機関騒音下の聴取能力と聴覚支援システムの開発*

木村 隆一** 川上 夏葉***

Listening Ability for Abnormal Noise during Engine Running, and Development of Hearing Support System

by Ryuichi Kimura Natsuha Kawakami

For the purposes of engine maintenance, it is very important for engineers to collect acoustic information on abnormalities from the equipment running noise. However, in the engine room of a ship it is difficult to collect the acoustic information as the noise levels can be as high as 100 dB. In this study, the authors investigated the ability to listen to a specific sound against a disturbingly loud background noise. We found that combustion noise disturbed the detection of other sounds (non-combustion noise). Consequently, we recorded shell noise by microphone, and transformed the sound to electronic data. We then instantaneously attenuated the combustion noise in the sound data and played it from a speaker. This method enabled reduction of listening disturbance (masking phenomenon) due to combustion noise. A hearing support system incorporating an algorithm for the above data processing was accordingly constructed to help distinguish acoustic information from background engine room noise.

1. はじめに

船舶の機関室では主機関をはじめ発電機、補機類など多くの機器が運転されており、その環境は高温多湿でしかも振動と騒音を伴ったものである。このように厳しい環境下で機関要員は保全業務を行なわねばならない。機器類は搭載されている監視システムによって常にその運転状況をチェックされているが、現場での機関要員による運転状況の把握や点検も保全業務にとって重要な作業で、これによって機器異常の早期段階での発見やセンサの取り付けしていない場所での不具合の発見など監視システムで想定外の異常が見つけれ出されることが多い。特に、機関要員が点検業務で最初に気づくのは、視覚・聴覚・嗅覚によるものが多く、これらの感覚器官ではより広い範囲の状況をつかむことができる。この中で音響による保全情報の検出については種々検討^{1), 2), 3)}されているが、人の聴覚で検出しようとした場合、機関室内での収集は条件が悪く機器の発する異常音の聴取が非常に難しい。これは大きな機関室騒音によって

小さな音の聴取が妨害されるからである。本研究ではこのような暗騒音の状況下で聞き取れない音は何か、聞き取れる音は何かについて調べるとともに、異常音を聴取しやすくする聴覚支援システムについて検討する。

2. ディーゼル機関の放射音

本研究では4サイクル小型ディーゼル機関を用いて聴取実験を行った。供試機関の主要目はシリンダ数3、出力18kW、Bore×Stroke (76×73)となっている。この機関を内壁に吸音材(吸音率は0.2(125Hz)、0.6(250Hz)、0.97(500Hz)、0.9(1kHz)、0.76(2kHz)、0.83(4kHz))

図1 実験装置

* 原稿受付 平成 17 年 9 月 20 日

** 正会員 神戸大学海事科学部
(神戸市東灘区深江南町 5-1-1)

*** 神戸大学大学院生

を装備した実験室内(3.8 × 2.8 × 2.5m)において運転した。図1は上部から見たときの実験の様子を表したもので、機関放射音は図に示すように機関中央から100 mmの距離に設置したマイクロホンによって收音した。

收音された機関放射音は録音機に記録した後、16bit-AD変換器によりデジタル化して計算機で周波数分析などのデータ処理を行った。図2は機関回転数830rpmで運転したときの放射音であるが、機関のクランク角度(1サイクル: 720°)を横軸、周波数を縦軸、音圧を濃淡パターンとして表現している。図において特徴的な縦方向の濃い3本の線パターンは左から第1シリンダ、第2シリンダ、第3シリンダの燃焼によるもので、低周波数域から高周波数域にかけて高い音圧パターンになっている。この内、図中のa点を代表的な燃焼音として取り扱うことにし、この音を強放射音と呼ぶ。一方、非燃焼時の音をb点を選び、これを弱放射音と呼ぶことにするが、これは燃焼時に比べると全周波数帯に渡って低い音圧パターンを示している。

図2 機関放射音(3次元図)

図2では音圧を濃淡図で書き表したため、a点、b点の各周波数における音圧レベルは分かり難い。そこで、図3ではそれらの音を周波数と音圧レベルの関係に書き換えた。この図において、1kHzまでの低い周波数帯では強放射

音と弱放射音の間に明確な差は見られない。しかし、6kHz以上の高い周波数帯では両者の音圧差が明確になり、20dB以上の差が存在することから、機関放射音の高周波成分は燃焼時の音に支配されている。

図3 燃焼時と非燃焼時放射音の周波数分析

音をグラフ化した図2、図3は機関放射音の特徴を視覚的に捉えることができるが、この音を人が聴取するとどのようなかについて考える。機関回転数が830rpmであることから1サイクルは145msecと計算される。この間に3回の燃焼を伴うことから1秒間に約21回のリズムミカルな音、いわゆるピッチ音として聴取できる。しかし、3次元表示した図2では細かな音の変化を視覚的に捉えることができるが、耳による聴取では細かな音情報を得ることは難しい。これは燃焼時の音圧が大きいため、その他の小さい音圧の音を聴取し難くなることに起因する。次章では騒音下で聴取力が低下することに関して検討を加えた。

3. 騒音下における聴取能力 (妨害音と最小可聴値)

大きな騒音下では聴取したい音や音声を聞き取れないことをしばしば経験するが、これはその騒音が目的とする音の聴取を妨害するためである。特に船舶の機関室は狭い場所に多くの機器が納められ、大騒音が存在している状況にある。ちなみに神戸大学練習船深江丸の機関室内での騒音は90dBA程あり、この環境下では会話しても聴取できないレベルである。そこでこのような音響的に厳しい場所で人が音をどの程度、聴取できるかについて調べるため、純音の妨害音が存在する中で聴取実験を行った。妨害音の周波数は500Hzから1kHz、2kHz、4kHz、8kHzと2倍の周波数ごとに設定した。さらに、

低周波の妨害音として 100Hz の場合も加えた。また、妨害音の音圧は音響スピーカから 1m の地点で 60dB、70dB、80dB、90dB になるように設定した。具体的には妨害音が存在する環境下で純音の目的音を音響スピーカから発生させ、被験者に目的音が聴取できたかどうかを答えさせる手法で行った。被験者は 20 歳前後の男性 10 名程度で行ない、データ整理に際してはそれらの平均値を使用した。ここで年齢と性別を限定したのはそれらによる聴取力の影響を少なくするためである。

人は周波数によって聴取可能な音圧レベルが異なっている⁴⁾。図 4 は妨害音が存在する時としない時の聴取能力を調べたものである。

妨害音の存在しない場合の聴取力は、図中の破線で示す「妨害音なし」の線図で表した。これは妨害音の無い状態で目的音の周波数を変えながら聴取実験を行った結果であり、人の最小可聴値を示す。この図は 400Hz では 4 dB の音が認識できたのに対し 100Hz では 25dB、50Hz では 45dB の音圧レベルと低い周波数になるほど最小可聴値が大きくなることを示している。

図 4 100Hz 妨害音発生時の最小可聴値

次に、妨害音が存在するときの最小可聴値について検討する。妨害音は人の聴取力を甚だしく低下させるが、これは聴取したい音(目的音)とそれを妨害する音(妨害音)が同時に存在するときに起こる現象で、耳の構造⁵⁾に由来しているため避けることができない。図 4 は 100Hz の音が妨害音として存在する状況下で種々の周波数の目的音を被験者に聴取させて得られた最

小可聴値である。なお、図は 4 本の実線が記されているがこれは妨害音の音圧レベルが 60、70、80、90dB の場合についての結果である。この図から明らかなように妨害音が 100Hz、90dB の時、3kHz より低い周波数では非常に大きなマスキング効果を示し、妨害音なしと較べると最小可聴値が 40dB 以上増加することが分かる。

次に妨害音が 100Hz から 500Hz に変化した場合の最小可聴値を図 5 に示した。妨害音の音圧が 90dB の場合を見てみると、妨害音より低い側の音に対しては最小可聴値が妨害音なしのそれに接近しており、人の聴覚は比較的妨害音の存在に左右されにくいことが分かる。一方、妨害音より高い周波数側では最小可聴値の音圧レベルが高く、妨害音の影響をかなり受けることになる。例えば、0.8kHz の音は最小可聴値が 47dB であるため、これより小さい音圧レベルの音は認識できず、かなりの範囲の音がマスキングされている。

図 5 500Hz 妨害音発生時の最小可聴

図 6～図 9 には 1 kHz、2 kHz、4 kHz、8 kHz の妨害音が存在したときの聴取実験の結果を示した。どの場合も妨害音の周波数を境に低域側と高域側のマスキングに対する性質は基本的に図 5 (500Hz の妨害音)と同じ傾向を示している。ただ、妨害音の周波数が高くなるにつれ、妨害音より低域側ではマスキングの影響を受けにくい範囲が拡大していき、図 9 の妨害音 8 kHz では低域側でほとんど妨害音の影響を受けていないことが分かる。一方、妨害音より高域

側では常に妨害音の影響をうけて聞き取りにくい音が存在する。ただし、高域側でも妨害音の周波数と目的音の周波数が大きく離れたところでは影響を受けにくくなる。例えば、妨害音が 100Hz の場合では、高域側の 3.15kHz 付近では最小可聴値が 5dB 程度と妨害音の影響をほとんど受けていない。従って、この周波数付近の音は認識しやすいことが分かる。

図 6 1kHz 妨害音発生時の最小可聴値

は、1.6kHz 付近では 4 dB と極端に低くなり妨害音なしの最小可聴値に近づき、さらにそれより高い周波数域では妨害音なしと同じ最小可聴値になっている。つまり、60dB 程度の妨害音では妨害音のごく近くの周波数帯においてのみマスキング効果を示すことが分かる。

なお、妨害音のごく近くの周波数で目的音を発生させた場合、この 2 つの音はうなりとなっ

図 8 4kHz 妨害音発生時の最小可聴値

図 7 2kHz 妨害音発生時の最小可聴値

図 9 8kHz 妨害音発生時の最小可聴値

次に妨害音の音圧を下げた時の最小可聴値に対する影響について検討する。図 4～図 9 には 90dB のほかに 80、70、60dB と 10dB ごとに減少させた結果を示している。図 5 の妨害音 500Hz の場合で検討すると妨害音の音圧が変化しても低周波数域側では極端にマスキング効果は変わらない。しかし、高周波数域側では妨害音の音圧によってマスキング効果にはかなりの差が見られる。特に、60dB の妨害音のもとで

て現れ、2 つの音を別々に識別して聴取できないため目的音の最小可聴値を知ることはできない。

4. 機関騒音下における聴取

機関放射音は常に強弱を繰り返していることを第 2 章の図 2 で示した。機関騒音下の聴取能

力について調べるため、強放射音(図2のa点)と弱放射音(図2のb点)を妨害音として、それぞれの騒音下で純音の目的音を被験者に聴取させた。なお、このときの実験手法などは3.1節で示したものに従う。

図10には強放射音と弱放射音に対する最小可聴値を示した。このとき用いた妨害音は機関放射音の中に存在する強放射音と弱放射音のスペクトルデータを基にして白色雑音とイコライザから作成した。この音を音響増幅器と音響スピーカで連続音として再生させて聴取実験を行った。結果では強放射音と弱放射音を比較すると全ての周波数帯域で強放射音の最小可聴値は弱放射音のそれを上回っており、明確な差が認められた。特に3kHz以上の周波数帯では強放射音の最小可聴値60dB付近であるのに対し、

弱放射音のそれは25dB～30dB程度で、それぞれの条件下では認識できる音に大きな隔たりがある。

図10で用いた音は機関放射音から瞬間的な強放射音と弱放射音を抽出して、そこから作り出した連続音なので実際には存在しない音である。次に実際の放射音で実験すると瞬間的に変化している音に対して、人はどのような反応をするかについて調べた。図11にはその結果と比較のため強放射音と弱放射音に対する最小可聴値も併せて記している。実際の機関放射音に対する最小可聴値は結果的に強放射音と弱放射音の間に位置するようになったが、300Hzから3kHz付近では強放射音に近いものになっている。従って、機関放射音の中から強放射音だけを瞬間的に減音すれば実際に聴取する機関騒音の最小可聴値を低減できると考える。

5. 音響情報聴取システム

5.1 音響情報の聴取

機関騒音の中から異常音のような音響情報を聴取するとき、機関騒音に妨害されて音響情報が聴取し難くなったり、全くできなかつたりする。この点については上述したマスキング現象で説明できるが、人の聴覚機構によるため音響情報の低下は避けることができない。しかし、マスキング現象を起こしにくい方策を信号処理によって実現すればそれを改善することができる。このような観点からマスキング現象を低減させ、放射音から機関の音響情報を聴取する手法について以下で検討する。

5.2 低周波域減衰による聴取改善

100Hzの妨害音が存在するときの最小可聴値は図4に示しているが、妨害音が90dBのとき200Hzでは最小可聴値が62dBになる。さらに800Hzで38dB、1.6kHzでも23dBの値を示し、かなりの周波数帯域に渡りマスキングしている。しかし、100Hzの妨害音を90dBから60dBに減音すれば図4に示すように300Hz以上の周波数帯では「妨害音なし」の最小可聴値に近づき高周波域の音に対するマスキング現象を低減できる。ただし、これは低周波域の成分を低減させて高周波域の情報を聴取し易くするため、当然低周波の情報は失われる。従って、100Hz前後の音響情報を聴取するときはこの処理を回避させる必要がある。

図10 強放射音と弱放射音の最小可聴値

図11 機関放射音の最小可聴値

5.3 高音圧時の瞬時低減による聴取改善

機関放射音は図2に示したように高い音圧レベルの燃焼音を断続的に発生している。前述したようにこれを人は一つ一つの燃焼音として捉えず一定の繰り返しパターンによる連続音として聴取しているが、この燃焼音は音圧レベルが高いため、そのほかの音に対してはマスキング効果を及ぼすことになる。

図4～図9の実験結果は妨害音と目的音が同時に存在していたが、同時に存在しない場合も継時マスキングという現象が起こる。これは妨害音が停止しても聴覚神経系への刺激は瞬間に停止するのではなく持続しながら徐々に減少して200msで消滅するため、妨害音が無くてもマスキング現象は存在する⁶⁾。つまり、燃焼音(強放射音)は同時に存在する他の音をマスキングするとともに放射が終了した後の音(弱放射音)に対してもマスキングすることになる。従って、強放射音のみを瞬間的に減音処理することによりマスキング現象を低減させることができる。この時の強放射音の減音される量は機関放射音の一定時間の平均値と比較して自動的に決定されるため、プログラム中では常に変動する値になる。

5.4 聴覚支援システム

前節の手法を組み入れた聴覚支援システムとして図12に概略図を、図13にデータ処理の構成図を示した。このシステムは概略図に示すようにマイクロホンと聴覚支援装置と音響出力装置から構成され、機関室内の騒音をマイクロホンで收音し、処理した後の音を聴取することになる。例えば、主機関が運転されている中で、発生される異常音を機関制御室内で聴取したり、小型化された聴覚支援システムを機関要員が持参して点検業務に当たることを想定している。従って、ここでは目的音となるものは特定していない。データ処理の流れを説明すると次のようになる。マイクロホンで收音された音はAD変換器により一定時間のデータが計算機のメモリ上に格納される。格納されたデータから順次データを取り出し、そのデータに対し周波数分析を行い、各周波数の音圧データにより設定してある閾値レベルより大きいのか否かを判断する。大きいと判断された場合、その瞬間の時間系列の音波形に対して減音処理を行い大きい音圧レベルの音によるマスキングの影響を低減する。一方、小さいと判断された場合、この処理

図12 聴覚支援システム概略図

は行われず、データは後段の信号処理部へ送られ、低周波域減衰が実行される。以上のデータ処理された音響信号がDA変換器によってアナログ化されたあと、音響スピーカから発生される。

図13 データ処理

5.5 機関放射音に対するシステムの適応

図14には前述の聴覚支援システムによって機関放射音を処理した結果を示した。図14-(a)は処理前の機関放射音を表しており、この図の時間内で5回の燃焼音を明確に観察できる。

次に示した図14-(b)は、(a)図の音響信号に対して前述の高音圧時の瞬時低減と低周波域減衰を施した場合の音響出力図である。低周波域減衰処理の場合、ここでは低域の遮断周波数を300Hzに設定して低周波領域を減音しているが、この時のフィルタ特性はプログラム上で設定変更を可能にしているため再生音を聴取しな

がら聴取領域を変更できる。次に高音圧時の低減処理を行うことにより、(a)図で観察される5回の燃焼音全てが、(b)図では処理されて燃焼音の前後と同程度の音圧レベルになっている。

(a) 信号処理前

(b) 信号処理後

図 14 低周波域減衰と高音圧低減処理結果

図 15 機関音の処理後の最小可聴値

つまり、機関放射音は本システムによって瞬時の高音圧の音が低減されたことが分かる。なお、この時、低減されるか否かの判断は、図 13 に示す閾値により決定されるが、これは收音している機関放射音の音圧レベルによってプログラム内で自動的に変更されるため機関放射音の收音位置が変わって、音圧が変化しても本装置は対応可能である。

図 15 には「高音圧低減処理」と「低周波数域低減処理+高音圧低減処理」の2種類の低減処理を施した機関放射音を聴取させたときの最小可聴値を示した。併せて、低減処理を行っていない機関放射音を聴取したときの最小可聴値も示した。これらは4名の被験者データより作成した。図 15 の結果を見てみると、図中の「低減処理なし」の場合に較べて「高音圧低減処理」を行った場合、200Hz 以下では最小可聴値に差は見られないが、400Hz 以上の周波数帯域では3dB から 12dB 程度、最小可聴値が下がっており、この範囲で聴取改善が見られた。

次に、「低周波数域低減処理」と「高音圧低減処理」を同時に行った場合の結果を見てみると、400Hz 以下の帯域では最小可聴値が大きく低下しているが、これはフィルタにより低周波域を減衰させたために聴取しやすくなったもので評価対象に加えることはできない。また、400Hz 以上の帯域では「高音圧低減処理のみ」の結果より少し最小可聴値の低下が見られるものの、これは「高音圧低減処理のみ」と同程度の聴取改善といえる。とすれば、「低周波数域低減」の処理は効果的でないと考えられるが、この処理を付加することで全体の音圧レベルを下げることで全体の音圧レベルを下げることで、機関要員にとって生理的に聴取し易くなる利点がある。

6. むすび

本研究は機関室内での異常音聴取を目的として、高い騒音レベル下における音の聴取実験を行った。まず、目的音と妨害音に純音を用いて、マスキングに関する基本的な実験を行った。その結果、明らかに人の聴取能力にはマスキング効果による聴取力低下が確認されたので、次に妨害音を機関騒音とした時の聴取実験を実施した。その実験は機関放射音から燃焼音と非燃焼音をそれぞれ抽出し、燃焼音を妨害音としたときの最小可聴値と非燃焼音を妨害音としたとき

の最少可聴値を求めた。その結果、燃焼音の最少可聴値は非燃焼音の最小可聴値より全ての周波数帯域に渡って大きくなっていることから、燃焼音は他の音を聞き難くしていることが分かった。以上の点から大きな妨害音となる燃焼音を瞬間的に減音処理することにより、マスキング効果を低減させて音響情報を機関要員に伝える聴取支援システムについて検討した。その結果、広い周波数範囲に渡って聴取改善できることが分かった。今回の聴取実験は反響音による影響をなくするために吸音設備をもつ実験室で行った。反響音の存在する機関室で同じ聴取実験を行った場合の検討はしていないが、構築した聴取支援システムでは燃焼音も反響音も含めてマイクで收音した全ての音に対して瞬間的に大音量となるものは妨害音として減音処理を加えるようになっている。従って、機関室内の主機関以外の大音量の音や反響音にも対応可能である。今後、実船を用いて実用への問題点や処理手法などは改善を加えてきたい。なお、本研究は 17 年度科学研究費の支援の下に行っている。

参考文献

- 1) 木村隆一他 2 名、音響信号のニューラルネットワークによるディーゼル機関の異常検出、日本船用機関学会誌、Vol.32-3, (1997-9), 206-214
- 2) 木村隆一、斉藤 哲、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、日本マリンエンジニアリング学会誌、Vol.38-7, (2003-7), 63-70
- 3) 笹岡英毅、ウェーブレット解析ツールによるデータマイニング、Savemation Review, Vol.20, (2002-8), 62-70
- 4) 時田保夫、音の環境と制御技術、(2000-3), 107-116、フジテクノシステム
- 5) Elaine N, Marieb, 人体の構造と機能、(2005-3) 249-263, 医学書院
- 6) 境 久雄、聴覚と音響心理、(2004-9)、p115、コロナ社