小型ディーゼル機関の運転騒音下における 異常音の発生位置探査に関する研究*

木 村 隆 一** 齊 藤 哲***

Study on Detection of Abnormal Noise Source under Running Condition of Small Sized Diesel Engine

By Ryuichi Kimura, Tetsu Saito

If abnormalities of the marine engine are recognized in the early stage, the engine trouble and accident can be avoided. This paper describes the method of searching the position where the abnormality occurred on the engine by using the generating sound.

A small-sized diesel engine was used as a test engine, and the experiment was made by generating the sounds which were regarded as an abnormal sound near the test engine under operation. The abnormal sound which had a sine-wave characteristic was generated with a loud speaker.

The frequency of the abnormal sound was detected by using Maharanobis' generalized distance, and the abnormal position was searched by means of the frequency data. As a result, it was possible to search exactly the abnormal position by using the above method.

1. はじめに

船舶の安全航行にとって機器の高信頼性は非常に重要であるが、それとともに船舶の保安全管理に対しても効果的なメンテナンスが求められる。また、船舶が定常的なメンテナンスを受けていたとしても予想外の不具合や故障が発生し、機関や計器等の突発的な異常から衝突や座礁、爆発等の事故に至ることもしばしばある。それ故、機器の故障、事故回避という観点から予防保全について考えるとき、異常の初期兆候の時点でそれを把握しておくことは非常に重要なことと考える。

機関監視要員は運行業務の中で異常音による機器の異常を捉えて事故防止に対応したことも多い。

しかし、異常音の監視ということ考えた場合、機関監視要員では常時監視が不可能であるとともに、狭い場所での聞き取りはスペースの面から難しく、駆動部分には危険防止の面から接近できない場所もある。従って、このようなことに対応するには無人化された異常認識装置が必要と考え、種々の方面からその可能性について調べてきた¹⁾。本論文では異常認識装置の実用化を図るため、運転騒音下における異常音検出という観点から検討を加えた。さらに、異常音の検出に止まらず、その異常音がどこから放射されてくるかについて探査することで診断システムの有効性を高めることにした。本システムにより実際に異常音源を知ることができれば、機関監視要員は素早くその原因を突きとめ、それに対処することが可能になり、機器の故障をより早く認識し、事故を回避できるようになる。ここでは、実験に際し小型船用ディーゼル機関を供試機関として用い、その運転騒音

*原稿受付 平成15年1月22日

**正会員 神戸商船大学(神戸市灘区深江南町5-1-1)

***学生会員 神戸商船大学(院)

図1 実験装置

下で異常音を発生させ、運転騒音と異常音を分離識別し、その異常音の発生に関する情報を分析することにより異常音放射位置の検出を行ったので報告する。

2. 実験

本実験ではシリンダ数3、出力18kW、シリンダ径76mm、ストローク73mmの小型4サイクルディーゼル機関を供試機関として用いた。なお、供試機関の正面図と側面図を図1 (a) 及び (b) に示した。

音の採取に際しては図2に示すデータ収集装置を使用した。これは3軸から構成される直交座標型ロボットで実験室外から遠隔操作が可能になっている。これにより機関放射音を自動的に多点収集できると共に高い位置精度が得られ計測データの信頼性を高めることができる。本ロボットの可動領域はX軸方向に1300mm、Y軸方向に500mm、Z軸

図2 データ収集装置

方向に500mmで、マイクロホンはZ軸先端に装着してデータを採取する。また、供試機関は吸音設備の施した実験室に設置して反射音に対する配慮をした。

3. 異常音探査法

運転中の機関において、故障などの異常が発生したとき、通常データチェック箇所であれば機関モニタリングシステムにより検出可能であるが、故障に至るまでの初期段階やそれが軽微な内はそのシステムでは検出できない場合もある。機関監視要員の点検巡回でそれらを補うことはできるが、常時監視は困難である上に、個人の技量にも左右される。そこでこれに代わるシステムの導入を検討するとき、機関放射音の中に異常音が発生しているかどうかを常時チェックしながら、その発生を認めたとき、その放射されている場所を探査できるように考えておく必要がある。これがシステム化されればその探査結果を機関監視要員に報知し、より早く異常事態に対応できる。しかし、機関室のように非常に高いレベルの暗騒音が存在する場所では、検出した異常音の周波数にターゲットを絞らなければ正確な位置探査が難しい。そこで、本研究では以下に示す処理により異常音を検出し、周波数の特定を行ったのち異常音放射場所の探査を行うことにした。

3.1 異常音検出法 図3は供試機関の放射音を3次元図に表したものである。放射音の採取は図

図3 正常時の機関運転音

図4 異常音発生時の機関運転音
(異常音：基準音圧70dB [1m])

1の実験装置図で示すようにシリンダ中央部より600mmの位置にマイクロホンを設置して実施した。本研究ではこの位置を基準に実験を行ったのでこれを基準位置と称する。図3の縦軸は周波数(10kHzレンジ)、横軸はクランク角度(1サイクル：720°)、音圧は濃淡表現とし、濃淡スケールに示すように濃いパターンほど高い音圧であることを表している。また、図の上部には供試機関のバルブタイミングを記している。この図は回転数850rpmで運転したときの正常運転時の放射音であるが、縦に3本の濃いパターンが観察される。これはバルブタイミング図から判断してNo.2, No.3, No.1シリンダの燃焼時に発生した放射音である。次に、機関が異常音を発生している状況はこの運転下で異常音をスピーカから発生させて作り出した。スピーカの設置場所は図1の実験装置図の中に記載した位置としているが、このときのマイクロホンとスピーカの距離は300mmである。

機関放射音から異常音を検出する手法は音を周波数分析した後、多変量解析を用いて行った。分析に当たり、異常検出の対象とする音は10kHzまでのデータとした。従って、データ収録のサンプリング周波数は1信号当たり25.6kHzとし、音波形と機関回転パルス(発生位置はNo.1シリンダ燃焼時のT.D.C.)の2信号を同時記録した。この記録された音から、機関1サイクル(720°)を60分割したクランク角度ごとに取り出してそれぞれの分割データごとに周波数分析した。スペクトルデータ

は200データに設定したため1サイクルは12000データ(60分割×200)で構成される。異常音の周波数を特定するには多変量解析の手法を取り入れたが、ここでは200のスペクトルデータを10データごとにユニット化して分析を行い、1つのユニットごとに判定する。従ってスペクトルデータは20分割されて20ユニットになる。以下、この1ユニットをここではセクションと呼び、本論文では1サイクルを1200セクションで構成することになる。セクションごとに正常であるか異常であるかは、正常時の100サイクル分で構成される正常データを用いて正常パターンを作成しておき、サンプルとなるデータが正常パターンからどの程度離れているかをマハラノビスの汎距離³⁾で評価した。マハラノビスの汎距離は次式から計算される値であるが、この値があらかじめ定められた数値より大きいとき異常の範疇に属すると判定する。また、この値の大小は正常と異常の違いを数値化するものとして取り扱うことができる。

$$D_{ij}^2 = (x_{ij} - \mu_{ij})^T \Sigma_{ij}^{-1} (x_{ij} - \mu_{ij}) \dots\dots\dots (1)$$

サンプルデータ： $x_{ij} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$

正常セクションの重心： $\mu_{ij} = (\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n)$ 群内分散・共分散行列： Σ

図4は機関運転中に異常音を発生させた時の3次元図である。この異常音は3.5kHzの正弦波を本実験で基準とした音圧(1m離れた場所で70dB：以

図5 異常判定結果 (3サイクル)

(異常音：基準音圧70dB [1m])

図6 測定平面と音源平面

後、基準音圧と記す)でスピーカから連続発生させたものである。なお、この基準音圧とは機関の運転騒音下でも人が異常音の存在を認識できる程度の音圧である。異常音が存在する図4の放射音を(1)式に従って計算し、その結果(マハラノビスの汎距離)を図5に示した。図5は(1)式の D^2 値を濃淡でグラフィック化したもので、図の横軸はクランク角度を表し、機関3サイクル分を図示している。縦軸はセクション番号で1が50Hzから500Hz、2が550Hzから1000Hz、…、20が9550Hzから10000Hzに対応する。算出されたマハラノビスの汎距離は右端に示すスケールに従って表記されており、濃いパターンで示されるセクションほど正常域から離れていることになる。つまり、図5では図4における異常音が数値として算出され、放射音の中から異常の存在を報知している。

3.2 異常音源位置検出 音源位置検出には4本のマイクロホンで構成される3次元マイクロホン

プローブを用いて計測し、X、Y、Z方向のインテンシティデータを基に音源の方向と強さが計算される。計測に当たっては図6に示される計測平面を空間上に設定(X方向8点、Y方向6点の計48点、測定点間隔100mm)して、その格子点において放射音を採取する。そして、音源位置を表示する平面(音源平面)に計測平面上での各格子点ごとに算出された音源位置が表示される。なお、音源平面は仮想平面でサイズは計測平面と同じになっている。従って、算出された音源の位置は測定平面の格子点の数だけ存在するので、それらの音源位置の座標値をプログラム上に取り込み、平均値を算出して発生位置の座標値を求めた。

4 異常音源探査結果

4.1 基準音圧による探査結果 基準音圧(距離1mで70dB)の異常音(図4参照)を発生させたとき、図5のごとく異常音の存在が検出されたが、異常音が発生している場所(空間)を探査するには前述したように異常音の周波数帯を特定しなければならない。図5ではセクション番号7と8で濃いパターンが全クランク角度において目視観測されるが、この異常パターンの出現をプログラム中で取り扱うにはこれを数値化する必要がある。そこで、各セクション番号ごとに3サイクル分の汎距離(D^2 値)を加算し、1サイクルあたりに平均化したものを図7に示した。この図ではセクション番号7でピーク値の2510となっていることから、このセクションに対応する3050Hz～3500Hzの周波数帯域に異常音の多くが観測されると判定し、これを異常音の周波数帯とする。

図7 各セクションの汎距離
(異常音：基準音圧70dB [1m])

機関運転中の騒音下で異常音の周波数を特定することができたので、その周波数の音を対象として図6に示すロボットにより異常音を探索させた。音源位置の探索結果は座標値で表わすと共に、その位置へロボットのZ軸先端を移動して人間に異常音源位置を教示するようにした。図8はその探索結果で、図の中央がスピーカの中心位置を表し、数値はその中心から探索位置までのずれ量をmmで表示した。なお、運転騒音が探索結果に影響を与えるかどうかを検証するために、異常音だけをスピーカから発生させた場合と、機関を運転してその騒音下で異常音を発生させた場合の二通りの実験を行った。○印が異常音だけを発生させた時の探索結果、●印が運転騒音下で基準音圧（1m地点で70dB、3.5kHz）の異常音を発生させたときの探索結果であるが、どちらの場合も位置誤差が5mm以下の値を示しており、この実験条件では運転騒音の有無が探索結果に強い影響を与えない。つまり、異常音の周波数特定をしたことにより同じ周波数帯の範囲内では異常音の方が運転音より大きくなりこのような結果を得たものと考えられる。なお、音源探査時のマイクロホン位置は図1で示した機関中央から600mmの基準位置とした。

図8 異常音源位置の探索結果（運転騒音の影響）

図9 異常音発生時の機関運転音
(異常音：基準音圧-6dB, 64dB [1m])

4.2 音圧変化による探索結果 図8の結果が示すように上述の実験条件では精度よく探索できたが、これは特定した周波数帯域における異常音の音圧が高いことに起因していた。そこで、異常音の音圧を下げた場合、探索結果がどのようなかを以下で検討する。この実験は異常音を基準音圧（1m位置で70dB）より6dBづつ減少させ、-6dB（1m位置で64dB）、-12dB（1m位置で58dB）、-18dB（1m位置で52dB）、-24dB（1m位置で46dB）の4通りについて実施した。図9、図10

は基準音圧より6dB、18dB減じた異常音を発生させたときの3次元図である。異常音の存在する3.5kHzの周波数帯域に着目してみれば、図9では異常音が識別できるが、18dB減少した図10ではわずかに異常音の存在がうかがえるものの、ほとんど機関騒音と判別できなくなっている。そして、ここでは図示していないが24dB減じた場合、3次元図上では全く異常音を識別できない。このように異常音の音圧が下がるにつれ、運転騒音の中に異常音がマスキングされていき、運転騒音から異

図10 異常音発生時の機関運転音
(異常音：基準音圧－18dB, 52dB [1m])

常音の検出が難しくなる。なお、人による聴取実験では、異常音の発生を知らされていても図10の18dB減じた場合、判別が難しい状況であった。これは前節でも述べたように人の聴取できる音圧を基準音圧に選んでいるため、その音圧より減じるにしたがい聴取困難になっていくためである。

次に、それぞれの音圧に対して3.1節で述べた多変量解析の手法により異常音検出を行い、汎距離(D^2 値)で異常音の周波数を調べた結果を図11に示した。発生した異常音が3.5kHzであるため第7

セクションの D^2 値に異常音の存在が反映されることを考えると、図11 (a) の「基準音圧－6dB」実験では確実に異常音を捉えていることが分かる。また、図11 (b) の「基準音圧－12dB」実験でも第7セクションが他のセクションの値よりは大きく異常音を検出できている。しかし、「基準音圧－18dB」実験の図11 (c) になると D^2 値がわずかに他のセクションより大きい程度で確実に異常音の周波数を捉えているとは言い難い。さらに「基準音圧－24dB」実験の図11 (d) では、第7セクションよりも他のセクションの方が高くなり、誤診断につながる結果となった。

以上のように図11 (a)、図11 (b)、図11 (c) では第7セクションで異常が認められるが、図11 (d) の場合は第2セクションの D^2 値が最大値を示し、第7セクションで異常検出できなかった。しかし、ここではそのような低い音圧の異常音を探索させた場合どのような結果になるかを調べるために、図11 (d) の場合も第7セクションに異常音が存在したとして処理を続行した。図12は基準音圧と基準音圧より6dB, 12dB, 18dB, 24dB減じた5種類の異常音に対して、異常音発生場所の探査を行った結果である。横軸は5種類の音圧減少量とし、縦軸は異常音源位置(実際)と探知音源位置(計算)の誤差距離とした。この結果では明らかに異常音

(a) 基準音圧－6dB, 64dB (1m)

(b) 基準音圧－12dB, 58dB (1m)

(c) 基準音圧－18dB, 52dB (1m)

(d) 基準音圧－24dB, 46dB (1m)

図11 異常音の音圧と各セクションの汎距離

図12 異常音の音圧と探査誤差距離
(Mic.-Sp.距離: 300mm)

図14 異常音の音圧と探査誤差距離
(Mic.-Sp.距離: 70mm)

図13 異常音の音圧と探査誤差距離
(Mic.-Sp.距離: 150mm)

図15 断続異常音の音圧と探査誤差距離
(Mic.-Sp.距離: 70mm)

の音圧と誤差距離には強い相関が見られるので、位置探査には異常音の音圧を大きく捉えることのできる場所と方法を考えるべきである。

4.3 2段階探査 異常音を大きく捉えるために、本研究では2段階探査を試みた。これは異常音源の発生場所を一度探査した後、その探査場所を中心にXY平面(図2参照)の探査エリアを狭くし、さらにZ軸も動かして音源位置に接近させ、再度探査させる手法である。この手法では運転騒音に較べて異常音の音圧レベルを相対的に大きく収録することができ、より異常音源位置の精度を高めることが可能になる。このことを実証するため、マイクロホンと異常音源(スピーカ)の距離を変えて実験を行った。図12はマイクロホンとスピーカ間距離が300mm(図1参照)であったが、図13はその距離を150mm、図14はその距離を70mmに

接近させて探査を行ったときの探査結果である。ここで両図とも横軸の表示は図12と同じであるが、実際は距離が1/2、約1/4になっているので受音点での音圧はそれぞれ増加する。しかし、ここではスピーカの発しているパワーレベルは同じであることから同じ表示法にしている。

図12、図13、図14からマイクロホンとスピーカ間距離(Mic-Sp距離)が近づけば距離誤差が次第に小さくなることが分かる。例えば、Mic-Sp距離300mmの場合、減少量18dBの異常音では距離誤差75mmであったものがMic-Sp距離150mmに近づけば46mmの距離誤差になっている。さらに近づいてMic-Sp距離70mmでは33mmの距離誤差になっている。従って、2段階探査法によりMic-Sp距離を小さくして探査すれば距離誤差を減少することができ、システムの精度を高めるには有効な手段と考える。

4.4 断続音による探査結果 機関の異常には異常音が連続して発生し続ける場合もあれば、断続的にしか発生しない場合もある。そこで、断続して発生する異常音（断続異常音）の位置探査について検討した。ここで用いた断続異常音は3.5kHzの音を100msec発生して100msec停止するパターンを繰り返す音とした。

図15は断続異常音による探査誤差であるが、この場合Mic-Sp距離が70mmであることから、連続異常音の場合の図14と比べると断続異常音の結果がよく分かる。この両図では距離誤差にわずかの差しか認められないので、断続異常音を用いた場合でも十分に異常音源位置探査が可能であると分かった。

5. むすび

本研究では機関故障を機関放射音から診断し、異常音の発生場所をその音により探査した。実験は機関の運転中に異常音をスピーカから発生させて実施した結果、異常音の音圧が大きければ、機関の運転騒音の中からでも10mm以内の誤差で異常音源の位置を探し出せることができた。さらに異常音の音圧を変化して実験した結果、明らかに異常音の音圧と誤差距離には強い相関が見られることから、異常音は可能な限り大きく捉えることの

できる手法を取り入れなければならない。そこで、本研究ではマイクロホンとスピーカ間距離（Mic-Sp距離）を近づけて距離誤差が次第に小さくなることを実証し、そのことを取り入れた2段階探査法で実験した。これにより音圧の低い異常音にも対処でき、異常音源位置を精度よく求めることができた。また、断続異常音を用いた場合でも十分に異常音源位置探査が可能であると分かった。ただし、今回の実験では機関回転数一定の条件下で行ったが、回転数などが変化した状況でも異常音探査ができるようにする必要がある。また、異常音源には正弦波を用いたがその周波数の問題や断続音の波形などの条件を変化させるとともに、探査可能な異常音の種類や複数異常音などについても今後検討していく必要がある。

参考文献

- 1) 木村隆一、中井 昇、杉原明伸「シリンダ壁の多点振動計測によるディーゼル機関の診断法」日本マリンエンジニアリング学会誌第37巻第3号平成14年3月
- 2) 木村隆一「音響信号によるディーゼル機関の異常診断システムについて」日本船舶機関士協会誌No.601, 1997.1月
- 3) 奥野忠一、久米 均、芳賀敏郎、吉澤 正、「多変量解析法」、1980、日科技連