船室内騒音のアクティブ 制御システムの検討*

石 光 俊 介** 吉 村 美 香***

Study on Active Control System of Ship Interior Noise

By S.Ishimitsu and M.Yoshimura

The Oshima Maru is a 226-gross-ton training ship equipped with one 1300 ps, 370r.p.m. diesel engine. In this ship, various structural countermeasures against vibration and noise were taken. However, unpleasant low-frequency sound from the engine room persisted in the mess hall where crews take their breaks. The main engine room, located on the lower deck, is adjacent to and partially below the mess hall. Conventional solutions for that noise are also subject to considerable structural variation. Active noise control, ANC, is capable of providing a universal solution. In order to apply ANC, we investigated the sound field in the mess hall using complex intensity analyses and multiple coherence function. From these results, we selected the reference signals suitable for ANC and considered constructing the active control system using multi-channel filtered-x LMS algorithm of the ship interior noise.

1. 緒言

大島商船高等専門学校の練習船「大島丸」は1300ps 370r.p.m.の性能を持つディーゼル機関を主機関とする定員56名、226トンの練習船である。この練習船には様々な構造上の振動・騒音対策がなされているが、船員の休憩室ともなる食堂は機関室に隣室し、不快な低域周波数成分を持つ騒音が存在している。この食堂の騒音源は主として隣室の機関室と考えられる。機関の振動の影響が伝搬するのは走行中であり、走行中では機関による騒音のみではなく、海面との接触音やスクリュウ音などの様々な騒音が適応制御の外乱として存在する。本研究においては食堂内振動・騒音の適応騒音制御(ANC: Active Noise Control)を行うために、機関室の騒音源と考えられる各所の音響インテンシティによる調査とマルチコヒーレンスによる調査を行った。ま

た、それらの結果を元に多入力Filtered-x LMS (Least Mean Square) アルゴリズムによる実音場の伝達関数を考慮したANCシミュレーションを行い、船内ANCシステム構築の可能性について検討した。

2. 大島丸の構造的騒音対策と音響特性

大島丸の騒音対策は主として次の3つによりなされている。

- ・防振ゴムを用いた機関台
- ・制振材による床、壁による遮音および制振
- ・吸音材

大島丸においてはこのような構造的騒音対策では低域周波数成分の騒音低減は不十分であった。実際に大島丸に使用されている吸音材の特性は、1000Hz付近で80%の吸音率であるのに対し、250Hzでは40%程度の吸音効果しかない。

このため、機関室の隣室である食堂では、低域周波数成分を持つ騒音が存在している。しかし、機関室から通路一つ隔てた機関制御室では食堂のような不快な騒音は感じられない。

* 原稿受付 平成13年8月21日

** 正会員 大島商船高等専門学校(大島郡大島町小松1091-1)

*** 中国電力株式会社

図1：食堂と機関制御室の音響特性

図1に350r.p.m.定常走行時騒音の周波数特性の最大値を0dBとした機関制御室並びに食堂の周波数特性を示す。このときの気象庁風浪階級表による海面状況は2(比較的波の静かな状況)である。

この特性から400Hz以下においては機関制御室より食堂の騒音特性が約10dB上回っていることが分かる。機関制御室はかなり静かに、食堂はうるさく感じるのは、この400Hz以下が原因しているものと思われる。400Hz以上ではむしろ機関室の特性において騒音が大きい部分もあるからである。また、100Hz以下では双方の間に20dBもの差があり、構造的な騒音対策では低域については不十分であることが分かる。

一方で、ANCでの一つの目標基準として、食堂の騒音レベルを機関制御室並にするという設定が成り立つと考えられる。つまり、400Hz以下を10dB低減すれば聴感的な不快感が少ない騒音環境を食堂に創り出すことができる。本研究においてはこれを騒音制御目標の指針とした。

3. 騒音源探査

3.1 音響インテンシティ

音響インテンシティは、音圧と粒子速度の積の時間平均として定義され、音場における音響の流れを表すベクトル量である。食堂においてこの音響の流れを解析することにより、音源の方向を明確化する。

この音響複素インテンシティは(1)式で定義される⁽¹⁾。

$$I(r) = 1/2 p(r, t) u^*(r, t) = I(r) + jQ(r) \quad (1)$$

ここで、 r は位置、 $p(r, t)$ は音圧、 $u^*(r, t)$ は粒子速度の複素共役を示している。通常の音響インテンシティではこの複素インテンシティの実部 I (Active Intensity, AI)を解析することにより、音響の流れを解析する。また、虚数部 Q (Reactive Intensity, RI)は音源の近傍や定在波音場などで存在することが知られている。よって、今回の食堂のような空間ではRIが存在する。

3.2 解析結果

食堂の中央には部屋の殆どを占める固定式テーブルがあり、このテーブル上にメッシュを張って、機関室側壁と平行な面上で4マイク式インテンシティプローブを移動させ、RIを計算した。風浪階級2の海面状況での350r.p.m.定常走行時の結果を図2に示す。食堂は定在波音場であり、図2のRIベクトルマップから機関室側壁下方が音源であることがわかる。下部のパワーはテーブルの影響を受け若干小さくなっているが、音源方向は機関室隔壁下方を示している。よって、主たる騒音源は船外によるものではなく、機関室隔壁近傍にあると考えられる。つまり、機関室隔壁下部と機関室側の床の部分の各パネル振動が機関音の透過音が音源として推定される。

図2：RIベクトルマップ(350r.p.m.走行時)

3.3 コヒーレンス関数と消音効果

音源を調査する方法としてコヒーレンス関数を用いることにより、同方向から来る音源のどちらの寄与度が高いかを解析することが可能となる。前節でのパネル振動かエンジン透過音かの同定も可能となるわけである。また、コヒーレンスの計測により、ANCシステムの消音性能も予測することが可能である。マルチコヒーレンス計測系をモデル化し、任意の箇所に消音用のスピーカを設置したとする。そうすると、そのときの適応フィルタの最適値 W_{opt} は次のように表現できる。

$$W_{opt} = C^{-1} S_{xx}^{-1} S_{xd} \quad (2)$$

ここで、 C はアクチュエータからエラーセンサまでの伝達関数、 S はパワースペクトル密度関数、 x は参照信号、 d は所望信号である。マイクロホンの信号を最小にすることをANCでは考えればよい⁽²⁾ので、エラーセンサ値が最小になる場合を考えると以下の式が成り立つ。

$$J_{min} = S_{dd} - S_{xd}^H S_{xx}^{-1} S_{xd} \quad (3)$$

これを正規化すると、次式のようになる。

$$\frac{J_{min}}{J_d} = 1 - \frac{S_{xd}^H S_{xx}^{-1} S_{xd}}{S_{dd}} = 1 - \eta_{xd}^2 \quad (4)$$

ここで、 H はエルミート変数、 η_{xd}^2 はマルチコヒーレンスである。このように性能の上限をマルチコヒーレンスにより評価できることがわかる。(4)式から伝達関数がスルー($C=1$)の状態であっても、マルチコヒーレンス値が0.9以上なければ20dBの効果は得られないことが分かる⁽³⁾。

3.4 マルチコヒーレンスによる騒音源評価

食堂の騒音は機関室方向からの騒音が支配的であることが解析できたので、最初に機関室のエンジンそのものを対象に騒音源の調査を行った。図3に示すターボチャージャ中央X,Y,Z方向、機関台船尾側右、機関台船尾側左、機関台船首中央、第二発電機横の機関室7点と食堂のテーブル上に配置したエラーセンサ(マイクロホン)との相関をマルチコヒーレンスにより調べた。機関室の第一発電器の真上あたりに制御対象である食堂が位置している。機関室7点の参照信号を用いたマルチコヒーレンス解析結果はコヒーレンスとしての値は小さく、60Hz付近の0.26が最高であった。これよりエンジンそのものの振動は線形的に食堂の騒音になっていない可能性があることが分析できた。

よって、次に食堂の壁と床の振動と音響信号とのマルチコヒーレンスを調べた。壁面にはRIで音源とされた部分に加速度ピックアップを2点設置し、床もその壁面とほぼ対象な位置に2点設置した。エラーセンサは同じくテーブル上であり、参照信号は図4の*印でしめす。この予備実験では参照信号が3つ減っているにも関わらず、マルチコヒーレンスは50~100Hzはほぼ0.9以上ととれており、この相関性であると200Hz以下の低域のANCは比較的うまくいくと考えられた⁽⁴⁾。つまり機関室内の振動より室内のパネル振動の方が部屋への騒音寄与度が大きいと考えられる。

そこでさらに高い相関性を得るために、食堂の壁と床のパネルを対象に振動源の調査を行った。調査の結果、図4に示す振動の大きい5点に加

図3：ピックアップ配置図(下甲板)

図4：ピックアップおよび
エラーセンサ配置図(上甲板)

速度ピックアップを設置し、騒音も最も大きい位置にエラーセンサを設置した。結果的に固体伝搬振動を重視した壁の梁の部分への配置ではなく、最も振動レベルの大きいパネル中央部に配置した。この位置の方が相関性が高く⁶⁾、パネル振動がより効果的に抽出できるためである。

図5に350r.p.m.走行時にエラーセンサにFフィルタを適用し、パネル振動5点の参照信号を用いた場合のマルチコヒーレンス解析結果を示す。制御対象としたい帯域は400Hz以下であるため、この部分のコヒーレンス値が高くなければならない。図5より60Hz、150Hz付近で高いコヒーレンス値が得られていることがわかる。また図6に聴感補正フィルタであるAフィルタを適用した場合のマルチコヒーレンス解析結果を示す。図6より60Hz、90Hz、150Hzの位置で高いコヒーレンスがとれていることがわかる。

この様にコヒーレンスの観点では機関室のエンジンそのものではなく、食堂のパネル中央部の振動により高い相関があり、0.9以上のマルチコヒーレンス値が得られている帯域に対してはANCの高い騒音低減効果が期待できる。

4. ANCシミュレーション

多入力Filtered-x LMSアルゴリズムを利用した、主音源K個、二次音源1個、エラーセンサ1個の多入力-出力適応制御系case (K,1,1)は、次式のように表される⁶⁾。

図5：マルチコヒーレンス
(350r.p.m.走行時, Fフィルタ)

図6：マルチコヒーレンス
(350r.p.m.走行時, Aフィルタ)

$$e(n) = d(n) + \sum_{j=0}^{J-1} c_j \cdot \sum_{k=0}^{K-1-I-1} w_{ki}(n-j) \cdot x(n-i-j) \quad (5)$$

$$w_{ki}(n+1) = w_{ki}(n) - 2\mu e(n) r_k(n-i) \quad (6)$$

$$r_k(n-i) = \sum_{j=0}^{J-1} \hat{c}_j x_k(n-i-j) \quad (7)$$

ここで、 c_j は二次音源からエラーセンサまでの伝達関数、 $\hat{c}_j$ はそのモデルで、 J はフィルタのタップ長である。 $e(n)$ が実音場での消音制御結果とな

表1：基本動作条件

サンプリング周波数	2kHz
アンチエイリアシングフィルタ	500Hz
適応フィルタタップ長	256
モデリングフィルタタップ長	512

り、制御しない場合の音響 $d(n)$ と比較して消音効果を評価する。 $x_k(n)$ は k 番目の参照信号となる振動であり、 K 個の参照信号を使って制御することになる。 $w_k(n)$ は適応フィルタで k 番目の参照信号を入力とする i 番目のタップの係数を意味している。 L は適応フィルタのタップ長である。

以上のアルゴリズムを用いて、ここではまず参照信号と消音効果の関係を前節のコヒーレンス結果を参照しながら考察をすすめていくことにする。なお、ANCの基本動作条件は表1のとおりである。

4.1 機関振動を参照信号とした場合のANCシミュレーション

ANCを行うため騒音源探査により食堂の音響と相関のある参照信号を抽出する位置を特定する必要がある。音響インテンシティ解析により食堂では機関室方向からの騒音が支配的であることが分かったので、最初に機関室7点に加速度ピックアップを設置しANCシミュレーションを行った。その結果、マルチコヒーレンス解析によって線形性が見出せなかったとおり、ほとんど効果はなかった。機関室そのものの振動と制御対象となる食堂内騒音との線形関係が見出せないのは、コヒーレンス結果からも明らかである。よって線形関係を見出すことができる参照信号を見出す必要がある。

4.2 食堂の壁の梁部分を参照信号とした場合のANCシミュレーション

次に食堂の壁の梁部分の振動を参照信号としてピックアップした。壁はRIで音源とされた2点に設置し、床もその壁面とほぼ対称な位置に設置した。参照信号は全部で4点とし、機関室7点より3点減っている。コヒーレンス結果より食堂の騒音は機関室の各振動との相関はとれておらず、食堂に伝搬する間に非線形性が伴っていることが確認できた。

ANCシミュレーションを行った結果、参照信号が減っているにも関わらず60Hz、80Hz、120Hzの周波数成分で10dB程度の消音効果が得られた。しかし目標とする20dBの効果は得られず、実音場を考慮したシミュレーションではほとんど効果がなかった。

4.3 発電機と食堂の壁の梁と床部分を参照信号とした場合のANCシミュレーション

食堂の騒音は食堂の壁と床の振動に相関があることが分かったので、この振動が制御対象となる食堂直下の発電機の影響によるものではないかと考え、機関室の発電機および食堂の壁の梁部分および床に加速度ピックアップを設置した。発電機は図3における第1発電機振動を参照信号とした。また、梁は図7に示すような隔壁を固定するための梁であり、機関室の振動が梁を通じて固体伝播して、食堂に至ると考えていた。ANCシミュレーションを行った結果、主に発電機からと考えられる60Hzの周波数成分では最高20dBの消音効果が得られた。しかしその他の低帯域周波数成分では機関制御室並まで押さえることができなかった。また、(5)式の伝達関数に特性を与えた実音場を考慮したシミュレーションではほとんど効果がなかった。

4.4 食堂のパネル中央部と床部分を参照信号とした場合のANCシミュレーション

よりパネル振動を効率良く抽出するために、図7に示すように騒音源を食堂のパネル中央部と床に特定し参照信号としてパネル振動を抽出した。ANCシミュレーションを行った結果、目標とする

図7：参照信号検出位置

機関制御室並の騒音まで押さえることができた。図8にその結果を示す。60Hzで23dB、120Hzで5dBの消音効果があった。以降、実音場での考察は本参照信号を用いて行っていくものとする。

4.5 遅延を考慮したANCシミュレーション

参照信号を機関室にした場合や食堂の壁の梁の部分にした場合では、実音場を考慮にいれたシミュレーションではほとんど消音効果は得られなかった。しかし参照信号を食堂のパネル中央部に特定し振動を抽出した結果、目標とする機関制御室並の騒音まで押さえることができた。そこでQuiet Zoneを考慮し、スピーカとマイクロホンまでの距離を離して伝達関数の遅延を変化させてANCシミュレーションを行った。

350r.p.m.走行時にFフィルタを用いて遅延を変えた場合のシミュレーション結果の一部を表2に示す。60Hzの1波長分である5.61m離れた位置で16dBの

図8：ANCシミュレーション
(350r.p.m.走行時、Fフィルタ)

表2：遅延と消音効果

スピーカとマイクの距離	60Hz	120Hz
なし	23dB	5dB
2.72m(120Hz 1波長分)	18dB	3dB
5.61m(60Hz 1波長分)	16dB	4dB
11.22m(60Hz 2波長分)	10dB	2.5dB

高い消音効果が得られたが、距離を離すにつれその効果は小さくなっている。これはFiltered-x LMS アルゴリズムにおいて、遅延が入るほど収束係数が遅くなることに起因している⁶⁾。食堂は5.5m×2.5mであり、定在波音場では本シミュレーション結果がそのまま適用できる訳ではないが、伝達関数にディップが無ければ10dB以上の効果が期待できる。伝達関数のピークやディップは部屋の大きさと波長の関係によっておきる干渉により生じるもので部屋の長さが5.5mであるので、30Hz($\lambda/z=5.61m$)の高調波が干渉により定在波における腹と節が顕著になる。そのため、食堂内の音場では30Hzの高調波が回転周期のみならず、室内の構造上の増幅との相乗効果により不快な音場となっていると考えられる。また、この部屋の構造を利用することにより、低周波数の波長に対応した比較的広範囲なQuiet Zoneが得られることが期待できる。

4.6 実音場を考慮したANCシミュレーション

実システム構築の可能性を検討するために、実音場の伝達関数を考慮したANCシミュレーションを行った。伝達関数とはANCを行うために用いるアクチュエータからエラーセンサまでの特性のことであり、ANCと同様にLMSアルゴリズムを用いて測定することができる。本実験では適応等価器によるシステム同定⁷⁾により伝達関数を測定した。この方法を用いることにより、実システム化したときに伝達関数測定機能をANCシステムに組み込むことが可能となる。伝達関数は実験室および大島丸食堂において測定した。実験室は大島丸食堂との比較のために計測し、パソコンが動作している10m×7.2mの部屋でアクチュエータとエラーセンサの位置は近接させた。図9に各伝達関数の周波数特性を示す。大島丸で測定した伝達関数に比べ、実験室で測定した伝達関数は低域成分が強調された特性となっている。各伝達関数を用いてANCシミュレーションを行った結果をまとめたものを表3に示す。実験室で測定した伝達関数を用いた場合、60Hz付近で最大20dBの消音効果が得られた。また、実際に大島丸で測定した伝達関数を用いた場合、Fフィルタでは最大6dB、Aフィルタでは60Hz付近で16dB、150Hz付近で10dBの消音効果が得られた。これはマルチコヒーレンス解析によって騒音低減効果が期

図9：各伝達関数の周波数特性

図10：ANCシミュレーション
(350r.p.m.走行時, Fフィルタ)

表3：ANCシミュレーション消音効果結果

伝達関数測定条件	60Hz	120Hz	150Hz
実験室 (350r.p.m. 走行時, F フィルタ)	15dB	5dB	9dB
実験室 (350r.p.m. 走行時, A フィルタ)	15dB	6dB	12dB
大島丸 (350r.p.m. 走行時, F フィルタ)	6dB	4dB	3dB
大島丸 (350r.p.m. 走行時, A フィルタ)	16dB	5dB	10dB

待された周波数と対応している。Fフィルタでの効果が少なかったのは、伝達関数の低域のディップの影響が強くなったためと考えられる。

なお、図10は350r.p.m.走行時にFフィルタを適用し大島丸で測定した伝達関数を用いてANCシミュレーションを行った結果で、図11がAフィルタを適用した場合の結果である。ピーク値を持つ周波数において、目標とする低減効果が得られていることが確認できる。

また、図12は280r.p.m.走行時にAフィルタを適用し大島丸で測定した伝達関数を用いてANCシミュレーションを行った結果である。食堂内騒音は機関回転数により変動すると共に直下の発電器による影響も加わるもののパネル振動の最大点であるパネル中央部の振動を参照信号とすることにより、350r.p.m.以外の他回転周期においても有効であることが確認できる。

これらの結果より、実音場の伝達関数を用いても共振周波数では目標とする機関制御室並の騒音まで押さえられたので、ディップが生じない様スピーカとセンサの位置に注意すれば実システムへの展開が十分に可能と考えられる。

図11：ANCシミュレーション
(350r.p.m.走行時, Aフィルタ)

5. 結言

大島丸は様々な構造上の騒音・制振対策がとられており、その対策で対処できなかった騒音が隣室の食堂に低域騒音として存在する。この低域騒音に対処するためにANCの可能性を探った。まず、食堂騒音と隣室の機関制御室との特性比較により、400Hz以下を10dB低減すれば聴感的な不快感が少ない騒音環境を食堂に創り出すことができ

図12：ANCシミュレーション
(280r.p.m.走行時, Aフィルタ)

ることを見だし、本研究においてはこれを騒音制御目標の指針とした。しかし、構造上の対策や船舶という複雑な構造、波の影響などが加算性乗算性雑音として加わり、結果的に実音場を考慮にいとANCシミュレーションにおいて目標とする機関制御室並の騒音まで押さえることが困難であった。そこで、参照信号を食堂のパネル中央部と床に特定し振動を抽出し、大島丸で測定した伝達関数を用いて実験を行った結果、コヒーレンス解析によって騒音低減効果が期待された周波数である60Hzおよび150Hz付近でそれぞれ16dB、10dBの高い消音効果が得られた。食堂の騒音特性は調波構造を有しており、60,120Hzの各周波数はそれぞれそのピークに当たると同時に他よりも大きな卓越成分を持っており、これは卓越成分から

制御されるというアルゴリズムの特性上、Quiet Zoneも比較的広いこの周波数での3次元制御での効果が期待される。よって、実システムへの展開が十分に可能であることがわかった。

今後は実際に3次元空間制御を行うために本システムをDSP（デジタル信号処理装置）を用いて構築し、スピーカとマイクロホンの配置についての検討および外乱による影響についての検討を行い、Quiet Zoneと関連づけて効果的な実システムを構築する予定である。

文献

- (1) F.J.Fahy, サウンドインテンシティ理論と応用, オーム社
- (2) S.Horihata, S.Matsuoka, H.Kitagawa, S.Ishimitsu "Active noise control by means of virtual error microphone system", Proceedings INTER-NOISE 97, (1997), 529
- (3) 阿部, 浜田, 三浦, 坂本 "多チャンネル適応フィルタを用いたアクティブコントロールのための評価システム", 信学技報EA91-41, (1991), 31
- (4) 石光, "船室内適応騒音制御に関する基礎的研究", 第63回マリンエンジニアリング学術講演会, (1999), 73
- (5) S.Ishimitsu, H.Kitagawa, S.Horihata "Wavelet transform of the correlation of a training ship" Sixth International Symposium On Marine Engineering TOKYO 2000 Proceedings Vol. II (2000), 605
- (6) S.D.Snyder and C.H.Hansen "The influence of transducer functions and acoustic time delays on the implementation of the LMS algorithm in active noise control systems" Journal of sound and Vibration, (1990), 409
- (7) S.Haykin "Adaptive filter theory", Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., (1991)