

CBMライフサイクル保守管理

— 船用機器の状態監視・状態評価技術 —

寺 剛史*, 飯間 智史**, 若生 拓也***

1. はじめに

IACS統一規則（以下、UR）Z27において、Condition Based Maintenance（以下、CBM）認証に関するスキームが定められ、2020年1月以降、IACSにおいて、統一的に運用されるものとなった。これを受け、日本海事協会では、CBM認証を本格的に進めることとなる。CBMは、遠隔で対象機器の状態監視、評価、予測が可能となる技術である為、自動化が求められている分野で必要となる技術である。今般、CBM適用のメリットを以下のように整理した。

1) メンテナンスの最適化

劣化度を監視することで、メンテナンスが必要な箇所を洗い出すことが可能となる。その為、メンテナンスの負担やコストの削減につながる。

2) 検査の合理化

部品によっては、一定の検査期間以上に寿命が持続しているものもあれば、検査前に異常をきたす可能性があるものもある。CBMを採用することで、機器の稼働条件に即した検査の実現につながる。

3) 検査の標準化

従来の検査方式では、検査員の経験に依存する部分もあり、検査精度にばらつきが生じる可能性もある。CBMを採用することで、一定の品質が担保されたセンサーで取得するデータを基に、評価技術が標準化される。その為、熟練者同等の検査実施が可能となる。

ただし、CBMの実施は以上のメリットの反面、課題も存在する。

1) 初期・維持コスト

センサーや解析装置の設置による初期コストが増加する。また、それらの設備の管理費用等の維持コストが増加する。特に船陸間通信によりモニタリングする場合、通信費用や監視等の追加コストを考慮する必要がある。

2) 計測値や解析方法の信頼性

センサーの精度が保証される範囲内で適切な箇所適用されていなければ、結果の信頼性も失われる。その為、適切な計測法とその解析法が重要である。

3) 判断基準の獲得

船員及び検査員は、異常と判断するデータの構成や検査要否を判断できる知見が必要となる。

今後、CBMは船舶の高度な自動化、自律化に向けたステップとして重要な要素となる為、船上でのデータ蓄積やセンサーの精度に関する技術は発展していくものと予想される。従って、より一層CBM適用船舶が拡大していくものと考えており、合理的な機器モニタリング／解析法の開発や関連規則の改正及び策定を進めていく。

2. CBM規則について

船舶機器のCBM採用は船舶所有社（船舶管理会社）の申し込み及び日本海事協会の承認により、表1の開放検査をCBM方式とすることができる。

表1 機器等の開放検査

検査項目	検査内容
1. 往復動内燃機関	・シリンダカバー、ライナ、ピストン、クロスヘッドピン及び軸受、連切棒、クランクピン及び軸受、クランクジャーナル及び軸受、カム軸及び同駆動装置、過給機、掃気ポンプ又はフロア、空気冷却、付属する重要なポンプ。
2. 蒸気タービン	・タービンロータ及び軸受、ケーシング、タービンと減速装置の継手、ノズル弁、操縦弁。
3. 動力伝達装置及び軸系装置	・減速装置、逆転装置、クラッチ、弾性継手、中間軸・推進軸及び当該軸受。
4. 補助機関	・発電機、推進機並びに操船・保安機を駆動する補助機関。
5. ウォータージェット推進装置	・操船駆動システム用圧ポンプ、潤滑油ポンプ、冷却器、その他。
6. 旋回式推進装置	・推進用歯車、中間軸歯車、駆動軸歯車、軸受、軸受及びクラッチ、旋回用歯車、旋回用圧ポンプ及び出圧モータ、潤滑油ポンプ、冷却器、その他。
7. 補機	・空気圧縮機、送風機、冷却ポンプ、燃料油ポンプ、潤滑油ポンプ、給水、復水、ドレンポンプ、ヒルジ、バラスト、消化ポンプ、復水器、給水加熱器、冷却器、油加熱器、燃料油タンク、空気機、貨物装置等、甲板機器、造水装置、その他。

機器全体又は部品毎にCBMを適用することが可能であり、管理上のコスト、船員の負担の程度、技術的な可能性等に基づいて最終的に採択を決定する。また、「鋼船規則B編附属書B9.1.3-4.機関計画保全

* 株式会社 MTI

** 株式会社 ジャパンエンジンコーポレーション

*** 日本海事協会 技術研究所

検査（PMS）及び機関状態監視保全検査（CBM）管理ソフトウェアの承認要領1.3.3-1.(3)において、機器の安全上、良好な運転状況か判断する為に計測データのトレンドと共に限界値の表示を求めている。一方で、エンジンの負荷や性能、気象状況のような外的な要因、燃料の性状等、複雑なパラメータの下での状態異常の判定を行うことは非常に難しい。従って、対象機器製造社又は船舶所有社（船舶管理会社）による異常検知技術に対する信頼性、データの蓄積、活用の模索等はCBM実現の重要なポイントとなる。

3. 本研究について

本研究は、上記の項目を基にCBM実現に向けて船舶所有社、機器の製造社、船級協会が「主軸受の潤滑油（以下、LO）出口温度監視による軸受の損傷把握」を目的として行った共同研究である。なお、成果については日本海事協会における、「CBMガイドライン（第2.0版）」に採用されている。

本研究では、船用プラントの故障がどの部位でどのように発生しており、それがどのような影響を及ぼし、現状はどのように防止しているのかを把握し、それらをデータに代替する手法の検討をリスク評価手法にて行った。本リスク評価手法では、Fault Tree Analysis（以下、FTA）を使用し、故障の原因解析を行い、本FTAから計測可能なパラメータを決定している。その結果から今回CBM手法を適用する主機関主軸受に関しては、主軸受LO出口温度を監視する手法を選定した。主軸受LO出口温度監視による軸受の損傷把握が可能かどうかについても評価を行った。また、計測された実船データを用いて損傷を適切に把握できるかどうかを検討し、その技術の確からしさを検証する為、設置状況を模擬した陸上試験を実施することでCBM適用の可能性を検討した。

3.1 実船監視

実船において主軸受LO出口温度を連続データとして収集し本データを解析することで、主軸受の状態診断技術になり得るか検討する為、図1の設置図のように台板サドルに测温抵抗体を取り付けた。

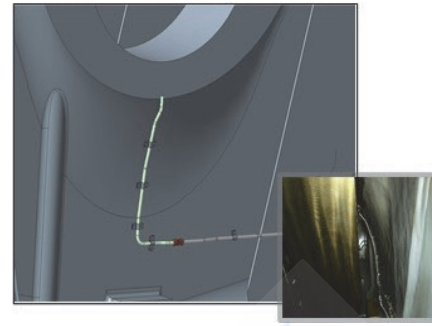


図1 実船設置図

2019年12月に測定したNo.2（黒線）、4（赤線）の主軸受LO出口温度を図2に示す（縦軸：温度[℃]，横軸：時間[日]）。丸枠で囲まれている部分は測定したデータに+1度温度を上昇させたものである。瞬間的に温度が上昇する状態について検討することで、解析の有効性を目的としたものである。

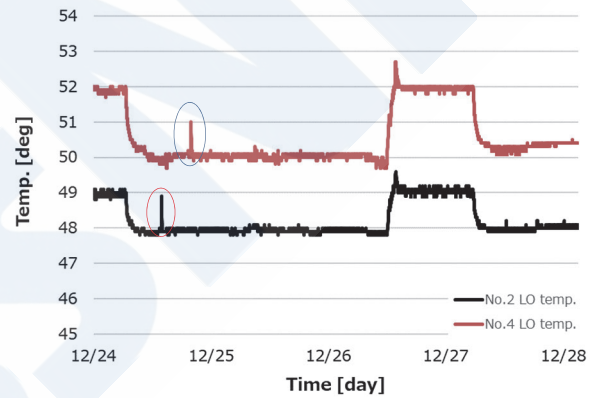


図2 No. 2, 4メインベアリングLO出口温度（12月）

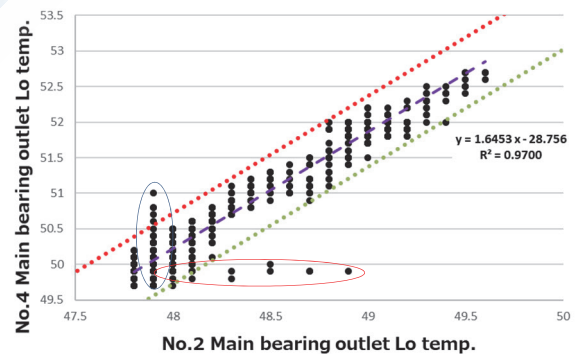


図3 No. 2, 4メインベアリングLO出口温度相関図（12月）

図3のように各メインベアリングLO出口温度勾配は同一である為、縦軸No.4、横軸No.2の出口温度として相関を取ることで、回帰直線を青点線のように引くことができる。回帰直線に対して、±0.5℃の平行な赤—緑点線の範囲にほぼ収まる結果となった。図2, 3における赤枠、青枠で囲まれているプロットからわかるように、No.2の瞬間的な温度上昇

に対しては、水平右方向にデータが広がっていくことが確認できた。また、No.4に対して瞬間的な温度上昇が起こった際には、鉛直上方向にプロットされていくことになる。従って相関に対して温度幅を設定することで異常値を鮮明に判別することが可能となる。異常発生 の判定において、発生時間を確認する為には、計測した生データを確認することが適切であると考ええる。

2020年6月に計測したNo.2, 4の主軸受の計測結果の一部を図4に示す(縦軸:温度 [°C], 横軸:時間 [日])。センサーの不具合によって、連続データの一部が部分的に振動状態になった。

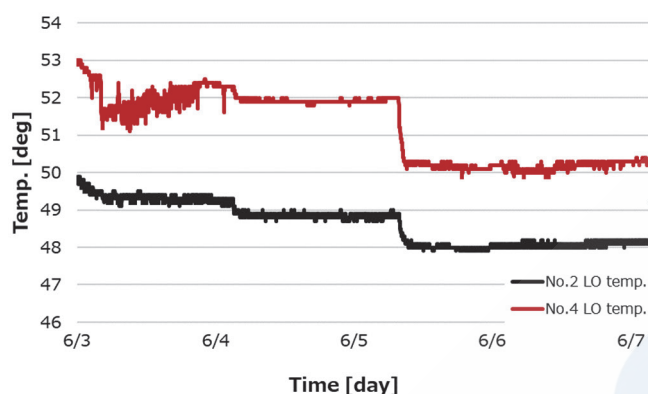


図4 No. 2, 4メインベアリングLO出口温度 (6月)

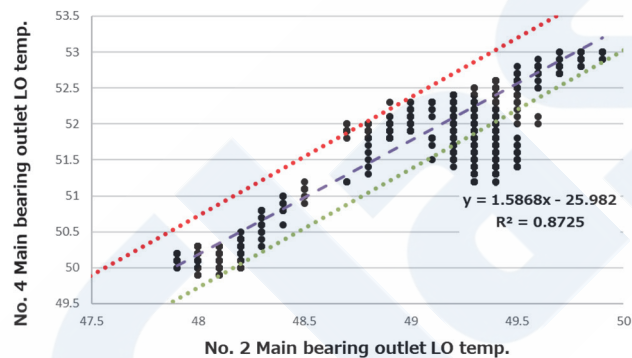


図5 No. 2, 4メインベアリングLO出口温度相関図 (6月)

図5の結果については、振動がNo.4で起こった状況において、同様な形で解析するとまとまったような形としてデータが $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ の平行線から外れた形で表現された。No.4側で振動現象が起こった間に、No.2側の温度が多少変化していることで、水平方向にも広がった形でデータが範囲内から外れている。この解析手法は設定された範囲から外れる量が増えるほどプロットされたデータに対しての解釈が難しくなる。従って、短期間の測定結果の判定に向いており、生データと同時に確認することが必要である。

3.2 模擬試験

機器の状態監視を採用するにはその技術の有効性について検討する必要がある。本研究では主軸受LO出口の温度監視による軸受の損傷監視の有効性検証の為、各損傷モードについて検討を行った。図6に滑り軸受の摩耗形態を示す。軸受を設置した後、接触面の形状に合わせるなじみ運転を行う。この時期は通常運転時より多くの摩耗を伴いながら平滑化される。なじみ運転後の通常運転時には繰り返し荷重により少しずつ摩耗が進み、最終的に摩耗の成長、油膜切れ等により異常摩耗になり焼損/破損に至る。

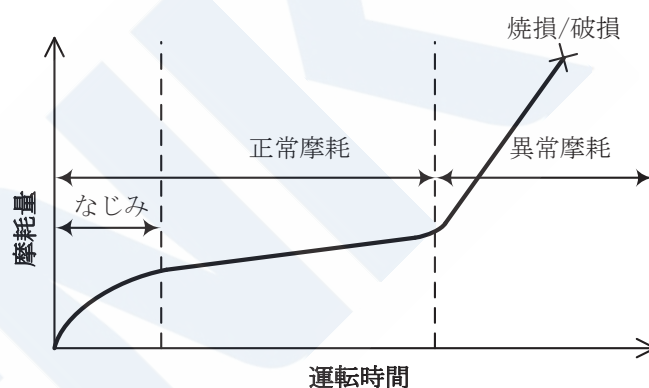


図6 滑り軸受の摩耗

また、上記の異常摩耗以外にも疲労破壊がある。この疲労破壊は主に全体的又は局所的な軸受の面圧が過大となったことや油膜厚さが過小となったこと等が考えられる。これらの異常摩耗と疲労破壊以外にも潤滑油性状不良による腐食とキャビテーションや電食のような浸食が考えられるが、軸受の損傷に占める割合が少ない為、本研究対象には含めていない。

実船状況を想定した異常時のデータを収集し、異常発生と計測値の関連性について調査する為、模擬試験を実施した。図7に焼き付きの確認試験の結果を示す(縦軸:温度 [°C], 横軸:時間 [日])。

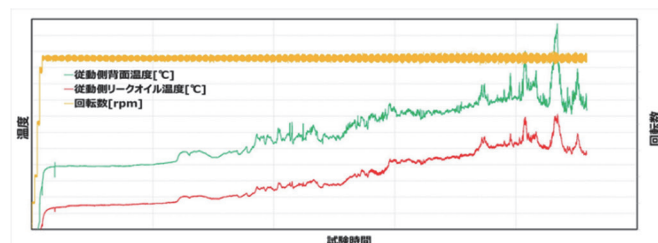


図7 焼き付きの確認試験

高負荷、高回転数によって損傷を意図的に与えやすい状況において、初期の損傷段階がLO出口温度の上昇から確認された。その後、軸受背面温度の上昇に伴いLO出口温度の上昇がほぼ同時に起き、焼

き付きを生じた後はより顕著に温度変化が生じた。
試験を終了させた後の軸受表面の状態を図8に示す。

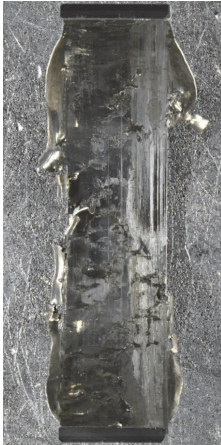


図8 模擬試験後の軸受メタル表面

同条件下において、初期の損傷を確認する為の試験が行われ、図9のように初期の温度上昇発生後に試験を停止させ確認したところ、図10に示すような損傷が確認された。

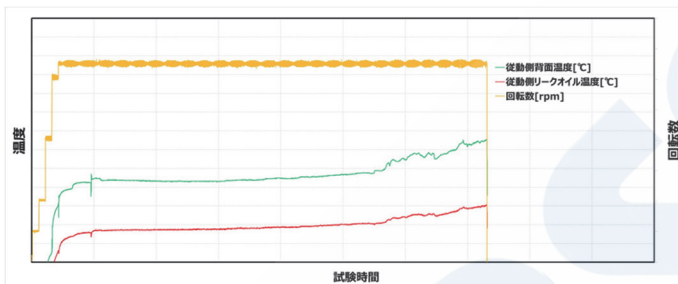


図9 焼き付き確認試験

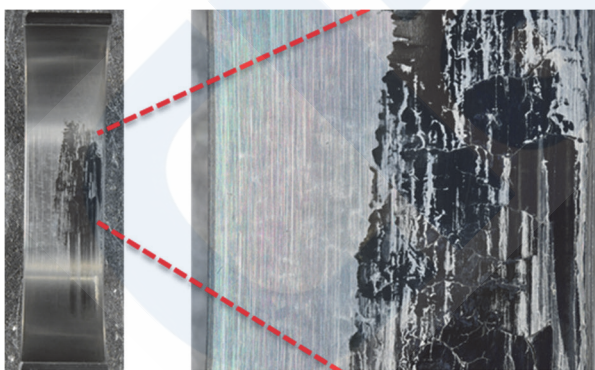


図10 焼き付き確認試験後の軸受メタル表面

以上の実験から、主軸受LO出口温度は軸受メタルの温度を反映しており、温度が次第に上昇していくこと、及びLO出口温度の監視によりメタルの損傷が確認できることが判明した。

4. まとめ

本研究では、CBMの効率的かつ信頼性のある新たな手法について業界に貢献することを目的として取り組んでいる。現状のCBMにおいては、診断技術が確立されていない部分が多く限定的であることから、機器部品毎のレベルでの状態診断の可否判断がより一層必要となってくる。また、状態異常監視による円滑な検査を進めていく為には、新たな検査技術の妥当性を検証する必要がある。ここでは、主軸受LO出口温度の監視によって、軸受メタルの損傷を把握する為の研究が行われ、実船試験から主軸受LO出口温度の監視は有効であり、適切なデータの解析によってより正確な異常判別が可能となった。また、模擬試験から主軸受LO出口温度の監視によって軸受の損傷を初期の異常状態から把握することが可能となった。

従って、主軸受LO出口温度の測定・監視・解析によって軸受の損傷監視ができることを確認した。

今後も新たなCBMに対して取り組みを進め、その進捗を開示し、海事産業全体に貢献していきたいと考えている。

参考文献

- 1) 日本海事協会：ClassNK技報（2020）
- 2) IACS.UR Z27 Condition Monitoring and Condition Based Maintenance, 2018.
- 3) 株式会社ジャパンエンジンコーポレーション “主機の状態監視と今後の展望について”（安全運航に向けたデータ活用とサイバーセキュリティを考えるセミナー，2020）
- 4) 日本海事協会鋼船規則 B編
- 5) 椎原，岡本，黒澤，滑り軸受け状態監視の計測・解析・診断技術—ディーゼル主機関主軸受の最適状態監視を目指して，日本マリンエンジニアリング学会誌，44-2(2009)
- 6) トライボロジー学会編 “トライボロジー故障例とその対策”，養賢堂，2003
- 7) 株式会社MTI 植松，”Condition Based Maintenance手法開発の取り組み～機関プラント状態の監視手法～”（Monohakobi Techno Forum 2021, https://www.monohakobi.com/ja/company/news/news_20211209/），2021