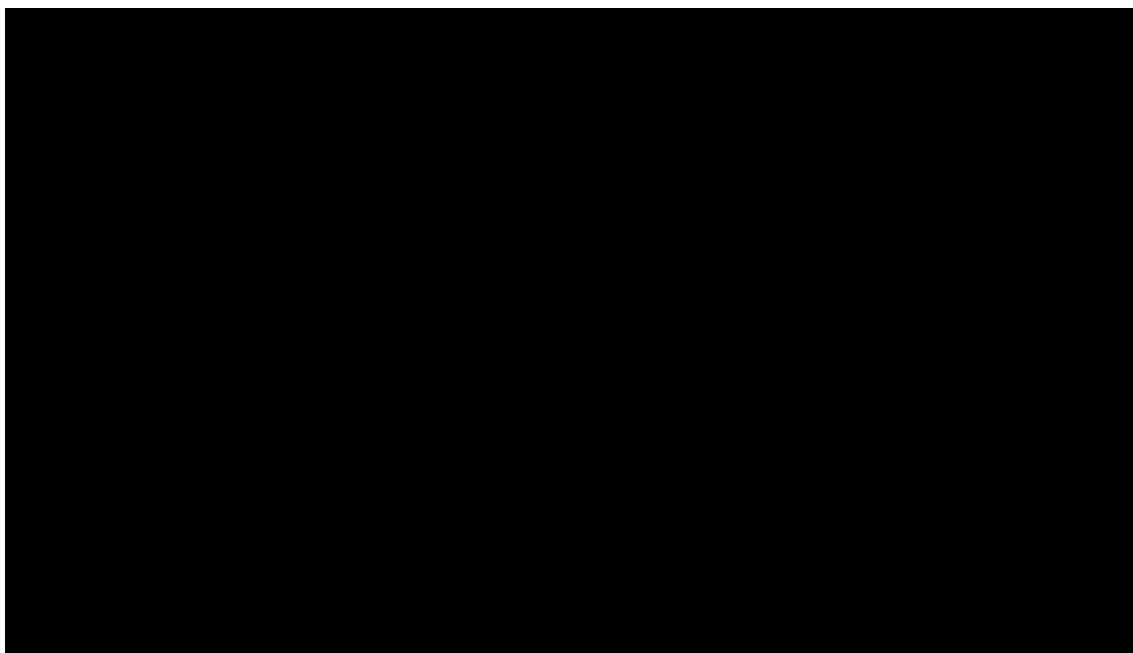


図 5.2-1 ガスゼネレータ回転速度に対する吐出圧力の性能特性

5.2.2. 適切な入渠時期を意思決定する為の船体データ利活用方式(詳細:別紙3)

入渠時期を意思決定する為の船体データ分析について、**別紙3**に検討結果を示すとともに、下記に分析の概略を示す。

(1) 乗員へのヒアリング結果

下記のヒアリング結果に基づき、センサデータを活用して圧縮機の洗浄タイミングを判断できる可能性の見出す分析を実施した。

- ・性能が出ていないことに気付いても、入渠すべきか判断が難しい
- ・燃料を使いすぎないように言われているが、どうすべきか分からない
- ・速力を出すべき時に最大速力を出せるようにしておきたい 等

(2) データ分析方針

センサデータの利活用により、①整備項目見直しによる期間短縮、②同型艦の検査時期重複等の見直し等により、海自艦艇の可動率向上に寄与することができる可能性がある。入渠による船底洗浄タイミング最適化のためのデータ利活用検討センサデータを活用し、性能観点およびコスト観点で入渠すべきか判断できるようにすべき可能性があるかを分析した。入渠による船底洗浄の前後で「速力×軸馬力」の関係性を比較し、データを活用して入渠を伴う船底洗浄による性能変化やコスト変化を把握できる可能性があるか分析した。

- ・対象艦:26DD「しらぬい」
- ・速力:「(共通データ) 速力」(kt)
- ・馬力:「左舷軸出力」 + 「右舷軸出力」(PS) より艦全体の軸馬力を算出する
- ・燃料使用量:「燃料流量」

(3) 分析結果

① 船体性能可視化結果

26DD しらぬいのデータを活用し、「速力×軸馬力」を可視化し、入渠による船底洗浄前後で比較を実施した。その結果、洗浄前と洗浄後の船体性能(同速力を出すための必要な軸出力)を比較することで、洗浄後の船体性能が良い(ある速力を出すために必要な軸出力が小さい)傾向を見出した。

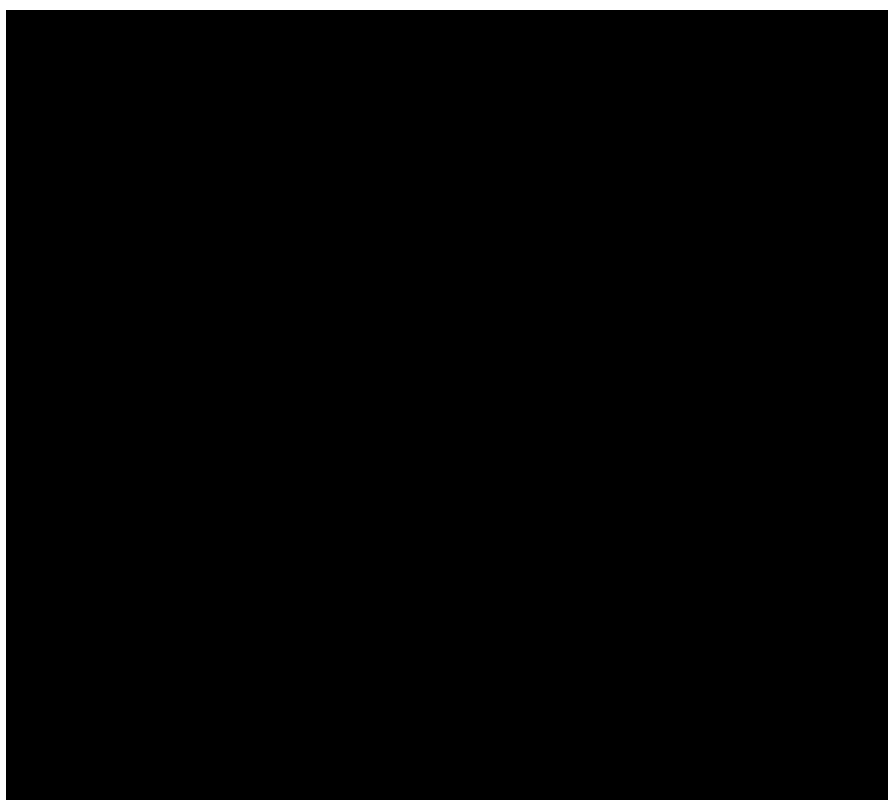


図 5.2-2 速力・軸馬力特性(26DD しらぬい/FY03 年検 船底清掃前)



図 5.2-3 速力・軸馬力特性(26DD しらぬい/FY03 年検 船底清掃後)

② 燃費分析結果

前述の①の分析に加え、同一速力における「軸馬力×燃料使用量」を可視化し、入渠による洗浄前後で比較した。その結果を図 5.2-4 に示す。この図より、洗浄後の方が同じ速力に対して必要な燃料が少ない(24kt 出力時で約 12%、20kt 出力時で約 5%の性能向上)傾向を確認した。

後述するが、洗浄により大幅な燃費向上が図れることから、入渠による洗浄、または入渠なしのプロペラ清掃により、トータルのライフサイクルコストの低減につながる可能性がある。

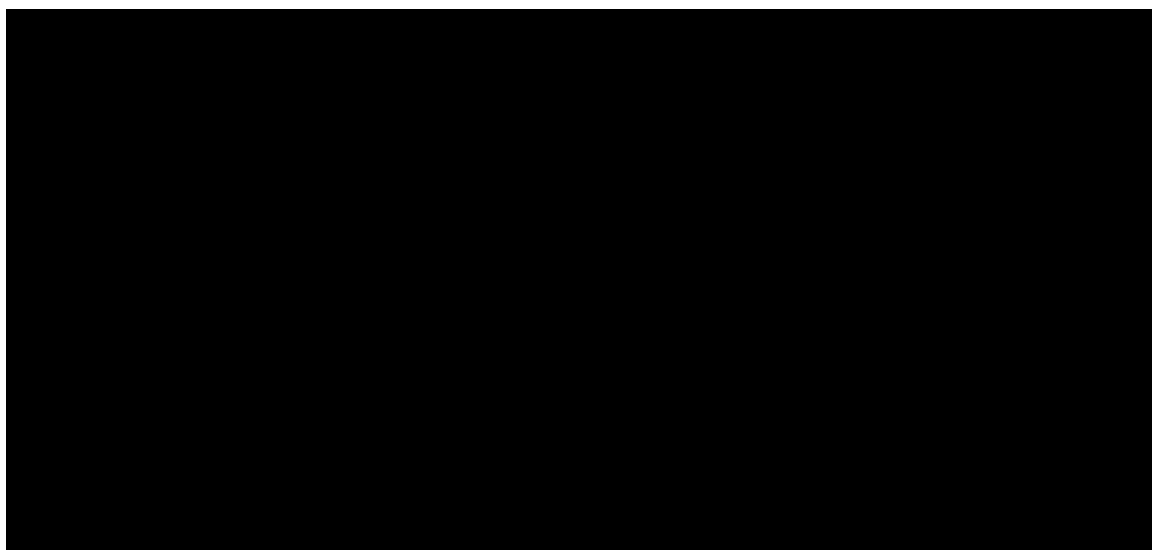


図 5.2-4 軸出力・燃料使用量特性(26DD しらぬい/FY03 年検 船底清掃前後の比較)

5.2.3. 故障原因特定・整備意思決定支援に向けた異常予兆分析(詳細:別紙4)

26DD しらぬいにおいては2022年に主発の異常事象が発生しており、その予兆の検知可能性をテーマとして異常予兆の可能性を検証した。別紙4にその検討結果の詳細を示すとともに、下記に分析の概略を示す。

(1) 目的と実施内容

26DD 3号主発の設備データに対し、XXXXXXXXXXに発生した異常事象の予兆診断(異常検知)の可能性があるか検証する。

(2) 使用センサ

下記に示す 26DD 3号主発のデータを対象とした。

No	センサ名	No	センサ名
1	(91)3号主発機関回転速度	9	(101)3号主発 RG ピニオン後部軸受温度
2	(92)3号主発タービン入口温度	10	(102)3号主発 RG ホイール前部軸受温度
3	(93)3号主発機関潤滑油温度	11	(103)3号主発 RG ホイール後部軸受温度
4	(95)3号主発機関潤滑油入口圧力	12	(121)3号主発有効電力
5	(97)3号主発冷却海水入口圧力	13	(123)3号主発吸気室負圧
6	(98)3号主発 GEN/RG 潤滑油入口温度	14	(124)3号主発吸気デミスタ温度
7	(99)3号主発エンクロージャ内温度	15	(281)3号主発電機燃料流量
8	(100)3号主発 RG ピニオン前部軸受温度		

※3号主発 GEN/RG 潤滑油入口圧力は、40℃以上で動作モード(供給系統)が切り替わるため、本診断では除外した。

(3) 予兆診断結果総括

予兆診断の結果得られた異常測度(学習させた正常運用状態からの乖離度)及び予兆を機械学習にて検知した日時を図 5.2-5 に示す。このデータより、異常事象発生 の 15 日前、6 日前に異常を予兆することが確認された。異常に寄与すると考えられる「吸気室負圧」や「冷却海水入口圧力」については、事象発生 の 20 日前頃より通常運用状態からの乖離が確認された。本検討については特定の事象に対し実行した機械学習による異常検知の試行であるが、今後他の事象についても実施することで予兆検知の制度を高め、実用化につなげられる可能性がある。

- ① 異常測度は██████から上昇傾向になり、██████ (事象の 15 日前)、██████ (事象の 6 日前) に予兆を検知した。
- ③ 予兆検知期間の寄与度を確認すると「吸気室負圧」や「冷却海水入口圧力」が上位の寄与度を占めており、可視化をすると██████から低下傾向にあり学習値から乖離していることを確認した。
- ④ その他のセンサを確認したところ、「機関潤滑油入口圧力」が██████から部分的にパルス状に低下していることが確認した。

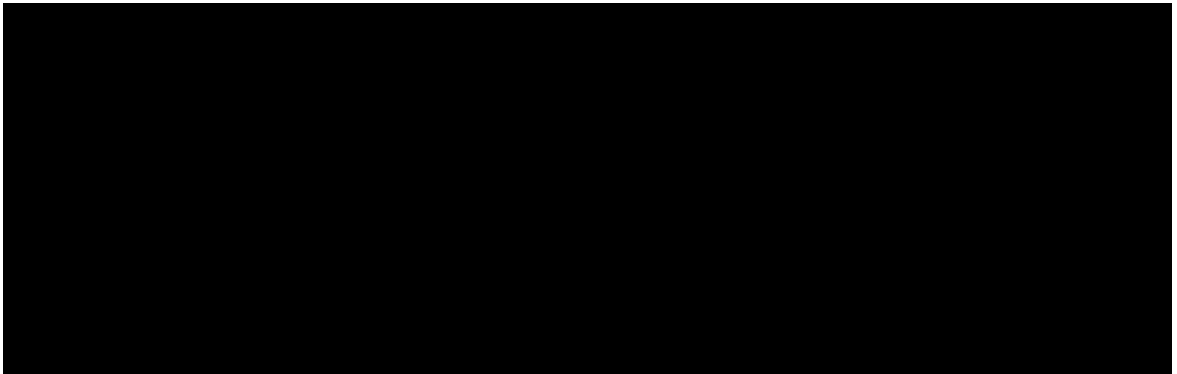


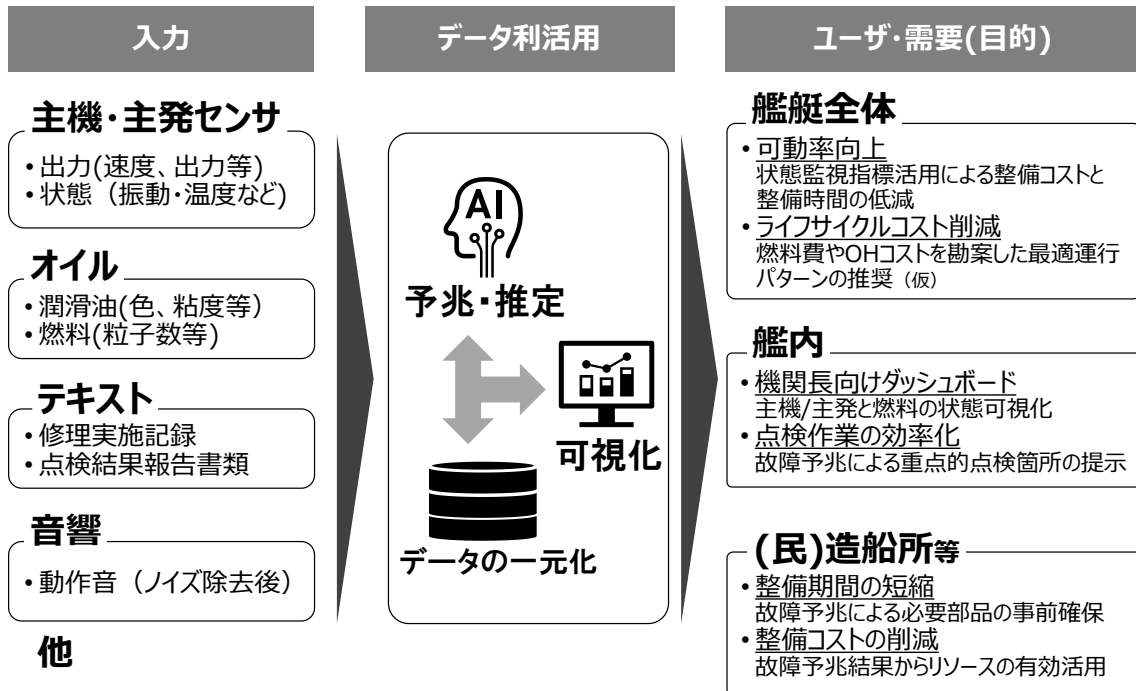
図 5.2-5 異常測度の時系列分析結果

5.3. 将来データ利活用に関する検討(詳細:別紙5)

入渠時期を意思決定する為の船体データ分析について、別紙5に検討結果を示す。

本調査研究では、前項で述べた主機・主発等のセンサデータ及び付随する各種データを用いた分析により得られた状態監視指標の算出及びその利活用方法の検討方針を元に、具体的な艦艇の可動率向上やライフサイクルコスト最適化を志向する為のデータの利活用方法を検討してきた。幅広いデータ利活用という観点では、潤滑油や燃料等のオイル、様々なテキスト情報、さらには音響情報の活用等が考えられる。これらの更なるデータ利活用により、艦内での高度な状態可視化や点検作業の効率化、あるいは民などへのデータ貸与による、業界全体の効率化を図るなど、様々な観点が考えられる。

従来蓄積されてきたデータの分析及び AI・機械学習による利活用検討は、一朝一夕には実現できるものではない。次期護衛艦への設計反映を含め、将来的には官の省人化・省力化への対応、論理立てた意思決定の為の指標算出支援等に向け、現場で必要な分析を真摯に繰り返し行う様々な試行が必要であるとする。本調査研究においては、推進システムの可動率向上及びライフサイクルコスト低減を目途としつつ、これら多くの試行の積み重ねに向けた基礎検討を目指すものとなる。



6. 結言

本調査研究で得られた成果は、主に下記の通り。

艦艇の推進システムに関する調査研究成果

- 官民共同で約2週に1度のディスカッション(勉強会)を設け、都度分析の方針を議論し定めることで、短期間において複数の分析を実施するPDCAサイクルの繰り返しが可能であること、また官の求める分析等を効率的に実行することが可能であることを確認した。
- 分析の結果として、省人化・省力化の可能性に向けた分析、燃料費の削減・艦可動率の向上に向けた分析、推進システムの異常予兆等についてデータ利活用の可能性を示すことができた。また、その分析プロセスを確立することができた。
- 官有識者のヒアリング(補給本部、各造修補給所、本艦乗員ほか)を定期的を実施し、海幕を窓口として官全体を巻き込みスムーズに分析を実施するスキームを確立した。
- 民側の分析手法(機械学習、AIを含む)による分析を、官と共同で随時確認し、有識者を交えたディスカッションにより即時に次の分析につながるフィードバックをかけることで、官の方針に準じた民の分析をより効率的に実施することができ、民活化による高度データ分析の有効性を実証することができた。

今後も別紙5に示す通り、本役務をよりブラッシュアップした内容で分析を継続実施することにより、よりデータドリブンな官の意思決定を支援すること、またそのことによる艦の可動率向上、ライフサイクルコスト低減を図ることが可能であると考えます。

本役務の実施にあたっては、ご要求元の海上幕僚監部 装備計画部 艦船・武器課殿を始めとし、防衛装備庁殿、各造修補給所殿、乗員殿の多くのご協力をいただき作成することができました。本紙面を借用し、関係各位に感謝申し上げます。