舶用機関管理における音響情報の利用*

- 音響情報活用の必要性

三 輪 誠**

1. はじめに

船舶の機関室の巡視において、機器の正常運転を管理する当直機関士は、機器に取りつけられた温度計や圧力計などの計測装置の指示値に注視するほか、機器内部から伝播してくる回転音や撓動音に耳を研ぎ澄ませ意識を集中させている。また定期的な解放整備では、解放部品の汚損状況や摩耗の程度から運転状態の良否を評価している。

船舶機関士はこのような日常の職務において、音響情報を次のように取り入れている。

当直中の巡視や出港準備における運転点検では、機器の運転状態を把握するために、直径 5mm 程度の長さ 1m 前後の金属棒を聴音棒として用いる。これは棒の下端を検査対象に接触させ、上端を点検者の頭骨と下顎骨の上部とが接近する付近に当て、下端より伝わる振動をそれらの骨で受けとめ、対象の状態良否を判断する点検手法である。電動機やポンプなど回転機械の軸受部分の点検では、触診により軸受発熱の有無を確認するほか、聴音棒の下端を軸受ケーシングへ当てて、軸受部の撓動状態を推察する。この聴音棒を用いた点検では、聴音棒下端が接触する場所によって伝搬する振動が微妙に異なることから、点検時は常に同一箇所へ聴音棒を当てて診断することが慣例となっている。

また解放整備では、ボルトナットによる締結部品の組み立て時にボルトナットの緩み有無を確認するため、打撃点検を行っている。これは、作業用に比較して小型の炭素鋼製ヘッドを木製の柄に取り付けた点検用ハンマーを用いて行うもので、点検対象と作業環境に応じて、ヘッド重量と柄長さを変えたものが用いられる。点検ハンマーにより対象物へ打撃を加え、発生した打撃音響とハンマーから手に伝わる振動により診断する点検手法である。打撃点検法はボルトナットの緩みを検出するだけでなく、部材内部の空洞や亀裂など外面には現れない内部欠陥を検出するのにも活用される。

2. 機器運転にともなう音

機器の運転には、構成部品の回転や撓動に伴い運転音が生じる。機器が発する運転音は、シーケンスやタイマーにより一時的に決められた動作を行う機器以外では、ディーゼル機関や電動機のように短時間の同じ動作を繰り返し行うことによる周期的な振動や音響が主である。発電機装置では、一定周波数の電力を供給

する必要性から、原動機となるディーゼル機関の回転速度は调速機により制御され、電力負荷の増減により変動する回転速度を設定値に維持するため、機関へ供給する燃料量を加減している。また推進機関となるディーゼル主機においても、海象による船体抵抗の増減や出入港時の機関使用による負荷変動に対し、設定した回転速度やトルク値を維持するように付属している调速機が燃料供給量を加減している。舶用ディーゼル機関ではこのような外乱に対する応答はあるものの、電動機やポンプと同様に短周期の回転や撓動に起因する振動が運転音を構成している。船舶機関士は負荷変動に対する一時的な応答も含め、正常作動時の機器の音響や振動を記憶し、それを巡視点検に活かしている。

2.1 機関故障による事故隻数 海上保安庁統計資料¹⁾によれば、平成 23 年の事故隻数は 2,533 隻であり、うち 348 隻は機関故障によると分類されている。平成 20 年から平成 23 年の事故種類別の事故隻数を図 1 に記す。図は海上保安庁統計資料の資料編のデータを基に作成した。各年において、衝突および乗揚げおよび転覆による事故隻数が全体の 5 割を占める。しかし、それらの内訳は各年において大きく変動することがあり、必ずしも一定しているわけではない。また浸水や火災、爆発などは年によって数値が大きく変動している。これらに比較して機関故障による事故隻数は、毎年、ほぼ一定の隻数で推移し、全体の 13~15%を占めている。

2.2 機関損傷事件の裁決録 海難事故は海難審判所で審判され、その裁決録は書籍として発行されるほか、海難審判所ホームページ²⁾や日本財団図書館ホームページ³⁾にて閲覧することができる。裁決録には、主文に続き理由として事実の経過、原因の考察、原因および受審人の行為が記される。海難審判所ホームページにて、平成 20 年から平成 23 年に言渡された機関損傷事件 78 件の原因の内訳を図 2 に示す。機関故障の事故原因を次の 10 項目に分類をした。

(1)整備時の点検不十分

機器解放時に十分に点検を行わなかったり、欠陥を検出できなかったりしたなどを示す。

(2)ボルト点検の不十分

部品を締結するボルトの緩みの確認を怠ったり、点検にて緩みを検出できなかったりしたなどを示す。

(3)作業時の不備

取扱説明書に記された作業手順を間違えたり、定められた方法とは異なる作業の仕方をしたりするなど、作業時の不備を示す。

*原稿受付 平成 24 年 12 月 19 日

**正会員 富山高等専門学校 (富山県射水市海老江練合 1-2)。

(1) 平成 20 年

(2) 平成 21 年

(3) 平成 22 年

(4) 平成 23 年

図1 平成20年から平成23年の事故隻数
(海上保安庁統計資料より作成)

(4) 運転状態の点検不十分

運転時に、機器の作動状態を確認しなかったり、点検により異常を検出できなかったりしたなどを示す。

(5) 異常時の点検不十分

排気に黒煙を生じたり、潤滑油の消費量が急増したり、などの異常状態が発生した際に、原因を探索することを怠った、異常時の点検不十分を示す。

(6) 運転管理の不十分

運転許容範囲を把握せず、長時間の過負荷運転を継続したり、排気の発煙や温度を計測したりするなどを怠る運転管理の不十分を示す。

(7) 始動準備の不十分

機関の始動準備が十分に行われていないため、損傷に至った事例を示す。

(8) 油性状管理の不十分

長期にわたり潤滑油性状を検査しなかったり、定期的な新替えをしなかったり、油性状管理の不十分を示す。

(9) 整備不十分

計画された整備を行わなかったり、整備することを失念していたり、整備が行われていない状態を示す。

(10) その他

機関で使用している部品の経年疲労や腐食など、原受審人の所為による原因ではないとされる事件を示す。

上述した10項目の事故原因は、さらに3つのグループに分けて見ることができる。まず機関停止時に行った整備作業において、各部の点検が不十分であった「(1)整備時の点検不十分」とボルトの締付けを完了できていない、またそれを確認できなかった「(2)ボルト点検の不十分」は、作業員の整備能力不足によるものとして1つ目のグループとする。次に運転中に計器類指示値や排気ガスの色合いから運転状態を確認するなど、十分に運転状態を把握しなかったり、運転中の異常状態に対して気がつかなかったりする「(4)運転状態の点検不十分」と「(5)異常時の点検不十分」は、機器運転時の異常状態の検出不良による事故として作業員の点検能力不足に起因する2つ目のグループとする。そして、「(8)油性状管理の不十分」や冷却水の水質検査を行わないなどの整備不十分から、運転中に潤滑不良や冷却不足を起こし、軸受に異常摩耗やライナに焼

付きを生じた。また機関始動の準備作業において、操作手順を誤り機器に損傷を与える「(7)始動準備の不十分」など、これらは作業員の日常の作業習熟不足が起因する3つ目のグループとする。機関損傷による事故の多くは、以上3つのグループに示される作業員の整備能力、点検能力、習熟程度の3要素に起因していると言える。

図2 機関損傷事件の原因 (平成20年-平成23年)
(海難審判所ホームページ²⁾、公開裁決録より作成)

2.3 機器から生じる異音 裁決事例78件のうち37件において、受審人は機関もしくは機器からの異音に気が付いている。軸受の異常摩耗や軸の偏心により、機器内部で回転部が周囲と接触する場合、回転速度に応じた周期的な擦れ音が発生する、また接続されていた部品が離脱した場合、部品は回転慣性により周辺構造物へ激突して、単発で大きな衝撃音を発生すると推察する。異音は、回転機械から生じる周期的な擦れ音から部品損傷時の衝撃音まで様々であり、損傷程度により音響の大きさも異なる。運転中に異音を生じた海難事例を以下に記す。

漁船第六十五漁進丸機関損傷事件⁴⁾ (平成20年1月18日言渡し)では、経験の浅い作業員が締付けた軸発電機の据付ボルトが運転中に緩み、主機関の運転を阻害した。主機関と軸発電機との軸心がずれた状態のまま運転が続けられた結果、軸受の焼付きを生じ、異音を発した。事件は経験の浅い作業員によるボルトの締付け不良と責任者による締付け確認を行わなかったことに起因している。

旅客船クイーンざまみ3機関損傷事件⁵⁾ (平成20年9月10日言渡し)では、機関直結の冷却海水ポンプの軸受が異常摩耗して、ポンプ軸心がずれて機器に損傷を来した。軸受の運転時間が短いことから異常摩耗を予見することは難しく、また聴音棒を用いてもポンプ軸受付近はポンプ駆動ギアのほかに複数のタイミングギアが音源として存在することから、当該軸受の異常を検出できないと判断され、受審人の所為は事故原因として追求はされていない。

漁船第十五福積丸機関損傷事件⁶⁾ (平成23年3月24日言渡し)では、主機関の调速機駆動軸の軸受の摩耗から異音を発した。異音に気付いた受審人は、小さな音であるために、そのまま運転を継続した。やがて駆動軸か歯車が損傷し、主機関は停止に至った。

旅客船クイーンざまみ3や漁船第十五福積丸のように運転中に機関から発生される異音に対しては、異常摩耗を生じている軸受以外にも、音響発生源が存在し、異音は識別が困難になったり、発生部位を正しく判断できなかったりすることが推察される。運転中の機器が発する異音の発生部位とその原因を診断することは極めて難しい。

また、漁船第六十五漁進丸の事故原因となったボルトの締付けは、機関停止中の整備作業にて行われる。一般にメーカーがトルク締めや角度締めなどのボルト締付け方法を指示し、作業者はこれに従う。締付け完了を確認したり緩みの有無を確認したりする際には、目視や打撃点検による検査を行う。過去に海難審判裁決録⁷⁾は、「ボルト緩みの有無を検出できても、締付け力の低下を検出することは難しい」とボルト締付け状態を正しく把握することの困難さを記している。

3. 音響情報の利用

これまでに運転中の機器監視への音響情報活用の研究は、木村ら⁸⁾が機関運転音をモニタリングし、機関放射音からニューラルネットワークを用いて異常音を検出する取り組みを行っている。実験においてディーゼル機関の排気集合管の接合ボルトを緩め、排気ガスを漏洩させディーゼル機関から異常音を発生させている。ニューラルネットワークに排気ガス漏洩の無い機関放射音を正常時の学習データとして入力認識させて、排気ガス漏洩の異常音を96%の認識率で検出することに成功している。

筆者は、これまでに打撃点検により発生する音響情報について、活用を検討してきた。本誌にて発表した音響情報を用いた機関保全に関する研究成果^{9), 10)}を以下に紹介する。

3.1 ボルト締付けトルクの推定 ボルトの打撃により生じる打撃音からボルト締付け力を推定する打撃点検は、習得に長時間の実務経験を要するといわれる高度な熟練技術である。団塊の世代が現場を去る、所謂、2007年問題により熟練技術者が現場を去ることで、これまでに確保されてきた保全技術が衰退する恐れがあった。

実際に4サイクル中速ディーゼル機関 (ヤンマーディーゼル(株)6N18AL-EV 660kW)に使用されていた連接棒とクランクピンボルトを用いて打撃実験を行った。クランクピンボルトは連接棒大端部を構成する斜め割れ軸受キャップを固定するためのボルトであり、メーカーによりボルトの締付け方法が指定される。使用したクランクピンボルトは角度締めによる締付け方法であったが、規定の締付け状態において計測したところ締付けトルクは650N・mであった。実験ではクランクピンボルト座面が連接棒大端部の表面に接した状態、いわゆる「肌付き状態」から締付け過多状態の750N・mまで締結力を変化させ、締結力の異なる28種類の打撃音響を発生させた。打撃には単発打撃を与える電子制御ハンマーを開発して用いた。クランクピンボルト (2面幅32mm)に打撃を加え、発生した打撃音響をマイクロフォンで収音して音響レコーダーに記録した。

記録したデータはパーソナルコンピュータへ取り込み、締付けトルクごとのデータファイルとして保存した。

(1) ボルト締付けトルク 200N・m

(2) ボルト締付けトルク 650N・m

図3 打撃音の時間経過による音圧レベル変化

3.1.1 打撃音の時間変化 クランクピンボルトを打撃したときの音を可視化したものを図3に示す。(1)～(2)はそれぞれ 200N・m, 650N・m の締付けトルクに対する打撃音の時間変化を表している。図の横軸は、打撃の瞬間を 0msec とした打撃からの経過時間を示し、縦軸はスペクトル周波数を示している。各周波数における音圧レベルをグレースケール濃度で表した。

図3において特徴的なことは、打撃直後の残響音に見ることができる。ボルト締付けトルク 200N・m では、2kHz, 11kHz 付近において明らかな残響音が確認できる。さらに締付けトルクを増した 650N・m では、それぞれ 2kHz では 190msec 以上、11kHz では 120msec 付近まで、打撃からの経過時間が倍以上になるまで残響音が観測された。

3.1.2 締付けトルクの推定重回帰式 打撃音からボルト締付けトルクを推定するために多変量解析の重回帰分析を導入する。マイクロフォンによってとらえられた打撃音はFFTにより 100Hz から 20kHz まで 100Hz ごとの定帯域分析を実施される。これにより 200 個の

スペクトルデータが得られた。この 200 データを重回帰分析の説明変数 ($V_1, V_2, \dots, V_{200}$) とし、偏回帰係数 ($C_1, C_2, \dots, C_{200}$) との積によりボルト締付けトルクの推定値(T)を求める重回帰式 (式(1)) が得られる。

$$T = V_1 \times C_1 + V_2 \times C_2 + \dots + V_{200} \times C_{200} \quad (1)$$

実際には、すべての変数を用いて重回帰式を構築せず、トルク推定に有益な変数をステップワイズ法により選択して使用した。周波数変数を選択することにより、処理時間は短縮される。打撃音は締結力が 0 N・m から 750 N・m までの 28 種類のもので収録したものを用いた。なお、各締結力において 6 ケースのデータを用意した。

図4 ボルト締付けトルクの推定結果

図4は、打撃後 18.75 msec におけるボルト締付けトルクを上述の方法で推定した結果を示したものである。実験した範囲では推定締結力のバラツキは大きいところでも $\pm 50 \text{ N}\cdot\text{m}$ 程度であり、実際の締付けトルクと推定値との重相関係数は 0.995 であった。

3.2 ボルト緩みの有無の検出 機関下部のクランク室内の点検を行う際、重回帰式を用いたボルトの締付けトルク推定法は、事前にボルト締付けトルクを段階的に変化させた打撃音響データベースの構築が必要である。クランク室内には、連接棒の締付けボルトの他に、主軸受の軸受カバーボルトやシリンダブロックからエンジンベッドまでを連結される支柱ボルト、その他、クランク室内の潤滑油配管の固定ボルトなど、様々なサイズで、かつ、締付け力の異なるボルトが複数存在する。それらに対して、打撃音響データベースを構築するには、膨大な時間と労力が必要である。そこで、締付けトルク推定重回帰式による精密な締付けトルクの推定を行う前の予備検査として、締付けボルトの緩みの有無のみを検出する簡易診断法を検討した。

3.2.1 打撃実験 図5に示すように 2 つの円筒鋼材をボルト(M24)で締付け、ボルト結合体モデルを作成した。ボルトねじ穴を設けた円筒鋼材 A ($\phi 100$) の長さを 80,100,150,200,300,400,500,600,700,800,900,

1000mm に変化させ、14 種類の結合体モデルを打撃実験に用いた。結合体モデルのボルトの締付けは、いわゆる「肌付き状態」から、ボルトの材料別強度区分による締付け推奨値を目安として最大 400N・m までの 9 種類(0,50,100,150,200,250,300,350,400N・m)の締付け状態とした。

図5 打撃実験用の円筒鋼材

3.2.2 マハラノビスの汎距離による判別 いくつかの点の中から任意の2つの点の距離を求める際、ユークリッド距離の値に全ての点のバラツキを考慮して算出したものをマハラノビスの距離という。式(2)にマハラノビスの汎距離の算出式を示す。

$$D^2 = (x_{i1} - \mu_1, x_{i2} - \mu_2, \dots, x_{ij} - \mu_j) \Sigma^{-1} \begin{pmatrix} x_{i1} - \mu_1 \\ x_{i2} - \mu_2 \\ \vdots \\ x_{ij} - \mu_j \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$\Sigma = \begin{bmatrix} S_{v_1 v_1} & S_{v_1 v_2} & \dots & S_{v_1 v_j} \\ S_{v_2 v_1} & S_{v_2 v_2} & \dots & S_{v_2 v_j} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{v_j v_1} & S_{v_j v_2} & \dots & S_{v_j v_j} \end{bmatrix}$$

x : 未知データ
 μ : 学習データの平均値
 v_j : 変量
 i : 未知データの数(通し番号)
 j : 変量の数(通し番号)
 $S_{v_1 v_2}$: 変量 v_1 と変量 v_2 の分散値

マハラノビスの汎距離が自由度を変量数としたカイ2乗分布に従うとして、「学習グループと未知のデータを同一グループと見なす(すなわち両者に差異が無い)」という帰無仮説を立てた場合、マハラノビスの汎距離が有意水準(5%)の確率密度以下であれば、仮説を棄却して「学習グループと未知のデータは同一グループでない(すなわち、両者には差がある)」と判別することができる。

締付けトルク 400N・m のボルトの打撃音響情報を学習データ群として学習グループを形成し、グループの重心と診断すべき試験ボルトの打撃音響データとの距離を算出した。マハラノビスの汎距離の算出において使用する変量は、打撃音をFFT解析して100Hz毎に音圧を分析して得た周波数変数による。診断は20個の学習データを用いて180ケースの試験データに対して行った。

3.2.3 判別結果 学習グループと試験データとのマハラノビスの汎距離を求めた結果を図6に示す。マハラノビスの汎距離を求める際には音響情報による周波数変数を使用する。図6は長さ80mmの鋼材Aを用いたボルト結合体について、周波数変数5個と7個の

計算結果を示している。周波数変数により、判別正答率は変化する。実験に使用した結合体モデルでは、周波数変数5個または6個である時に高い正答率が得られた。

(1) 5個の周波数変数による

(2) 7個の周波数変数による

図6 マハラノビスの汎距離と確率密度

図7 ステップワイズ法による選択変数を用いたマハラノビスの汎距離と確率密度

円筒鋼材の共振周波数は長さにより異なる¹¹⁾から、200個の周波数変数の中には、判別に有益な音響情報を含む周波数変数が存在する筈である。ステップワイズ法により変数を選択して計算を行った結果を図7に示す。図6(1)の判別正答率に比較して、高い正答率が

得られていることがわかる。

4. まとめ

船舶を安全に運航するには、機器の整備を確実に、十分な点検を実施することが肝要である。海難審判事例は、整備不足や整備点検の不十分が事故を誘引していることを記していた。特にボルト締付け状態の確認には、既存の打撃点検手法では熟練技術を要するなど点検精度に個人差を生じる。そのため、常に一定の点検精度で状態良否を判断できる手法が必要である。その1つとして、音響情報を活用した打撃点検手法は有効であると考え。また機器運転中は異常振動や異常音響の有無に注意し、機器の作動状態を的確に把握することが必要である。木村らが取り組んだように機器の発する異音など運転状態を表わすシグナルを遅滞なく受信できるシステムの構築により、点検者が高精度に判断して早期に対処することができるになれば、機関の損傷は軽度を抑えられ、海難に至る事故を減らすことができる。整備時のみならず、運転時における音響情報の利用も有益であると考え。

参考文献

- 1) 海上保安庁統計資料
<http://www.kaiho.mlit.go.jp/info/tokei/>
- 2) 海難審判所ホームページ
<http://www.mlit.go.jp/jmat/index.htm>
- 3) 日本財団図書館ホームページ
<http://nippon.zaidan.info/kainan/index.htm>
- 4) 漁船第六十五漁進丸機関損傷事件
http://www.mlit.go.jp/jmat/saiketsu/saiketsu_kako/20nen/koube/kb2001/19kb096.htm
- 5) 旅客船クイーンざまみ3機関損傷事件
http://www.mlit.go.jp/jmat/saiketsu/saiketsu_kako/20nen/naha/nh2009/20nh022.htm
- 6) 漁船第十五福積丸機関損傷事件
http://www.mlit.go.jp/jmat/saiketsu/saiketsu_kako/23nen/koube/kb2303/22kb048.html
- 7) 貨物船第八長福丸機関損傷事件
海難審判庁裁決録平成四年七・八・九月分,
p.1745-1747.
- 8) 木村ほか 1 名, 日本舶用機関学会誌, 32-3(1997)
p.206-214
- 9) 三輪ほか2 名, 日マリ学誌, 43-3(平 20-3), p.111-116
- 10) Miwa et. al., Proceedings of ISME KOBE 2011,
(2011), Paper No. D9-1
- 11) Harry F. Olson 著 西巻正郎 訳 音響工学 (上巻)
(1976) 近代科学社

著者紹介

三輪 誠

- ・ 1971 年生.
- ・ 所属. 富山高等専門学校
- ・ 最終学歴.
東京商船大学商船学部商船システム工学課程機関学コース
- ・ 専門分野. 機関管理